Zasady projektowania geosyntetycznych powłok stosowanych jako zabezpieczenia przeciwpowodziowe

Dr inż. Krystyna Kazimierowicz-Frankowska
Instytut Budownictwa Wodnego PAN w Gdańsku

W Polsce istotnym problemem są zjawiska ekstremalne związane z wodą – przede wszystkim powodzie. Powodziami nazywamy takie wezbrania wody, podczas których woda po przekroczeniu stanu brzegowego lub poziomu korony wałów ochronnych zalewa doliny rzeczne lub tereny depresyjne, a przez to powoduje zniszczenia i straty. Ze względu na to, że powódź jest zjawiskiem losowym, nie ma możliwości ścisłego określenia jej czasu, miejsca występowania oraz wielkości. W ciągu ostatnich 60 lat zjawisko powodzi wystąpiło w Polsce około 600 razy. Szczególnie dotkliwe były straty, które poniesiono w 1997r. w wyniku powodzi nazywanej już *powodzią tysiąclecia*. Wtedy to niemal cała południowa część kraju została zalana. Obszary dotknięte powodzią objęły: dopływy Odry, dorzecze Nysy Łużyckiej, dorzecze i dopływy Wisły. Zginęło 55 osób. Zanotowano wiele znacznych zniszczeń w budynkach i infrastrukturze drogowej, a straty materialne szacowane były na 12 mld złotych. Po tej powodzi w mediach i przestrzeni publicznej coraz częściej zaczęto mówić o konieczności opracowania skutecznych rozwiązań ochrony przeciwpowodziowej, w tym o konieczności budowy i odbudowy stałych elementów tego systemu, takich jak wały przeciwpowodziowe oraz konieczności opracowania rozwiązań awaryjnych, których zadaniem byłoby krótkotrwałe zabezpieczenie wybranych obiektów lub terenów przed skutkami przejścia fali powodziowej.

Skuteczna ochrona przeciwpowodziowa zagrożonych terenów połączona z optymalizacją kosztów to kierunek, który stał się już faktem. Jedną z form praktycznej realizacji tej strategii jest wykorzystywanie nowych materiałów i rozwiązań konstrukcyjnych w celu budowy stałych i tymczasowych elementów systemu ochrony przed powodzią.

Celem niniejszego artykułu jest przedstawienie zakresu i zasad obliczeń, które należy wykonać w trakcie projektowania zabezpieczeń przeciwpowodziowych złożonych z powłok geosyntetycznych.

Geosyntetyki wykorzystuje się w budownictwie hydrotechnicznym coraz częściej, gdyż budowa konstrukcji przy ich udziale charakteryzuje się kilkoma wspólnymi cechami, do których można zaliczyć:

1) łatwość i szybkość wykonania,
2) brak konieczności tworzenia wielkich placów budów,
3) możliwość efektywnego łączenia wykorzystania geosyntetyków z materiałami tradycyjnie stosowanymi w budownictwie hydrotechnicznym;
4) proekologiczny charakter budowli wzniesionych przy wykorzystaniu geosyntetyków;
5) są to konstrukcje łatwo rozbieralne, które w razie zaistnienia takiej potrzeby można usunąć niskim nakładem kosztów.

Geosyntetyczne powłoki są wykorzystywane w budownictwie hydrotechnicznym od lat osiemdziesiątych ubiegłego wieku. Do tej pory nie opracowano jednak jednolitych zasad ich projektowania. W chwili obecnej większość obliczeń jest wykonywana za pomocą komercyjnego oprogramowania dostępnego na rynku od połowy lat dziewięćdziesiątych ubiegłego wieku [13]. Ze względu na rosnącą popularność rozwiązań wykorzystujących powłoki geosyntetyczne należałoby zmienić ten stan rzeczy w budownictwie hydrotechnicznym. Na brak ogólnie obowiązujących metod obliczeń tych konstrukcji narzekają zarówno naukowcy, jak i praktycy, co można było usłyszeć m.in. na odbywającej się w ubiegłym roku w Walencji Piątej Europejskiej Konferencji dotyczącej geosyntetyków (5th European Geosynthetics Congress). Artykuł niniejszy ma na celu zaprezentowanie dostępnych metod projektowych i w zamyśle jego autorki skłonić do szerszej dyskusji na ten temat oraz być może przyczynić się do powstania gremium osób i/lub instytucji, które zajęłyby się profesjonalnym rozwinięciem tego tematu.

GEOSYNTETYCZNE POWŁOKI – CHARAKTERYSTYKA, PODZIAŁ, ZALETY

Geosyntetyczne powłoki wykorzystywane w budownictwie hydrotechnicznym znane są pod nazwą *geokontenerów* i *geotub*. Pierwsze z nich to elementy stosowane do budowy podwodnych konstrukcji ochronnych brzegu morskiego (falochronów, sztucznych raf itd.). Drugie zaś służą do budowy zabezpieczeń znajdujących się powyżej poziomu wody lub umiejscowionych w płytkiej wodzie przybrzeżnej. To więc te elementy (geotuby) są wykorzystywane m.in. do ochrony przeciwpowodziowej. Geotuby są to długie, zamknięte, walcowe powłoki wykonane z geosyntetyku, wyposażone w przynajmniej jeden (zwykle jest ich więcej) tzw. port (w uproszczeniu otwór) umieszczony w górnej ich części i służący do napełniania materiałem wypełniającym (najczęściej piaskiem lub wodą).

