

O problemie kolmatacji geowłóknin stosowanych w drenażach

Systemy drenażowe występujące przy obiektach drogowych są niezwykle istotnym elementem tych budowli. Jednym z powszechnie stosowanych obecnie materiałów w systemach drenażowych są geowłókniny. Ich zadaniem jest zabezpieczenie odwadnianego gruntu przed procesem sufozji, jak również ochrona drenażu przed zamuleniem przy jednoczesnym zachowaniu wodoprzepuszczalności. Typową trwałość drenażu, w zależności od rozwiązań, szacować można na kilkadziesiąt lat. W okresie tym sprawność drenażu ulega stopniowemu obniżeniu, co jest zjawiskiem normalnym, doświadczenia wskazują jednak, że w pewnych warunkach może dojść do znacznego zmniejszenia wodoprzepuszczalności geowłókniny, która z czasem zaczyna przybierać cechy geomembrany. W artykule przedstawiono wybrane kryteria doboru geosyntetycznych materiałów filtracyjnych oraz przykłady uszkodzeń systemów drenażowych, do jakich może dojść w wyniku kolmatacji.

Transport cząstek gruntu w obrębie struktury ziarnistej możliwy jest wtedy, gdy istnieje wystarczająca ilość i wielkość wolnych przestrzeni (porów) w gruncie oraz istnieje siła filtracyjna zdolna unieść i poruszyć cząstkę gruntu. Możliwość transportu ziaren gruntu pod wpływem przepływającej wody wskazuje na dwa zasadnicze zjawiska towarzyszące przepływowi wody, którymi są sufozja gruntu i kolmatacja wewnętrzna geosyntetyku. Funkcja filtracyjna geosyntetyku polega na umożliwieniu przepływu wody przy jednoczesnym zatrzymaniu gruntu. Funkcją filtru w budownictwie nie jest jednak zatrzymanie (retencja) cząstek gruntu, gdyż filtr, który zatrzymuje cząstki gruntu, ulega kolmatacji z powodu gromadzących się na nim (lub w nim) cząstek gruntu.

Ze względu na to, że w geotechnice nie ma możliwości płukania filtru lub jego wymiany, filtr musi zapobiegać przemieszczaniu się gruntu. Jeżeli filtr funkcjonuje prawidłowo, grunt nie ulega przemieszczeniu i ryzyko wystąpienia kolmatacji jest niewielkie.

Redukcja sprawności drenażu związana jest z jego kolmatacją, a więc z ograniczeniem liczby lub rozmiaru porów biorących udział w przepływie wody gruntowej. W zależności od tego, jakie czynniki wywołują ograniczenia w przepływie wody gruntowej, wyróżnić można kolmatację:

- mechaniczną – klasyczny rodzaj kolmatacji, polegający na zatrzymywaniu i odkładaniu się najdrobniejszych cząstek gruntu, poruszających się uprzednio na skutek procesu sufozji, w obszarze drenażu – mechanizm ten omówiono powyżej,
- chemiczną – polegającą na wytrącaniu się z wody gruntowej w strefie drenażu związków chemicznych utrudniających swobodny dopływ wody do drenażu,
- biologiczną – związaną z rozwojem grzybów, pleśni lub przerostem masy korzeniowej w obszarze drenażu,
- mieszaną – kiedy wymienione powyżej rodzaje kolmatacji występują łącznie.

Wybrane kryteria doboru geosyntetycznych materiałów filtracyjnych

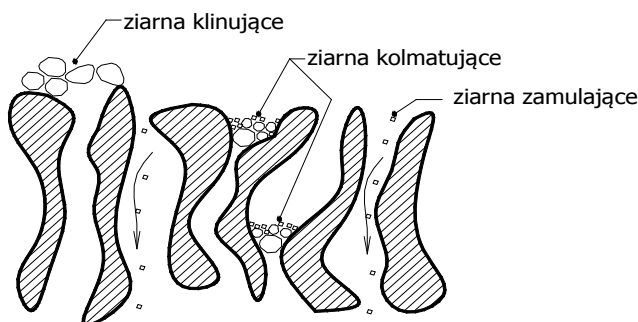
Z funkcji filtracyjnej geosyntetyku, polegającej na umożliwieniu przepływu wody przy jednoczesnym zatrzymaniu gruntu, wynikają wymagane właściwości wodoprzepuszczalności i retencji, jakim powinny odpowiadać filtry geotekstylne. Przedstawione będą tu niektóre kryteria, którymi można się kierować przy doborze materiału geosyntetycznego pełniącego funkcje filtracyjne. W większości są to kryteria zaproponowane przez J.P. Giroud [4].

Kryterium wodoprzepuszczalności

Obecność filtru (nawet bardzo przepuszczalnego) zaburza przepływ wody w gruncie chronionym (od strony dopływu do filtru) i z tego powodu wybrany filtr musi wprowadzać akceptowalnie małe zaburzenia warunków przepływu wody. Zmiany te dotyczą ciśnienia wody w porach i natężenia przepływu.

Obecność filtru powoduje wzrost ciśnienia w porach gruntu przyległego do filtru i z tego powodu wybrany materiał powinien powodować jak najmniejszy wzrost ciśnień. Doświadczenia wskazują, że wzrost ciśnienia wody w porach nie wystąpi, jeżeli dobrany filtr spełniał będzie następujące kryterium:

$$k_f \geq k_s \cdot i_s$$



Rys. 1. Mechanizm migracji cząstek gruntu przez geowłókninę

Zastosowanie	Gradient hydrauliczny
drenaż opaskowy	1,0
drenaż pionowy na ścianie	1,5
odwodnienie krawędzi drogi	1,0
umocnienie kanału	1,0
warstwa drenażowa składowiska	1,5
drenaż w podstawie skarpy odpowietrznej zapory ziemnej	2,0
rdzeń glinowy (iłowy) zapory ziemnej	od 3,0 do 10,0

Tab. 1. Typowe gradienty hydrauliczne

gdzie:

k_f – przepuszczalność filtru,

k_s – przepuszczalność gruntu,

i_s – gradient hydrauliczny w gruncie przyległym do filtru.