Do podstawowych zalet konstrukcji złożonych z geotub można zaliczyć:

1. Korzyści praktyczne związane z możliwością wykorzystania miejscowego materiału do ich wypełnienia, co usprawnia proces realizacji inwestycji i obniża jej koszty;
2. Możliwość indywidualnego doboru wymiarów geotub w zależności od potrzeb. W praktyce można tu operować zmiennością podstawowych wymiarów elementów w zakresie od 20 do prawie 200 m (długość) oraz od 1 do około 10 m (średnica);
3. Geotuby mogą być układane zarówno na lądzie, jak i w wodzie;
4. Materiał geotub charakteryzuje się wysoką wytrzymałością – wykonywane są z bardzo wytrzymałych geosyntetyków charakteryzujących się wytrzymałością na rozciąganie rzędu 80 ÷ 200 kN/m, za pomocą specjalnie opracowanych technik szycia zapewniających wysoką wytrzymałość szwów. Geotuby mogą być wykonane

z geosyntetyków przepuszczalnych lub nieprzepuszczalnych. Elementy najczęściej wykorzystywane do budowy konstrukcji ochronnych brzegu morskiego wykonywane są z geosyntetyków przepuszczalnych (geotkanin, geowłóknin lub geokompozytów, w których zewnętrzną warstwę stanowi geotkanina, a wewnętrzną geowłóknina).

5. Możliwość indywidualnego doboru materiału wypełniającego – geotuby wykorzystywane do ochrony przeciwpowodziowej najczęściej napełnia się piaskiem lub wodą. Rzadziej jako wypełnienie stosuje się inne rodzaje gruntów, zaprawę cementową lub powietrze. Geotuby wypełnione powietrzem lub wodą muszą być wykonane z materiałów nieprzepuszczalnych;
6. Geotuby są odporne na promieniowanie UV, nie ulegające biodegradacji, odporne na uszkodzenia mechaniczne, co w połączeniu z ich wysoką wytrzymałością sprzyja długiemu okresowi eksploatacji;
7. Geotuby są elastyczne – dopasowują się kształtem do podłoża i sąsiednich elementów;
8. Ze względu na swój znaczny ciężar po napełnieniu tworzą masywną i trwałą konstrukcję odporną na erozję.

Geosyntetyczne powłoki stosuje się zarówno do budowy wałów przeciwpowodziowych, jak i jako elementy tymczasowych systemów ochronnych wykorzystywanych w sytuacjach awaryjnych. W pierwszym przypadku sięgnięto po nie, aby wyeliminować część niedogodności związanych z tradycyjną technologią budowy wałów przeciwpowodziowych i ich remontów. Należy do nich zaliczyć: przemieszczanie dużych mas ziemnych oraz ich wbudowywanie w korpus wału, darniowanie i obsiewanie skarp roślinnością oraz konieczność ruchu ciężkiego sprzętu po niestabilnej koronie wału. Tradycyjny proces budowy wałów jest więc kosztowny, długotrwały oraz ingerujący w miejscowe środowisko naturalne. Zastosowanie elastycznych geotub, jako rdzenia przy budowie nowych lub jako skutecznego wzmocnienia przy remoncie istniejących wałów przeciwpowodziowych zmniejsza w znacznym stopniu koszty inwestycji, skraca czas jej realizacji oraz ogranicza zniszczenia środowiska naturalnego.

Geotuby dobrze sprawdzają się również jako elementy używane do budowy prostych, tymczasowych zabezpieczeń przeciwpowodziowych wykorzystywanych w sytuacjach awaryjnych (rys. 1). W takich przypadkach najczęściej stosuje się powłoki wypełnione piaskiem lub wodą, które służą zabezpieczeniu uszkodzeń wałów przeciwpowodziowych lub ochronie miejsc, w których mogą wystąpić największe szkody związane z przejściem fali powodziowej.

PROJEKT ZABEZPIECZENIA ZŁOŻONEGO Z GEOSYNTETYCZNYCH POWŁOK – WYMAGANIA OGÓLNE

Konstrukcje zabezpieczeń przeciwpowodziowych powinny być tak zaprojektowane i wykonane, by:

- ich stateczność ogólna i miejscowa była zachowana oraz nie dochodziło do przekroczenia dopuszczalnych osiadań we wszystkich przewidywanych warunkach, tzn. stanach wody i ich zmianach, obciążenia itp.,
- zapewniały utrzymywanie wymaganej rzędnej korony zabezpieczenia,
- spełniały wymagania ochrony środowiska,
- zapewniały możliwość dotarcia w każdym czasie i we wszystkich warunkach do każdego miejsca w zabezpieczeniu i przeprowadzenie tam czynności przewidzianych w toku akcji przeciwpowodziowej, kontroli stanu budowli, napraw i konserwacji.

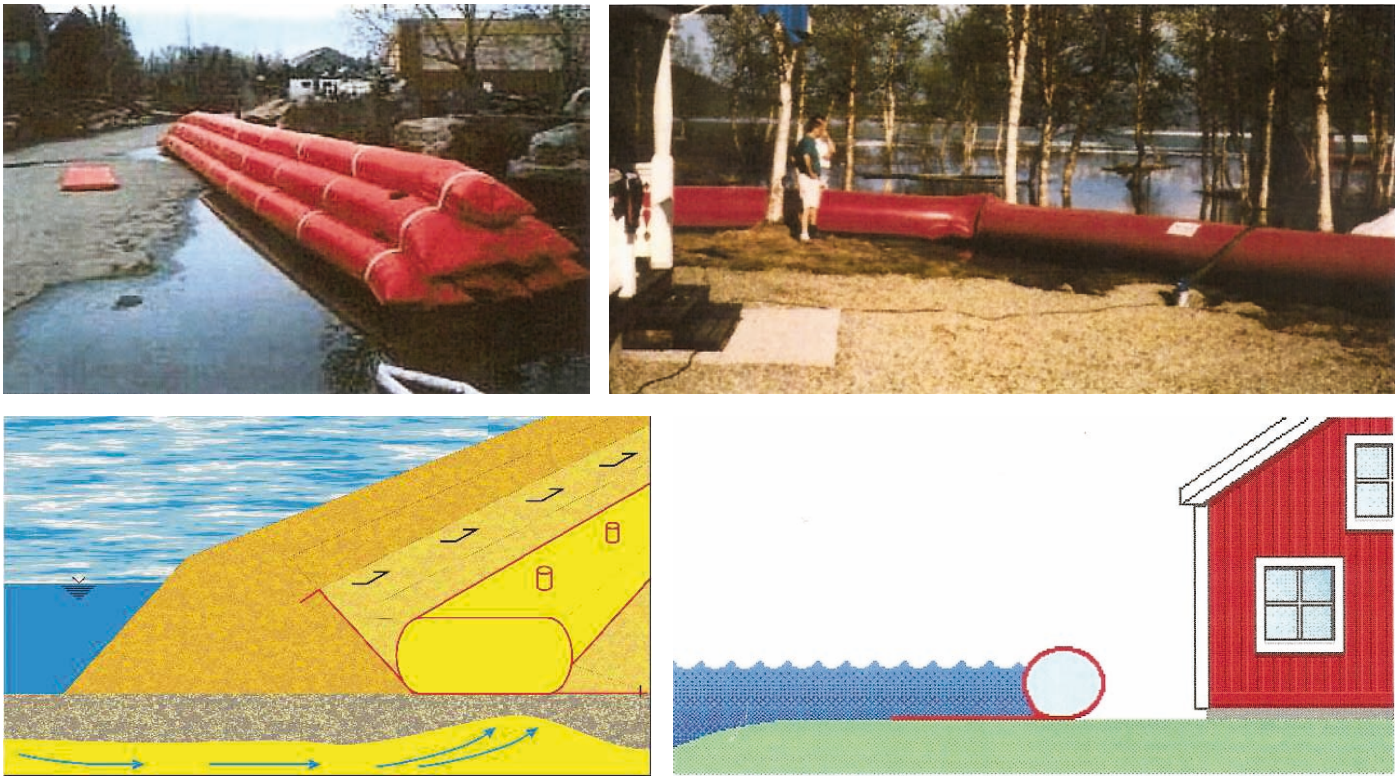
Proces projektowania można podzielić na trzy etapy (por. rys. 2):

1. Zebranie danych wyjściowych do projektowania;
2. Wstępny wybór konstrukcji i parametrów projektowanego zabezpieczenia oraz przeprowadzenie niezbędnych obliczeń w celu sprawdzenia, czy przyjęta geometria umocnienia oraz parametry materiałów spełniają wszystkie wymagania. Jeżeli tak – to można sporządzić projekt zabezpieczenia. Jeżeli nie – to należy przyjąć inne parametry materiałów i/lub geometrię zabezpieczenia i dla nowo przyjętych danych ponownie przeprowadzić niezbędne obliczenia. Czynności te należy powtarzać aż do chwili, gdy wyniki obliczeń potwierdzą poprawność przyjętych danych dotyczących projektowanej konstrukcji;
3. Sporządzenie projektu zabezpieczenia – Projekt zabezpieczenia przeciwpowodziowego złożonego z geosyntetycznych powłok powinien zawierać dane dotyczące (rys. 2):
   - konstrukcji i geometrii zabezpieczenia (długość, średnica, układ powłok użytych do budowy);
   - charakterystyki materiałów użytych do ich wykonania (materiał powłoki i wypełnienie);
   - technologię wykonania zabezpieczenia (w tym dane dotyczące warunków składowania i technologii napełnienia powłok i zalecenia dotyczące stopnia ich wypełnienia).