Typowe gradienty hydrauliczne w zależności od miejsca zastosowania filtru zestawiono w tab. 1 (zachowawczo przyjęto gradient 1,0 w przypadkach, gdy w rzeczywistości jest on mniejszy niż 1,0)

Wystarczająca wodoprzepuszczalność geosyntetyku oznacza, że należy dążyć do zwiększenia wodoprzepuszczalności struktury filtracyjnej w kierunku przepływu wody (zgodnie z regułami obowiązującymi przy doborze warstw filtru odwrotnego). W przypadku ochrony brzegu rzeki oznacza to, że przepuszczalność materiału geotekstylnego powinna być większa od przepuszczalności gruntu, na którym ma być zastosowany materiał geotekstylny. Jako główne kryterium projektowania w przypadku przepływu normalnego do powierzchni rozdziału faz przyjmuje się zasadę, że wodoprzepuszczalność geosyntetyku powinna być większa niż gruntu po stronie, z której następuje przyływ wody.

Kryterium retencji

W jaki sposób należy dobrać maksymalny dopuszczalny wymiar porów filtru geotekstylnego, aby filtr ten zatrzymał grunt? Odpowiedź na to pytanie wynika z dostosowania kryterium Terzagiego dla filtrów odwrotnych: $d_{15 \text{ filtru grt}} < 5 \cdot d_{85 \text{ gruntu}}$

Kryterium to pozwala przyjąć:

$$O_{\text{filtru grt}} \approx d_{15 \text{ filtru grt}} / 5, \text{ a stąd } O_{\text{filtru grt}} < d_{85 \text{ gruntu}}$$

gdzie:

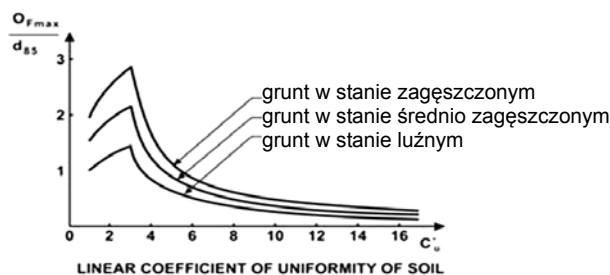
$O_{\text{filtru grt}}$ – wymiar porów filtru geotekstylnego,

$d_{15 \text{ filtru grt}}$ – średnica zastępcza filtru gruntowego,

$d_{85 \text{ gruntu}}$ – średnica zastępcza gruntu chronionego lub poprzedniej warstwy filtru gruntowego.

Nierówność ta oznacza, że filtr powinien zatrzymać jedynie duże ziarna gruntu, co jest wbrew ogólnej zasadzie mówiącej, że powinien zatrzymać wszystkie ziarna gruntu, a nie tylko duże.

W takim przypadku filtr będzie skuteczny jedynie wówczas, gdy duże ziarna gruntu zatrzymają mniejsze ziarna – innymi słowy: jeżeli grunt będzie wewnętrznie stabilny. Z tego względu kryterium retencji gruntu powinno uwzględniać nie tylko wymiar porów filtru, lecz również wewnętrzną stabilność gruntu. Wewnętrzna stabilność gruntu uzależniona jest od rozkładu frakcji gruntu, który określan jest przez wskaźnik różnoziarności $U = d_{60}/d_{10}$. Z zależności geometrycznych wynika, że grunt mający wskaźnik różnoziarności o wartości równej około 3 charakteryzuje się największą stabilnością wewnętrzną. Na poniższym wykresie przedstawiono kryterium retencji według J.P. Giroud



Rys. 2. Kryterium retencji z uwzględnieniem zagęszczenia i wskaźnika różnoziarności gruntu według J.P. Giroud [4]

Rozmiar porów filtra / d_{85} gruntu



Rys. 3. Kryterium retencji według J.P. Giroud w zestawieniu z kryterium dostosowanym z filtrów odwrotnych [4]

w funkcji zagęszczenia gruntu i jego wskaźnika różnoziarności, uwzględniające wewnętrzną stabilność gruntu.

Konsekwencje stosowania kryterium retencji, które nie uwzględnia wskaźnika różnoziarności, omówiono, korzystając z rys. 3. Linia przerywaną naniesiono klasyczne kryterium Terzagiego dostosowane do filtrów geotekstylnych $O_{\text{filtru grt}} = d_{85 \text{ gruntu}}$. W przypadku małych wartości wskaźnika różnoziarności ($U < 5$) kryterium (linia przerywana) dopuszcza przyjmowanie zbyt małych wymiarów porów filtru geotekstylnego, co stwarza niebezpieczeństwo kolmatacji filtra. Natomiast w przypadku większych wartości wskaźnika różnoziarności ($U > 5$) kryterium to dopuszcza zbyt duże rozmiary porów filtru, co z kolei może doprowadzić do sufozji gruntu. Z tego też względu filtr geotekstynny będzie bezpieczniejszy, jeżeli będzie dobrany na podstawie kryterium retencji, które uwzględnia wewnętrzną stabilność gruntu.

Innym kryterium retencji stosowanym w projektowaniu filtrów geotekstylnych są zalecenia bazujące na doświadczeniach hollenderskich [7] i założeniu filtru geometrycznie szczelnego – w przypadku filtru geometrycznie szczelnego (zamkniętego) zakłada się brak transportu cząstek gruntu z podłoża niezależnie od poziomu obciążenia hydraulicznego. Oznacza to, że otwory w filtrze geotekstynnym są na tyle małe, że cząstki gruntu nie są w stanie fizycznie przejść przez otwór i nie są tracone z wewnętrznej struktury gruntu. Dodatkowym wymogiem jest tu, aby grunt był wewnętrznie stateczny, a więc aby wskaźnik niejednorodności uziarnienia spełniał nierówność $U < 5$.

Przeprowadzone doświadczenia własne [9] wykazały, że nawet uszkodzony materiał geotekstynny zdolny jest w dalszym ciągu do pełnienia funkcji filtracyjno-separacyjnych, przy czym warunkiem koniecznym jest wytworzenie się naturalnego przesklepienia filtracyjnego w strefie kontaktu gruntu z geosyntetykiem. Aby przesklepienie takie mogło się wytworzyć, grunt stanowiący podłoże

► geosyntetyku musi charakteryzować się wewnętrzną stabilnością, a więc mieć wskaźnik różnoziarności $U < 5$. Dla innych gruntów wewnętrzna stabilność może być w przybliżeniu oceniona za pomocą nierówności przedstawionych w tabeli 3 [8].