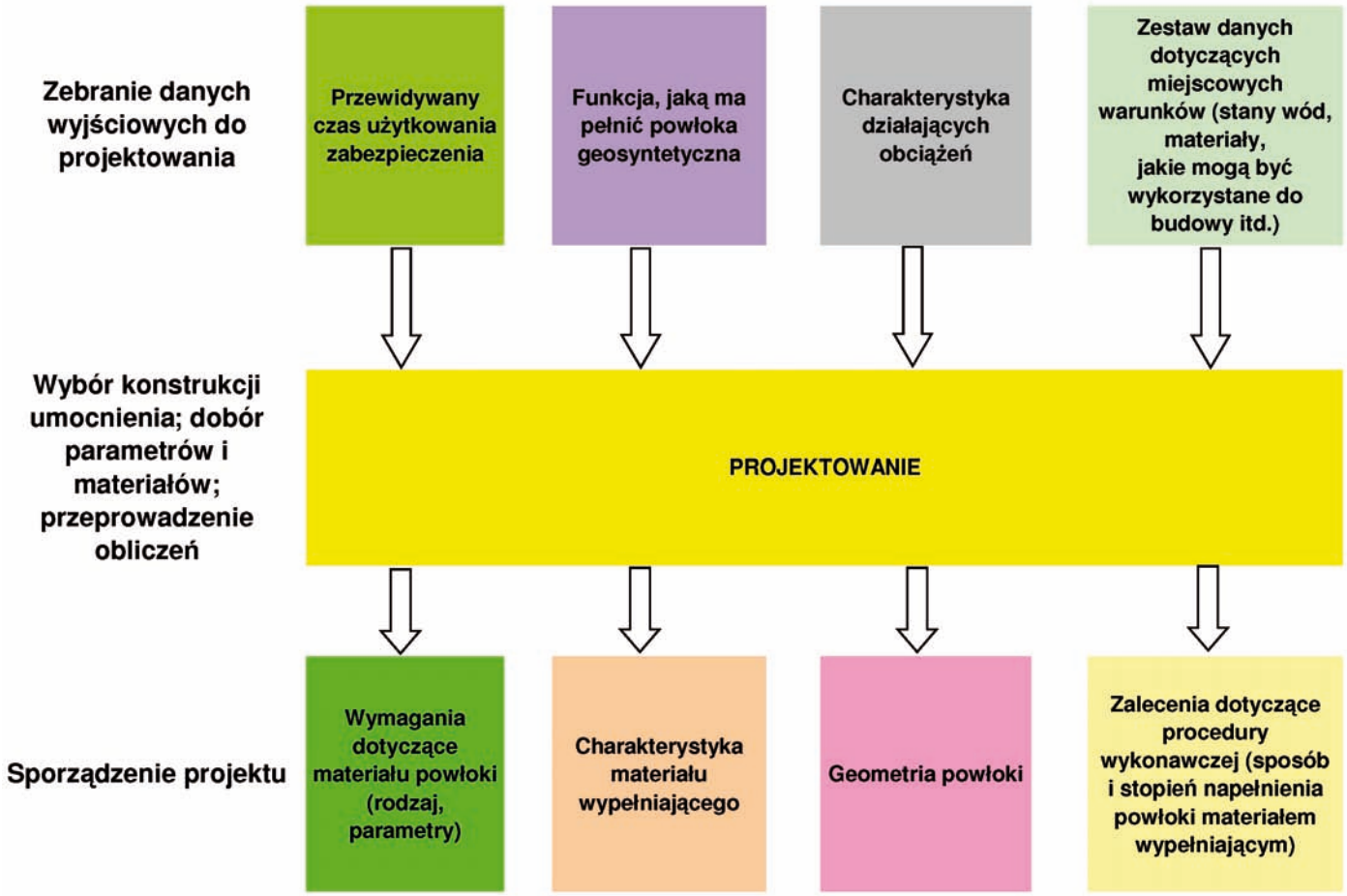
ZASADY DOBORU GEOSYNTETYKÓW WYKORZYSTYWANYCH DO BUDOWY POWŁOK

Ogólne wymagania stawiane geosyntetykom przedstawiono w tabl. 1. Geosyntetyki wykorzystywane do budowy geotub powinna charakteryzować:

- dobra przepuszczalność – w przypadku wypełnienia geotub piaskiem lub innym rodzajem gruntu - która wpływa na szybką konsolidację materiału wypełniającego;
- właściwie dobrana wielkość porów zapewniającą zdolność zatrzymywania cząstek gruntu, nawet w przypadku stosowania jako wypełnienia drobnoziarnistego piasku czy mułu;
- bardzo dobra charakterystyka zależności: siła – odkształcenie;
- duża odporność mechaniczna na ścieranie, przebicie i rozerwanie, która pozwala uniknąć uszkodzeń geosyntetyków podczas wypełniania geotub refulatem, a następnie podczas użytkowania konstrukcji ochronnych z nich wykonanych.



Rys. 1. Przykłady wykorzystania geotub do ochrony przeciwpowodziowej [3, 9]



Rys. 2. Przebieg procesu projektowania

Tabl. 1. Wymagania stawiane geosyntetykom wykorzystywanym do wykonania geotub

Właściwość	Zalecenie
Odporność na promieniowanie UV	Geosyntetyki muszą być zabezpieczone przed niszczącym działaniem promieniowania słonecznego. Materiały użyte do budowy mniejszych geoelementów powinny zachować minimum 50% początkowej wytrzymałości na rozerwanie po 672h ekspozycji na promieniowanie UV, a materiały użyte do budowy dużych elementów – minimum 80% początkowej wytrzymałości.
Odporność na uszkodzenia	Geosyntetyki powinny być odporne zarówno na przypadkowe, jak i celowe uszkodzenia, które mogą wystąpić zarówno w trakcie napełniania geotub, jak i ich eksploatacji. Materiały użyte do budowy powinny charakteryzować się wysoką odpornością na przebicie; powinny być też tak wykonane, by w przypadku miejscowego uszkodzenia móc zatrzymać w obrębie swojej struktury część materiału wypełniającego.
Przepuszczalność	Geosyntetyki powinny charakteryzować się przepuszczalnością zapewniającą odpowiednio szybkie odprowadzenie wody z wnętrza geoelementu. Ich wysoka przepuszczalność wpływa na szybką konsolidację materiału wypełniającego, zapewnia szybkie odprowadzenie wody i napełnienie płaszcza. Przepuszczalne geosyntetyki wykorzystywane do budowy umocnień powinny charakteryzować się minimum dziesięciokrotnie wyższą przepuszczlnością niż materiał użyty do wypełnienia geoelementu.
Wytrzymałość na rozerwanie	Geosyntetyki powinny charakteryzować się wysoką wytrzymałością na rozerwanie, którą oblicza się przy użyciu wzoru: $T_{ult} = T_{obl} \cdot (F_1 \cdot F_2 \cdot F_3 \cdot F_4)$ gdzie: T_{ult} – wymagana wytrzymałość geosyntetyku, T_{obl} – wymgana wytrzymałość geosyntetyku obliczona na podstawie analizy układu sił działających na geoelement, F_1 – współczynnik bezpieczeństwa uwzględniający wpływ uszkodzeń materiału podczas transportu i wbudowywania; zaleca się by $F_{1min} \approx 1{,}3$, F_2 – współczynnik bezpieczeństwa uwzględniający wpływ zmniejszenia nośności na połączeniach i szwach $F_{2min} \approx 2{,}0$; w przypadku braku połączeń równy 1, F_3 – współczynnik bezpieczeństwa uwzględniający wpływ degradacji na skutek działania czynników chemicznych i biologicznych, F_4 – współczynnik bezpieczeństwa uwzględniający wpływ odkształceń pod długotrwałym obciążeniem (pełzania) $F_{4min} \approx 1{,}5$.
Wydłużalność	Zaletą konstrukcji złożonych z geoelementów jest ich podatność, czyli możliwość dostosowania swojego kształtu do kształtu podłoża i sąsiednich elementów. Aby było to możliwe materiały użyte do budowy powinny charakteryzować się wysoką wydłużalnością.
Optymalny wymiar porów	Wielkość porów powinna być tak dobrana, by zapewniać dużą zdolność zatrzymywania cząstek gruntu, nawet w przypadku stosowania miejscowego drobnoziarnistego piasku czy namułu; typowy wymiar porów geosyntetyków używanych do budowy geotub to około 400 mikronów lub mniej.

Wśród najważniejszych parametrów geosyntetyków, jakie trzeba wyznaczyć w trakcie badań laboratoryjnych, należy wymienić: wytrzymałość na rozciąganie, wydłużenie przy maksymalnym obciążeniu, odporność na przebicie dynamiczne i trwałość. Wymaganą wytrzymałość materiału powłoki określa się po przeprowadzeniu niezbędnych obliczeń zgodnie z wzorem zamieszczonym w tabl. 1.

ZAKRES I METODYKA OBLICZEŃ STOSOWANYCH W TRAKCIE PROCESU PROJEKTOWANIA

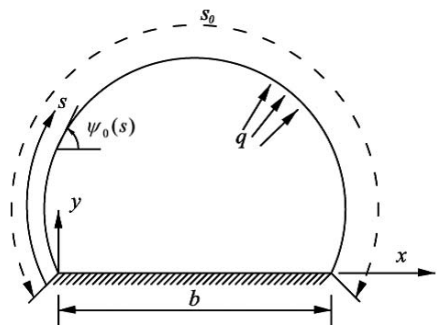
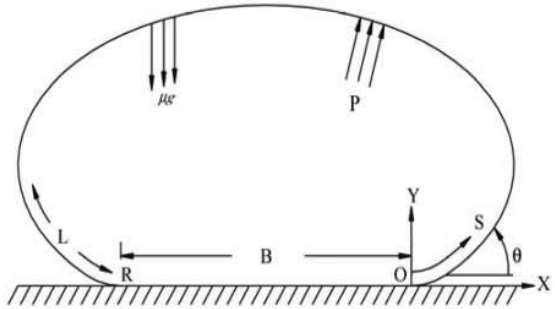
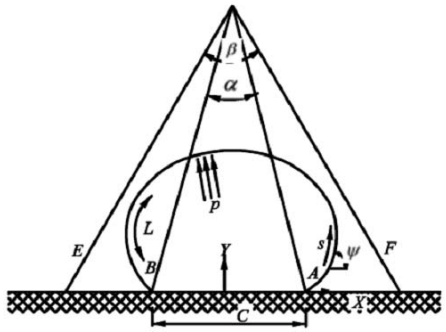
Metody obliczeniowe, które wykorzystuje się w trakcie procesu projektowania w celu określenia kształtu geotub i wymaganej wytrzymałości materiału, z którego mają być wykonane, najczęściej dzieli się na analityczne i numeryczne. Metody analityczne to rozwiązania o najdłuższej tradycji - zaczęto je stosować już w latach siedemdziesiątych ubiegłego wieku [14] i wykorzystuje się je nadal w praktyce, przede wszystkim w trakcie projektowania zabezpieczeń złożonych z pojedynczych geotub. Najbardziej popularne procedury obliczeniowe zestawiono w tabl. 2 ÷ 4. Podzielono je na trzy grupy, w zależności od rodzaju zastosowanych elementów. Zostały one opracowane dla:

- powłok przytwierdzonych do sztywnego podłoża, wykonanych z materiałów nieprzepuszczalnych, które wypełnia się powietrzem lub wodą (tabl. 2),
- geotub wykonanych z materiałów nieprzepuszczalnych, spoczywających na podłożu (tabl. 3),
- geotub wykonanych z geosyntetyków przepuszczalnych, spoczywających na podłożu (tabl. 4),

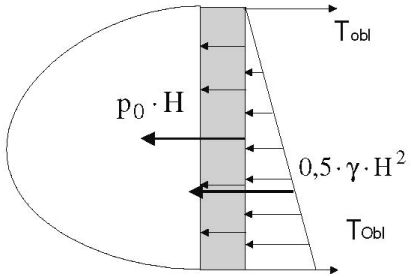
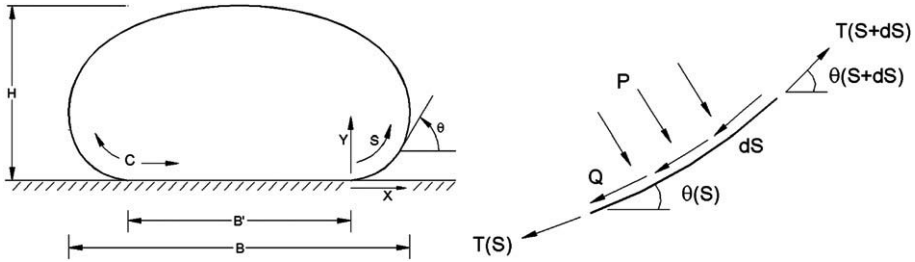
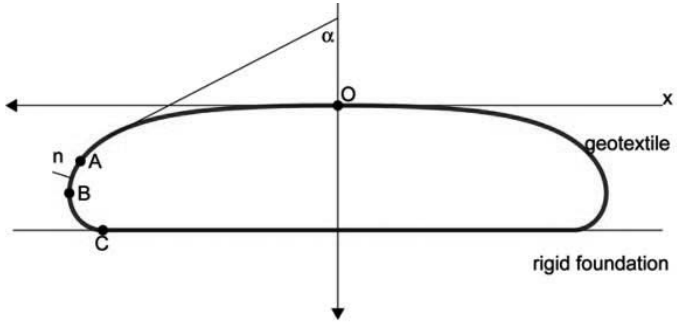
W trakcie opracowywania wymienionych powyżej rozwiązań przyjmowano pewne założenia upraszczające. Do najczęściej stosowanych można zaliczyć:

- przyjęcie płaskiego stanu odkształcenia,
- pominięcie w trakcie obliczeń ciężaru powłoki,
- założenie, że powłoka ma stałą długość i nie wykazuje sztywności na zginanie,
- pominięcie tarcia pomiędzy powłoką i podłożem,
- przyjęcie, że wartość siły rozciągającej w materiale powłoki jest stała wzdłuż obwodu,
- założenie, że materiał wypełniający powłokę jest jednorodny,
- założenie, że proces konsolidacji jest jednokierunkowy (dotyczy powłok wykonanych z materiału przepuszczalnego).