W przypadku gruntów wewnątrznie niestabilnych powstanie przesklepienia filtracyjnego nie jest możliwe, a zatem nieciągle materiały geosyntetyczne nie będą w stanie spełniać swoich funkcji, o ile występujące w strefie kontaktu gruntu i materiału geosyntetycznego prędkości filtracji zdolne będą do uniesienia i przemieszczenia drobnych frakcji ośrodka gruntowego. W gruntach wewnątrznie niestabilnych wzrasta również ryzyko dysfunkcji filtru geosyntetycznego w wyniku jego kolmatacji. Proces ten obserwowany jest w rzeczywistych konstrukcjach filtrów z zastosowaniem geosyntetyków (przykłady pokazano w pracy [9]).

Za kryterium przydatności geowłóknin jako warstw filtracyjno-drenażowych w kontakcie z gruntami wewnątrznie niestabilnymi proponuje się przyjęcie kryterium współczynnika proporcjonalności spadku GR (Gradient Ratio), określonego przez Korpus Inżynierski Armii Stanów Zjednoczonych [1, 2] oraz Haliburtona i Wooda [5] wraz z rozszerzeniem zaproponowanym przez Wojtasika [12]. Graniczną wartość gradientu GR, powyżej której występuje kolmatacja, określono na poziomie $GR = 3$.

Proponuje się, za Wojtasikiem, aby przy określaniu możliwości wystąpienia kolmatacji materiału w kontakcie z gruntami wewnątrznie niestabilnymi korzystać z zależności opisującej stosunek gradientów (SGR_{17}) w postaci:

$$SGR_{17} = 0,06 \cdot i + 0,13 \cdot F - 1,14$$

gdzie:

i – gradient hydrauliczny [-],

F – zawartość frakcji drobnych w gruncie (o średnicy $d < 0,05$ mm) w [%].

Graniczna wartość stosunku gradientów gruntu (SGR_{17}) wynosi 3. W przypadku, gdy stosunek gradientów (SGR_{17}), będący funkcją wzajemnych relacji gradientu hydraulicznego i oraz zawartości frakcji drobnych w gruncie F , opisany powyższą formułą, osiągnie bądź przekroczy wartość równą 3, należy liczyć się z wystąpieniem kolmatacji filtra geotekstylnego. Zwraca się uwagę, że opisana zależność ma zastosowanie w przypadku filtrów wykonanych z geowłóknin igłowanych.

Przeprowadzone doświadczenia [9] wykazały, że nawet uszkodzony materiał geotekstylny zdolny jest w dalszym ciągu do pełnienia funkcji filtracyjno-separacyjnych. Wzajemne przemieszczenie się ziaren gruntu pod wpływem filtrującej wody, będące wynikiem formowania się przesklepienia filtracyjnego, obserwowano w badaniach z rozciągniętą geowłókniną.

Stwierdzono, że kres występowania stabilnego przesklepienia zapobiegającego wzmoczonej sufozji (upłynnieniu ośrodka gruntowego) uzależniony jest od materiału gruntowego, geosyntetycznego oraz przede wszystkim prędkości wypływu strumienia filtracyjnego w miejscu uszkodzenia geosyntetyku. Z przeprowadzonych doświadczeń największą stabilność na zjawiska sufozyczne wykazywała geowłóknina z rozcięciem podłużnym (w kształcie I), najmniejszą zaś – geowłóknina z uszkodzeniem w postaci wyciętego koła (w kształcie O). Jest to istotny wniosek ze względu na to, że praktycznie wszystkie uszkodzenia materiałów geosyntetycznych będące wynikiem wandalizmu mają charakter podłużnych rozcięć, a więc w przypadku

Przewidywane warunki pracy filtru w konstrukcji	Kryterium doboru
obciążenie ustalone	$O_{90} < (1 \div 2) \cdot D_{90}$
obciążenie okresowo zmienne przy założeniu utworzenia się przesklepienia filtracyjnego	$O_{98} < (1 \div 2) \cdot D_{85}$
obciążenie okresowo zmienne przy braku utworzenia się przesklepienia filtracyjnego:	
– jeżeli skutki wymywania (osiadanie) są akceptowalne	$O_{98} < 1,5 \cdot D_{15}$
– jeżeli skutki wymywania (osiadanie) nie są akceptowalne	$O_{98} < D_{15}$
Oznaczenia:	
<p>O_{90} – pokrywa się z przeciętną (średnią) średnicą ziaren piasku frakcji, której 90% ciężaru pozostaje na lub w materiale geotekstylnym (lub 10% przechodzi przez materiał geotekstylny) po 5 minutach przesiewania,</p> <p>O_{98} – pokrywa się z przeciętną (średnią) średnicą ziaren piasku frakcji, której 98% ciężaru pozostaje na lub w materiale geotekstylnym (lub 2% przechodzi przez materiał geotekstylny) po 5 minutach przesiewania. O_{98} podaje praktyczne przybliżenie maksymalnego otworu filtru, a zatem odgrywa ważną rolę w kryterium szczelności materiału gruntowego w kontakcie z filtrem geotekstylnym w sytuacji obciążenia cyklicznego. O_{98} określane jest także jako O_{max}</p> <p>$D_{15, 85, 90}$ – oznacza zastępczą średnicę ziaren gruntu, których wagowy udział wraz z mniejszymi stanowi odpowiednio 15%, 85% i 90% masy całej próbki.</p>	

Tab. 2. Wymogi projektowe do geosyntetyków pełniących funkcje filtracyjno-separacyjne [7]

$D_{10} < 4 \cdot D_5$	$D_{20} < 4 \cdot D_{10}$	$D_{30} < 4 \cdot D_{15}$	$D_{40} < 4 \cdot D_{20}$
gdzie:			
<p>$D_{5, 10, 15, 20, 30, 40}$ – oznacza zastępczą średnicę ziaren gruntu, których wagowy udział wraz z mniejszymi stanowi odpowiednio 5%, 10%, 15%, 20%, 30% i 40% masy całej próbki.</p>			