Tabl. 2. Metody analityczne, stosowane w trakcie projektowania geotub przytwierdzonych do sztywnego podłoża

Źródło	Charakterystyka oznaczeń	Sposób obliczania kształtu powłoki i schemat analizowanego układu
Hsieh i Plaut [7, 8]	ψ_0 (s)– kąt pomiędzy osią poziomą i styczną do powłoki x, y – pozioma i pionowa oś współrzędnych T_1 – siła rozciągająca (stała wzdłuż obwodu powłoki) h – wartość wewnętrznego ciśnienia γ – ciężar właściwy materiału wypełniającego	Kształt geotuby określa się, rozwiązując poniższy układ równań: $T_1 \frac{d\psi_0}{ds} = \gamma(y-h)$ $\frac{dx}{ds} = \cos\psi_0, \frac{dy}{ds} = \sin\psi_0$ 
Plaut i Cotton [16]	θ – kąt pomiędzy osią poziomą i styczną do powłoki L – obwód powłoki B – długość odcinka, na którym powłoka styka się z podłożem P – wartość ciśnienia wewnętrznego Q – siła rozciągająca stała wzdłuż obwodu powłoki	Poszukiwany kształt przekroju powłoki uzyskuje się, rozwiązując układ czterech poniżej przedstawionych równań: $\frac{dx_d}{ds} = -\theta_d \sin\theta_e$ $\frac{dy_d}{ds} = -\theta_d \cos\theta_e$ $\frac{d\theta_d}{ds} = \frac{1}{q_e}\left[\varpi^2(x_d \sin\theta_e - y_d \cos\theta_e) - \theta_d \sin\theta_e - q_d \frac{(p+\cos\theta_e)}{q_e}\right]$ $\frac{dq_d}{ds} = -\varpi^2\left[\varpi^2(x_d \cos\theta_e + y_d \sin\theta_e) + \theta_d \cos\theta_e\right]$ $x = X/L \quad y = Y/L \quad q = Q/\mu g L^2 \quad \sigma = S/L \quad \omega = \Omega\sqrt{L/g}$ 
Ghavanloo i Daneshmand [6]	x, y – pozioma i pionowa składowa układu współrzędnych p – wartość ciśnienia wewnętrznego s – obwód powłoki	Kształt powłoki określa się, rozwiązując układ dwóch poniższych równań: $x(s) = \frac{p}{2(\pi-\psi_0)(p+1)}\left[\sin\left(\frac{2(\pi-\psi_0)(p+1)s}{p} + \psi_0\right) - \sin\psi_0\right] + \frac{1}{2(p+1)}$ $y(s) = \frac{p}{2(\pi-\psi_0)(p+1)}\left[\cos\psi_0 - \cos\left(\frac{2(\pi-\psi_0)(p+1)s}{p} + \psi_0\right)\right]$ 

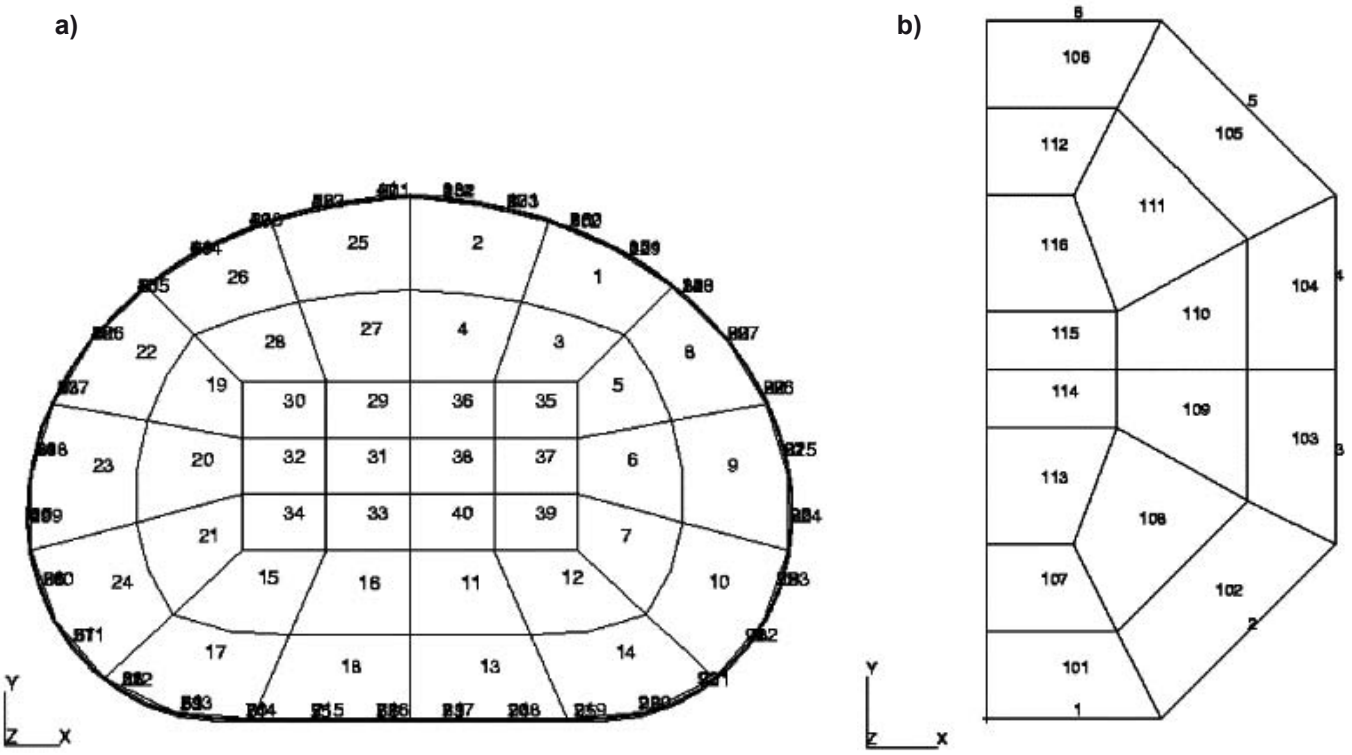
Tabl. 3. Metody analityczne, stosowane w trakcie projektowania geotub wykonanych z nieprzepuszczalnego materiału spoczywających na sztywnym podłożu

Źródło	Charakterystyka oznaczeń	Sposób obliczania kształtu powłoki i schemat analizowanego układu
Kazimierowicz [10], Leschinsky i inni [13]	γ – ciężar właściwy materiału wypełniającego r – promień krzywizny P_r – ciśnienie wewnętrzne	1. $p_0 >> \gamma H$ $r = H/2$ 2. $p_0 \neq 0;\ p_0 = 0$ $\frac{d^2z}{dy^2} = -\frac{p_r}{N_\varphi}\left[1+\left(\frac{dz}{dy}\right)^2\right]^{\frac{3}{2}}$ 
Plaut i Suherman[17]	Q – wartość kąta zdefiniowanego na rysunku obok P – wartość ciśnienia wewnętrznego W – szerokość geotuby H – wysokość geotuby L – obwód geotuby B – długość odcinka, na którym powłoka styka się z podłożem	$\frac{dT}{ds} = Q, T\frac{d\theta}{ds} = P$ $\frac{dx}{ds} = \cos\theta, \frac{dy}{ds} = \sin\theta$ 
Malik [15]	H – siła rozciągająca działająca wzdłuż obwodu powłoki; ρ – gęstość materiału wypełniającego; p – ciśnienie materiału wypełniającego (którym jest woda lub zawiesina wody i piasku) w punkcie 0 (pokazanym na rysunku obok)	$x(\alpha) = -\int^{\alpha} \frac{H\sin\theta d\theta}{\frac{1}{2}\left(p^2 + 2g\rho H(1+\sin\theta)\right)^{\frac{1}{2}}}$ $y(\alpha) = \int^{\alpha} \frac{H\cos\theta d\theta}{\frac{1}{2}\left(p^2 + 2g\rho H(1+\sin\theta)\right)^{\frac{1}{2}}}$ 

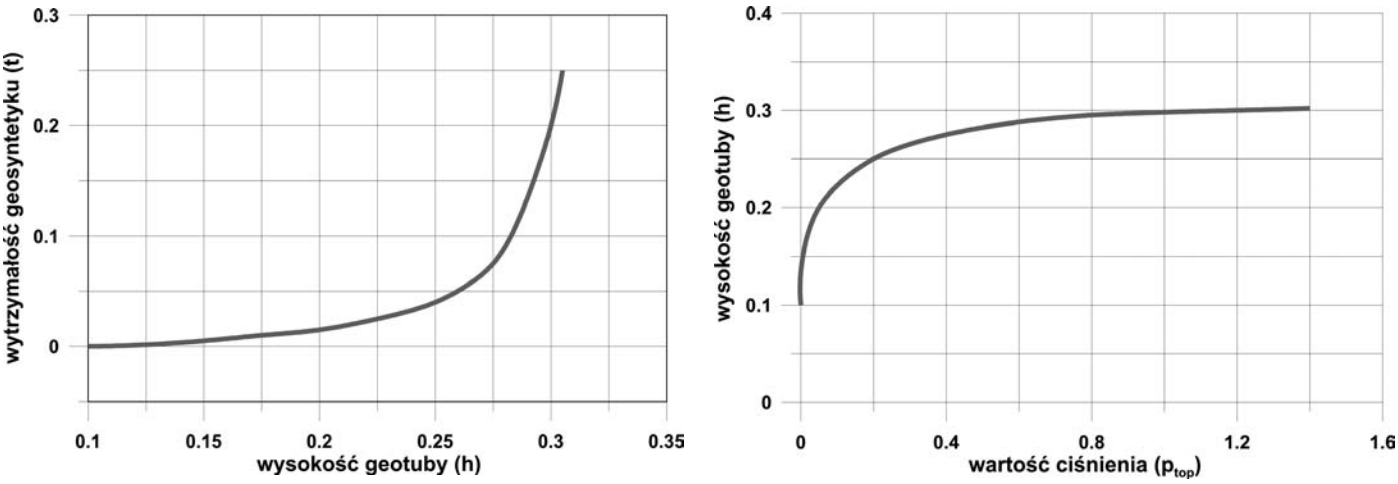
Tabl. 4. Metody analityczne, stosowane w trakcie projektowania geotub wykonanych z przepuszczalnego materiału spoczywających na sztywnym podłożu

Źródło	Charakterystyka użytych oznaczeń	Sposób obliczania kształtu geotuby
Leshchinsky i inni [13]	Δh – spadek wysokości powłoki podczas procesu konsolidacji h_0 – początkowa wysokość powłoki G_s – ciężar objętościowy materiału wypełniającego e_0 – początkowy wskaźnik porowatości w_0 – wilgotność początkowa w_f – wilgotność końcowa γ_{zaw} – ciężar właściwy materiału pompowanego do geotuby; γ_{grun} – ciężar właściwy materiału skonsolidowanego	$\frac{\Delta h}{h_0} = \frac{\Delta e}{1+e_0} = \frac{e_0 - e_f}{1+e_0} = \frac{G_s(w_0 - w_f)}{1+w_0 G_s}$ $w_0 = \frac{G_s - \gamma_{zaw}/\gamma_w}{G_s\left(\gamma_{zaw}/\gamma_w - 1\right)}$ $w_f = \frac{G_s - \gamma_{grun}/\gamma_{wody}}{G_S\left(\gamma_{grun}/\gamma_w - 1\right)}$
Shin i Oh [18]	σ' – wartość efektywnego naprężenia; e – wskaźnik porowatości k – przepuszczalność	1. $C_F = \frac{-k}{\rho_f(1+e)}\frac{d\sigma'}{de}$ 2. $C_F = \frac{Tz_o^2}{t}$ t – czas rzeczywisty C_F – współczynnik konsolidacji

W przypadku projektowania konstrukcji zabezpieczających złożonych z większej liczby geotub zakres obliczeń poszerza się i korzystanie z rozwiązań analitycznych, mimo przyjmowanych powszechnie założeń upraszczających, staje się kłopotliwe. W takich przypadkach zazwyczaj sięga się po metody numeryczne oparte na MES [4, 12]. Przy ich użyciu można projektować zarówno zabezpieczenia złożone z pojedynczych powłok, jak też z ich układów. Przyczyną popularności metod numerycznych jest fakt, że obliczenia wykonuje się najczęściej za pomocą profesjonalnego oprogramowania dostępnego na rynku (np. ABAQUS [4] lub FLAC [12] – w przypadku projektowania powłok). W trakcie ich wykonywania nie trzeba zakładać mechanizmu lub mechanizmów pracy konstrukcji. Wystarczy znać właściwości i stałe materiałowe poszczególnych jej warstw oraz podłoża gruntowego, parametry działającego obciążenia, przyjąć siatkę elementów skończonych (rys. 3) i założyć odpowiednie warunki brzegowe. Tyle teoria – w praktyce prawidłowość przyjętych założeń zawsze trzeba zweryfikować na podstawie wyników badań doświadczalnych.