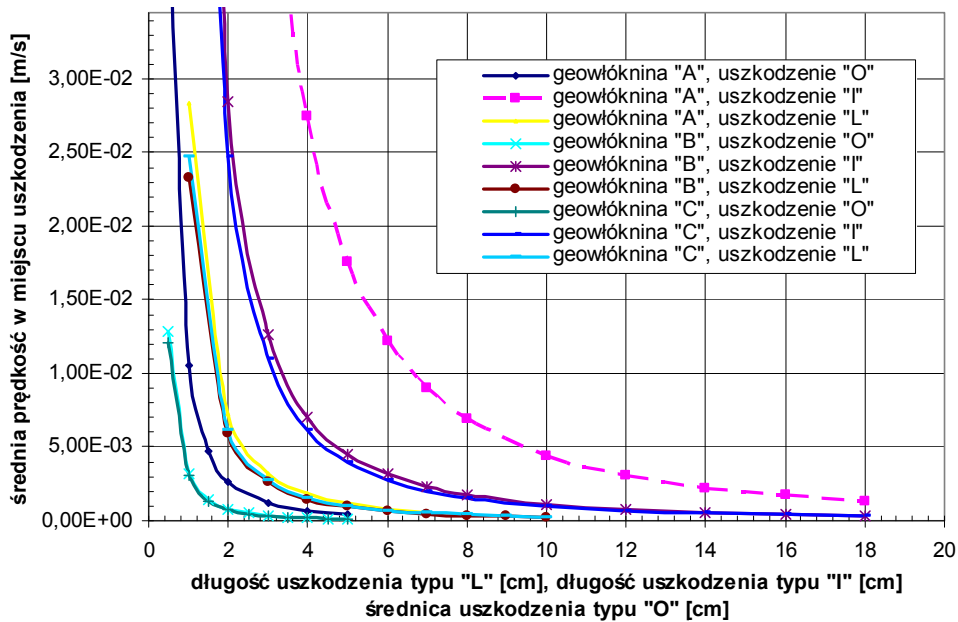
Tab. 3. Przybliżone określenie wewnętrznej stabilności dla gruntów o $U > 5$ [6]

tego rodzaju uszkodzeń filtr może w dalszym ciągu funkcjonować poprawnie, o ile pewien krytyczny rozmiar uszkodzenia nie jest przekroczony. Należy podkreślić, że w badaniach standardowych geowłóknin możemy określić dla danego wyrobu jego odporność na przebicie oraz wymiary uszkodzeń. W przypadku przekroczenia krytycznego rozmiaru uszkodzenia upłynnienie gruntu ma charakter gwałtowny. W uszkodzeniach o mniejszych wymiarach do utraty stabilności w strefie kontaktowej grunt-filtr syntetyczny może dojść w przypadku zwiększenia prędkości filtracji spowodowanej zwiększeniem różnicy wysokości piezometrycznych przed filtrem i za nim (np. w wyniku kolmatacji geowłókniny). Przeprowadzone doświadczenia i analizy [9] pozwoliły na sporządzenie krzywych określających krytyczne rozmiary uszkodzeń geowłóknin w funkcji prędkości filtracji w miejscu uszkodzenia materiału (rys. 4) [9, 11].

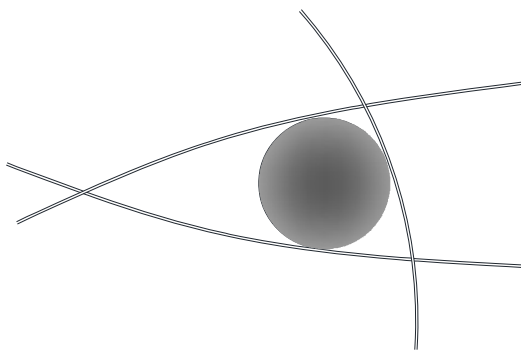
Kryterium porowatości

Nie ma badań, których wyniki wskazywałyby na wymaganą liczbę porów otwartych w geosyntetyku lub wymaganą porowatość. Jedyną w tym względzie wskazówką jest to, iż wiemy, że mineralne filtry gruntowe są skuteczne i efektywne, a ich porowatość jest zawsze rzędu 0,3. Dlatego też rozsądne wydaje się przyjęcie kryterium porowatości również dla filtrów geosyntetycznych $n \geq 0,3$.

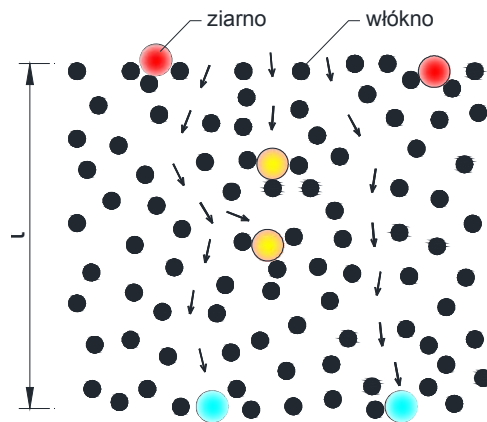
Kryterium porowatości nie zostało formalnie zapisane dla mineralnych filtrów gruntowych, gdyż wszystkie tego rodzaju filtry posiadają w przybliżeniu tę samą porowatość. Jednak dla filtrów geosyntetycznych kryterium porowatości jest istotne z tego względu, iż możliwy zakres ich porowatości jest bardzo szeroki i zawie-



Rys. 4. Zbiorczy wykres prędkości dopuszczalnych



Rys. 5. Przepięcie pomiędzy włóknami



Rys. 6. Przekrój poprzeczny przez geowłókninę

ra się w zakresie od 0,01 dla niektórych geotkanin do 0,92 dla geowłóknin. Wszystkie geowłókniny, nawet w warunkach pod obciążeniem (ściśnięte), spełniają podane wyżej kryterium porowatości, lecz geotkaniny o porowatości $n < 0,3$ (w szczególnych przypadkach 0,2) nie powinny być stosowane.

Liczba przepięć

Kolejnym istotnym parametrem różniącym mineralne filtry gruntowe od filtrów geosyntetycznych jest ich grubość. Wymagana grubość filtrów geotekstylnych może być wyrażona w odniesieniu do liczby przepięć (ang. *constrictions*), definiowanych jako przejście (prześwit) pomiędzy włóknami (rys. 5) [4].

Ziarno gruntu, które pod wpływem przepływającej wody porusza się przez filtr, przemieszcza się od jednego zwężenia do kolejnego, wzdłuż drogi filtracji, której kierunek jest w przybliżeniu prostopadły do płaszczyzny filtru (filtracja w kierunku normalnym do płaszczyzny geosyntetyku). Ziarno to w zależności od rozmiarów przepięć, jakie napotka na swojej drodze filtracji (rys. 6), może przepłynąć przez geosyntetyk (kolor błękitny), zatrzymać się na przepięciu między jego włóknami (kolor żółty) lub na powierzchni materiału (kolor czerwony).

Średnia liczba przepięć w geowłókninie wytwarzanej w procesie igłowania określona może być ze wzoru Giroud [4]:

$$N = \frac{\mu}{\rho \cdot d \sqrt{1-n}}$$

gdzie:

- N - liczba przepięć,
- μ - masa powierzchniowa geowłókniny,
- d - średnica włókna,
- ρ - gęstość włókien,
- n - porowatość.

Badania wskazują, że optymalny zakres liczby przepięć powinien zawierać się w przedziale 25 ÷ 30. Poniżej 25 przepięć rozmiar otworu nie jest wiarygodny, gdyż może zależeć od niewielkich zmian grubości geowłókniny. Z kolei gdy liczba przepięć wynosi powyżej 30, wzrasta ryzyko uwięzienia ziarna gruntu wewnątrz filtru geotekstylnego, a tym samym jego kolmatacji.

Kolmatacja chemiczna

Powyższe rozważania związane były z analizą cech geometrycznych uziarnienia gruntu i wymiarów porów geosyntetyków, i w związku z tym dotyczyły w głównej mierze zabezpieczenia ▶

Ryzyko kolmatacji ochrą	Zawartość żelaza Fe ²⁺ oznaczona metodą pasków
bardzo duże	> 25
duże	10-25
umiarkowane	5-10
małe	1-5
pomijalne	< 1

Tab. 4. Możliwość kolmatacji ochrą na podstawie zawartości żelaza Fe²⁺ [6]

► przed kolmatacją mechaniczną. Osobnym problemem jest zachowanie sprawności odwodnień w kontakcie z wodą gruntową z zawartością żelaza. W tym przypadku dochodzić może do kolmatacji szczelin drenażu w wyniku osadzania się wodorotlenku żelaza wytrąconego z wody gruntowej. Efektem tego rodzaju kolmatacji jest powstanie w przewodach drenarskich, studniach i obsypce galaretowatej substancji o kolorze zależnym od złóż ochry, przez które przepływa woda – najczęściej żółtym lub czerwonym. Substancja ta ma postać nitkowatą, uwodnioną (ponad 90% wody), a jej sucha masa charakteryzuje się wysoką zawartością żelaza (do 65% suchej masy). Czynnikiem sprzyjającym wytrącaniu się osadów żelaza z wody gruntowej jest zmiana warunków przepływu wody wokół drenażu, jak również obecność tlenu, np. z powietrza w rurach drenażowych. Problem zatykania szczelin filtru jest powszechnie znany i dotyczy nie tylko systemów odwadniających, w tym drenaży lub zbiorników retencyjno-wsiąkowych, ale także studni ujmujących wodę z warstw wodonośnych [13].

Rozpuszczone żelazo Fe²⁺ w wodzie gruntowej wpływa do innego środowiska, jakim są rura drenarska i warstwy filtracyjne wokół rury (obsypka i geowłóknina). Jeśli w obszarze tym zapewniona jest obecność tlenu, nitkowate i pałeczkowate bakterie (*Thiobacillus ferrooxidans*) spowodują wytrącenie części Fe²⁺ zawartego w wodzie do nierozpuszczalnego Fe³⁺. Bakterie wytrącające żelazo muszą być obecne, aby mogła wystąpić rozległa kolmatacja filtrów, nawet jeśli inne warunki są właściwe dla zapobieżenia wytrącania żelaza z wody gruntowej [6].

Możliwe jest oszacowanie zagrożenia ochrą przed zainstalowaniem drenażu, jak również oszacowanie, czy określone rodzaje gruntów mogą być uznane za potencjalnie niebezpieczne [3]. Analiza gruntów pod kątem całkowitej zawartości żelaza nie ma żadnej wartości, ponieważ nie wykaże to rozpuszczalnego żelaza Fe²⁺ lub złożonych interakcji pomiędzy pH gruntu i jego rodzajem, choć jak zauważono, w gruntach o odczynie zasadowym kolmatacja ochrą nie występuje. Zawartość jonów żelaza Fe²⁺ rozpuszczonego w wodzie gruntowej jest wiarygodnym wskaźnikiem możliwości kolmatacji ochrą. Najprostszym sposobem na określenie zawartości rozpuszczonych jonów żelaza Fe²⁺ w wodach podziemnych jest używanie pasków papieru lakmusowego, które zanurzane są w próbce wody gruntowej. Zabarwienie pasków papieru może być wykorzystane do oceny stężenia żelaza dwuwartościowego. Stężenia te oznaczone są kolorami w następujących zakresach: 2, 5, 10, 25, 50 i 100 mg Fe²⁺/dm³.

Nie ma ekonomicznie uzasadnionych, długotrwałych i skutecznych metod kontrolowania procesu kolmatacji ochrą systemów drenażowych. W celu ograniczenia skutków kolmatacji można jednak wykorzystać poniższe wskazówki.

Geowłóknina	Czynna powierzchnia próbki	Indeks prędkości	Przepływ przez próbkę	Przepływ odniesiony do 1 m ²
	A [cm ²]	V _{H50} [cm/s]	Q _{H50} [cm ³ /s]	Q _{H50} [l/sm ²]
Kolincz	19,6	0,14	2,7	1,3
„nowa”	19,6	5,14	100,8	51,4

Tab. 5. Wyniki badań wodoprzepuszczalności geowłókniny Kolincz

Uwagi: 1. Indeks H50 oznacza odniesienie danej wartości do różnicy ciśnień po obu stronach geosyntetyku równej 50 mm słupa wody; 2. Wszystkie parametry przepływu podane w tabeli wyznaczono z uwzględnieniem korekty temperatur R_T.

Obecność tlenu. Należy ograniczyć kontakt wody gruntowej z tlenem zawartym w powietrzu w obrębie drenażu, gdyż obecność tlenu sprzyja rozwojowi ochry.

Perforacja rur drenażowych. Drugim czynnikiem jest wielkość perforacji w rurach drenażowych. Im większe perforacje rur, tym dłuższy okres skutecznej pracy drenażu. Ochrą przylega do postrzępionych krawędzi perforacji rury drenażowej, stąd czysto i dokładnie wycięte otwory perforacji są niezbędne dla długookresowego funkcjonowania drenażu. Ponadto małe perforacje ograniczają możliwość skutecznego czyszczenia rur drenażowych w osłonie z materiałów syntetycznych strumieniem wody pod ciśnieniem.

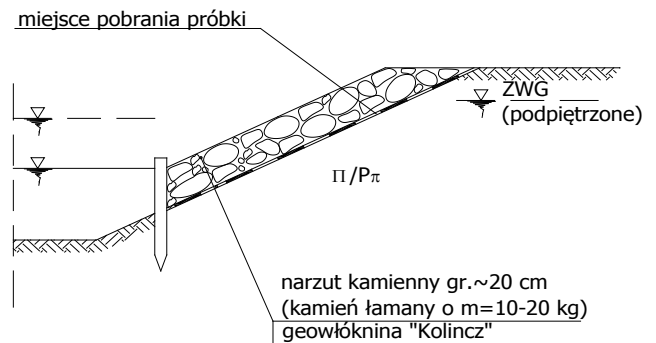
Obsypki drenażowe. Przyjmuje się, że frakcjonowane obsypki żwirowe są w tych warunkach najlepsze, choć również tego rodzaju obsypka może ulec kolmatacji przy szczególnie dużym stężeniu żelaza rozpuszczonego w wodzie gruntowej. Stosunkowo cienka osłona drenażu z geowłókniny stwarza największe ryzyko kolmatacji filtru. Doświadczenia holenderskie [6] wskazują, że ochra występuje najpierw w szczelinach i zagłębieniach rury drenarskiej, a następnie zatyka pory geowłókniny. Spośród geosyntetycznych osłon rur drenażowych materiały dziane poliestrowe są najmniej podatne na tego rodzaju kolmatację.

Organiczne obsypki drenażu. Obsypki wykonane z trocin sosny, dębu i cyprysu opóźniły rozwój ochry w otworach rur drenażowych, wydłużając tym samym okres sprawności drenażu [6]. Dzieje się tak dlatego, że trociny zawierają związki aromatyczne, tworzą środowisko beztlenowe i wydają się toksyczne dla bakterii ochry. Unikać należy za to obsypki drewna wykonanych z torfu i innych materiałów organicznych, gdyż zakwaszają środowisko, powodując rozwój ochry i zwiększając tym samym możliwość kolmatacji drewna.

Zatopiony wylot drewna. Zatopiony odpływ wód podziemnych z wysokim ryzykiem ochry zapobiec może wytrącaniu się rozpuszczonego żelaza (Fe²⁺), jednak aby sposób ten był skuteczny, drenaż wraz z wylotem musi być położony na całej swej długości **stale** poniżej zwierciadła wody. Wymóg ten wiąże się z koniecznością budowy głębokich drenów ułożonych poziomo lub z minimalnymi spadkami podłużnymi.

Przykłady uszkodzeń filtrów geotekstylnych spowodowanych kolmatacją

Przedstawiono tu przykłady filtrów geotekstylnych, które w wyniku procesów kolmatacji mechanicznej, biologicznej lub chemicznej utraciły swoje podstawowe cechy hydrauliczne.



Rys. 7. Umocnienie brzegu narzutem kamiennym – schemat istniejącej konstrukcji



Rys. 8. Kolmatacja geowłókniny pyłem i korzeniami roślin

Przykład kolmatacji mechaniczno-biologicznej

W przedstawionym tu przykładzie geowłóknina położona jest na skarpie pod warstwą narzutu kamiennego, pełniąc funkcję separacyjną dla narzutu oraz rolę filtru między podłożem a warstwą narzutu (rys. 7). Wykonana na miejscu, i ponownie w laboratorium, ocena makroskopowa pozwoliła stwierdzić, że geowłóknina w okresie eksploatacji (5 lat) zakolmatowała się drobnoziarnistym gruntem (pyłem) o barwie brązowej oraz uległa silnemu przerosnięciu korzeniami roślin (rys. 8).

W celu oceny stopnia kolmatacji geowłókniny przeprowadzono standardowe badanie wodoprzepuszczalności w kierunku normalnym do płaszczyzny geosyntetyku. Doświadczenia przeprowadzono na próbkach materiału o średnicy 50 mm w zakresie różnicy ciśnienia po obu stronach próbki $\Delta h = 10 \text{ mm} \div 210 \text{ mm}$ słupa wody. Na podstawie otrzymanych danych, z uwzględnieniem temperaturowego współczynnika korekcyjnego R_p , obliczono indeks prędkości VI_{H50} wyrażony w cm/s oraz wskaźnik przepływu QI w odniesieniu do jednostkowej powierzchni materiału wyrażony w l/sm². Oba wskaźniki obliczono przy różnicy ciśnienia po obu stronach próbki wynoszącej $\Delta h = 50 \text{ mm}$.

W celach porównawczych przeprowadzono również badanie z zastosowaniem identycznej procedury do „nowej” (czystej) geowłókniny filtracyjnej, o zbliżonej grubości i masie powierzchniowej do badanej geowłókniny. Otrzymane wyniki w pełni potwierdzają wcześniejszą tezę o kolmatacji, bowiem geowłóknina pobrana do badań spod warstwy narzutu kamiennego ma blisko **40-krotnie** mniejszą przepuszczalność od geowłókniny „nowej”. Charakterystyczne wyniki badań wodoprzepuszczalności w kierunku normalnym do powierzchni materiału zestawiono w tab. 5.

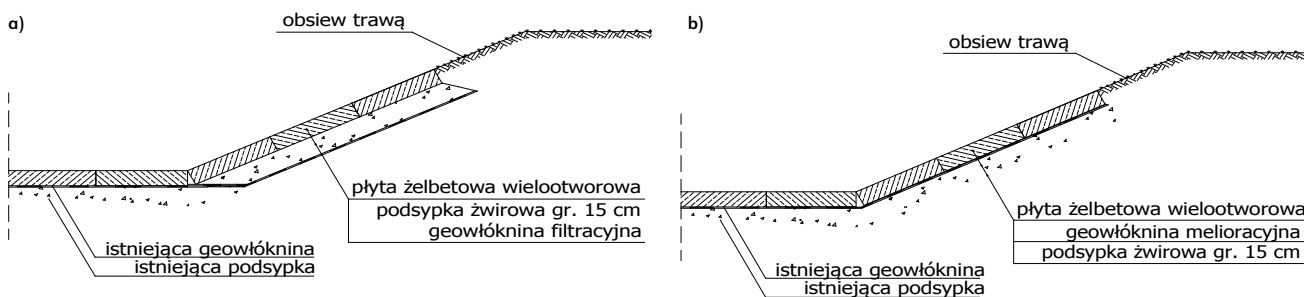
Na podobne procesy kolmatacji, zwłaszcza mechanicznej, frakcjami pylastymi narażone są geowłókniny umieszczone na dnie i skarpach zbiorników retencyjno-wsiąkowych lub komór rozszczajających. Owe komory lub zbiorniki, przejmując wody opadowe z dróg i autostrad, przejmują równocześnie pyły i osady z dróg, które, gromadząc się w zbiorniku, powodują stopniowe doszczelnienie jego czaszy.

Przykład kolmatacji mechaniczno-chemicznej

Geowłókninę mającą pełnić funkcję separacyjno-filtracyjną w umocnieniu skarpu kanału i stawu ułożono bezpośrednio pod ▶

Geowłóknina	Masa powierzchniowa	Czynna powierzchnia próbki	Indeks prędkości	Przepływ przez próbkę	Przepływ odniesiony do 1 m ²
	$m_a \text{ [g/m}^2\text{]}$	$A \text{ [cm}^2\text{]}$	$VI_{H50} \text{ [cm/s]}$	$Q_{H50} \text{ [cm}^3\text{/s]}$	$Q_{H50} \text{ [l/sm}^2\text{]}$
Młynówka 1	591	19,6	0,21	2,03	1,04
Młynówka 2	281	19,6	3,95	36,70	18,72

Tab. 6. Parametry filtracyjne geowłókniny Młynówka



Rys. 9. Prawidłowe (a) i nieprawidłowe (b) ułożenie geowłókniny na skarpie pod płytą typu IOMB

► wielootworową płytą betonową (rys. 9b). Ułożenie takie sprawia, że geowłóknina pracuje jedynie w miejscach perforacji płyty (a nie na całej powierzchni), a wywołana w ten sposób koncentracja przepływu tworzy dogodne warunki do wystąpienia kolmatacji. Dodatkowo w przypadku żelazistych wód gruntowych żelazo odkłada się w postaci tlenku żelaza na geowłókninie mającej bezpośredni kontakt z powietrzem, powodując powstanie dość szczelnej membrany. Ułożenie geowłókniny bez zabezpieczającej warstwy gruntu stwarza też korzystne warunki do rozrostu sieci korzeni roślinności. W omawianym przypadku efektem zachodzących zjawisk było znaczne utrudnienie spływu wód gruntowych i powstanie zabagnienia na przyległym terenie (rys. 10).

W wyniku nieprawidłowego doboru i wbudowania geowłókniny w konstrukcję umocnienia już po 2 latach konieczne było przeprowadzenie remontu polegającego na zdjęciu płyt, podsypki, wymianie geowłókniny i ułożeniu nowej w sposób pozwalający na pracę w optymalnych warunkach.

W celu oceny stopnia kolmatacji geowłókniny przeprowadzono badania przepuszczalności w kierunku normalnym do płaszczyzny materiału w warunkach bez obciążenia geosyntetyku. W tab. 6 zestawiono parametry filtracyjne geowłókniny otrzymane z badań próbek pobranych z materiału po 2 latach eksploatacji. Otrzymane rezultaty jednoznacznie wskazują na kolmatację materiału, gdyż jego wodoprzepuszczalność jest około 20 razy mniejsza w porównaniu do wartości dla materiału nowego.

Przykład kolmatacji chemicznej

Instalację drenażową wykonano w tym przypadku z rur ceramicznych DN 300 mm w obsypce żwirowej w osłonie z geowłókniny. Na trasie drenażu zainstalowano betonowe studnie kontrolne DN 1200 mm. W okresie eksploatacji drenaż ten ulegał stopniowej kolmatacji w wyniku odkładania się związków żelaza wytrąconego z wody gruntowej. Doprowadziło to do sytuacji wzrostu poziomu wody gruntowej, tak że piezometr znajdujący się w odległości zalewie 1 m od drenażu wskazywał położenie zwierciadła wody gruntowej na wysokości 2 m powyżej drenażu. Inspekcja drenażu wykazała kolmatację rur drenarskich oraz odkładanie się galaretowatych związków żelaza w studniach (rys. 11). Jedną ze studni posadowiono bezpośrednio na geowłókninie (bez korka). Geowłóknina ta uległa kolmatacji, a działające od spodu ciśnienie wody, napotykać na półprzepuszczalną geowłókninę, spowodowało jej wybrzuszenie. Podczas przeglądu studni geowłóknina ta uległa rozdarciu, co spowodowało gwałtowny wypływ mieszaniny wodno-gruntowej i upłynnienie podłoża pod



Rys. 10. Zabagnienie terenu przyległego do rowu i spływające do niego żelaziste wody gruntowe

studnią (rys. 12). Szybka reakcja polegająca na ułożeniu na dnie studni gałęzi jałowca, geowłókniny i dociążeniu jej kamieniami powstrzymały proces wnoszenia gruntu spod studni.

Wnioski

Odpowiedni dobór geosyntetycznych materiałów filtracyjnych powinien w każdym przypadku (nawet w przypadku konstrukcji mniej odpowiedzialnych) opierać się na analizie możliwych zagrożeń wynikających z zastosowania danego materiału w danych warunkach wodno-gruntowych. W szczególności należy zwrócić uwagę na ryzyko wystąpienia kolmatacji wewnętrznej materiału. Podjęcie decyzji dotyczącej doboru geosyntetycznego materiału filtracyjnego bez przeprowadzenia analizy jego pracy w konstrukcji w większości przypadków musi spowodować jego dysfunkcję.

Szczególnie niebezpiecznym dla drenażu zjawiskiem jest kolmatacja związana z procesem wytrącania się związków żelaza utlenionych do postaci trójwartościowej. Wytrącanie to, zmniejszając porowatość środowiska przepływu wód, zmniejsza współczynnik filtracji. Proces wytrącania następuje w strefie kontaktu wód podziemnych z powietrzem. Strefą kontaktu jest strefa „przejścia” wody podziemnej z naturalnej warstwy wodonośnej do warstwy o odmiennych warunkach filtracji, jakie występują w narzucie kamiennych lub obsypce, a następnie rurze drenażu. Utlenianie to występuje w obecności tlenu z powietrza, a więc w strefie kontaktu wód podziemnych z drenem. W przypadku rur drenażu częściowo wypełnionych wodą powietrze dostaje się do całej instalacji drenażowej, co sprzyja utlenianiu żelaza na jego powierzchni.

Kolmatacja sprawia, że okres właściwego funkcjonowania drenażu skraca się do kilkunastu lub nawet kilku lat. Prowadzi



Rys. 11. Galaretowata postać żelaza wytrąconego z wody gruntowej w rurze drenarskiej (z lewej) i na dnie studni (z prawej)

to do wzrostu ciśnień i gradientów filtracyjnych, które z kolei zainicjują mogą zjawiska sufozyjne. Zebrane doświadczenia wskazują, iż w przypadkach, gdzie дренаże odprowadzają zażelazione wody gruntowe lub gdy дренаże układane są w gruntach pylastych, należy rezygnować ze stosowania geowłóknin na rzecz klasycznych filtrów odwrotnych, układanych wokół właściwej warstwy drenazowej.

Nie istnieje ekonomicznie uzasadniona i skuteczna w długim czasie metoda kontrolowania procesu kolmatacji drenu związkami żelaza wytrącanymi z wody gruntowej. Przyjmuje się, że wielowarstwowy filtr gruntowy jest najskuteczniejszym sposobem wydłużenia okresu sprawności drenazu, jakkolwiek również taki filtr może ulec kolmatacji w warunkach przepływu wody bogatej w związki żelaza, podczas gdy stosunkowo cienkie filtry geotekstylne stwarzają największe ryzyko dysfunkcji w wyniku kolmatacji chemicznej [6].

Przedstawione przykłady systemów drenazowych wskazują na poważne problemy z utrzymaniem sprawności drenażu w warunkach występowania żelaza w wodzie gruntowej. W warunkach takich, określając sposób wykonania odwodnienia, należy unikać stosowania geowłóknin oraz przyjmować rozwiązania, które zapewnią eliminację przyczyn kolmatacji. Jednym z możliwych w tym zakresie rozwiązań jest umieszczanie filtrów w strefie, gdzie wykluczony jest dostęp powietrza (filtry są całkowicie zatopione), np. jako systemu pionowych studni odciążających, działających na samowypływ, lub lewarowych, w którym ryzyko wystąpienia kolmatacji chemicznej tlenkiem żelaza byłoby zminimalizowane, a tym samym okres bezawaryjnego funkcjonowania drenazu zostałby wydłużony. □

Piśmiennictwo

1. ASTM Designation: D 5101-90: *Standard Test Method for Measuring the Soil-Geotextile System Clogging Potential by the Gradient Ratio*.
2. *Engineering Use of Geotextiles. Technical Manual*. US Army Corps of Engineers, Departments of the Army and the Air Force, 1995.
3. Ford H.W.: *Estimating the potential for ochre clogging before installing drains*. Transactions ASAE 25, 6: 1597-1600, 1982.
4. Giroud J.P.: *Geosynthetic and Granular Filters*. IGS, Warsaw 2007.
5. Haliburton T.A., Wood P.D.: *Evaluation of the U.S. Army Corps of Engineers Gradient Ratio Test for Geotextile Performance*. Proceedings of Second International Conference on Geotextiles. Las Vegas, Nevada 1982, p. 97-101.



Rys. 12. Studnia z zakolmatowaną geowłókniną: a) stan zastany, b) wypływ wody przez rozdarcie, c) upłynięcie podłoża pod studnią, d) doraźne zabezpieczenie przed wynoszeniem podłoża

6. Stuyt L.C.P.M., Dierickx W., Martinez Beltran J.: *Materials for subsurface land drainage systems*. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Irrigation and drainage paper, 60 rev. 1, 2005.
7. Pilarczyk K.W., Breteler M.K.: *Geotextiles in revetment structures - A Dutch approach*. Filters and Drainage in Geotechnical and Environmental Engineering The Third Int. Conf. Geofilters 2000, Balkema 2000.
8. Pilarczyk K.W.: *Projektowanie umocnień brzegowych (Design of revetments)*. Materiały sympozjum Hydrotechnika V'2003, Ustroń 2003.
9. Sterpejkowicz-Wersocki W.: *Kryteria oceny stabilności strefy kontaktowej grunt-filtr syntetyczny w warunkach zmiennych stanów wód*. Rozprawa doktorska, Politechnika Gdańska, Wydział Inżynierii Lądowej i Srodowiska, Gdańsk 2007.
10. Sterpejkowicz-Wersocki W., Szudek W.: *Zabezpieczenie przed sufozją zapory w Smukale*. Hydrotechnika X'2008, sympozjum ogólnokrajowe, Ustroń, 13-15 maja 2008 r.
11. Sterpejkowicz-Wersocki W., Bolt A.: *Stabilność strefy kontaktowej grunt-filtr syntetyczny*. „Inżynieria Morska i Geotechnika”, r. 28, nr 5 (2007), s. 281-291.
12. Wojtasik D.: *Ocena przydatności geowłókniny jako warstwy filtracyjnej w kontakcie z gruntami sufozijnymi*. Materiały Konferencji Naukowo-Technicznej „Geosyntetyki i tworzywa sztuczne w geotechnice i budownictwie inżynierskim”, Częstochowa 11-13.05.2006, PZITB, 2006.
13. van Beek C.G.E.M. (Kees): *Cause and prevention of dogging of wells abstracting groundwater from unconsolidated aquifers*. IWA Publishing, 2012.