Rys. 3. Przykładowe siatki elementów skończonych, na które podzielono geosyntetyczną powłokę [4]
a) model użyty do obliczenia wymaganej wytrzymałości materiału powłoki, b) model użyty do symulowania procesu konsolidacji materiału wypełniającego



Rys. 4. Przykładowe nomogramy do projektowania geotub
a) zmiana wymaganej wytrzymałości materiału geotuby wraz ze zmianą wysokości powłoki,
b) zmiana wysokości geotuby wraz ze zmianą wartości działającego ciśnienia

W trakcie projektowania powłok geosyntetycznych można też wykorzystywać gotowe nomogramy, które są wykreślane na podstawie wyników obliczeń uzyskanych przy użyciu jednej z przedstawionych wcześniej metod (analitycznych lub numerycznych). Na rys. 4 pokazano dane, które można wykorzystać w trakcie projektowania powłoki wykonanej z nieprzepuszczalnego geosyntetyku spoczywającej na sztywnym podłożu gruntowym (obliczenia wykonano, stosując metody zamieszczone w tabl. 3).

Warto zastosować wartości bezwymiarowe na osiach wykresów pełniących funkcję nomogramów. W tym celu zamiast wartością wysokości powłoki można operować:

$$h = \frac{D}{L} \tag{1}$$

gdzie:
D – wysokość powłoki,
L – obwód powłoki.

Zamiast wymaganej wytrzymałości materiału powłoki można stosować:

$$t = \frac{T}{\gamma_{\text{int}} \cdot L^2} \tag{2}$$

gdzie:
T – wytrzymałość geosyntetyku,
L – obwód powłoki,
γ_{int} – ciężar właściwy materiału wypełniającego.

Ciśnienie P_{top} zaś wyrazić jako:

$$p_{top} = \frac{P_{top}}{\gamma_{\text{int}} \cdot L} \tag{3}$$

SPRAWDZENIE STATECZNOŚCI PROJEKTOWANEGO ZABEZPIECZENIA

Zabezpieczenia przeciwpowodziowe złożone z geosyntetycznych powłok muszą być stateczne. Wyniki przeprowadzonych doświadczeń wskazują na kilka możliwych mechanizmów utraty ich stateczności [19]. Pozwalają też na identyfikację najważniejszych parametrów mających wpływ na stateczność projektowanego zabezpieczenia. Należą do nich:

– stopień wypełnienia powłok materiałem wypełniającym definiowany jako:

$$d_{fill} = 4\pi \frac{A}{L^2} \tag{4}$$

gdzie:
L – obwód projektowanej powłoki,
A – pole przekroju poprzecznego powłoki.

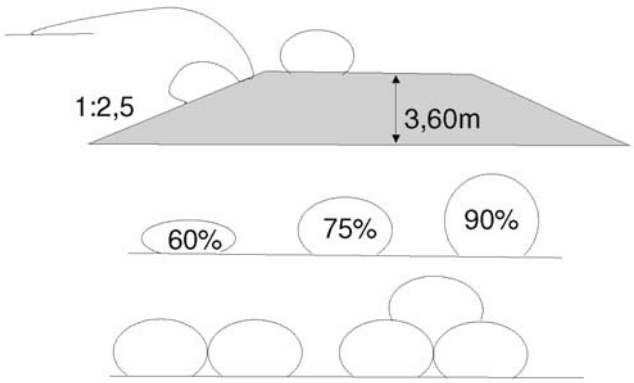
Jak pokazują wyniki doświadczeń [5] stopień wypełnienia ma wpływ zarówno na deformacje poszczególnych elementów tworzących konstrukcje ochronną, jak i na przemieszczanie się materiału wypełniającego (najczęściej piasku) wewnątrz geotub oraz na ich odporność na poślizg. Stateczność powłok geosyntetycznych zwiększa się wraz ze wzrostem ich stopnia napełnienia. Prowadzone są badania dotyczące zasad doboru optymalnego stopnia napełnienia powłok walcowych. Do tej pory nie opracowano jasnych wytycznych w tym zakresie. W praktyce przyjmuje się, że w przypadku geotub wypełnionych piaskiem zalecany stopień napełnienia wynosi w granicach 70 ÷ 80% (w przypadku geokontenerów jest to: 35 ÷ 45%).

– poziom wody oddziałującej na zabezpieczenie – wyniki badań doświadczalnych [1, 2, 19] wskazują, że stateczność zabezpieczenia złożonego z powłok wzrasta, jeżeli elementy te znajdują się powyżej poziomu wody. W przypadku tymczasowych zabezpieczeń przeciwpowodziowych zbudowanych z powłok wypełnionych wodą (o przekroju zbliżonym do schematu pokazanego na rys. 5) zaobserwowano utratę stateczności, jeżeli poziom wody powodziowej przekraczał 70% wysokości zabezpieczenia [19].

Standardowa procedura [11] sprawdzenia stateczności geosyntetycznej geotuby ogranicza się do wykorzystania dwóch równań:

$$\frac{H_s}{\Delta \cdot B} < 1 \tag{5}$$

$$\frac{H_s}{\Delta \cdot D} < 1 \tag{6}$$



Rys. 5. Schemat doświadczeń, których wyniki pozwoliły na wyprowadzenie wzorów (7 ÷ 8) [1, 2]

gdzie:
H_s – wysokość fali znacznej,
B, D – odpowiednio: szerokość i wysokość powłoki,

$\Delta = (1-n)\frac{\rho_g - \rho}{\rho}$,

ρ_g – gęstość materiału wypełniającego,
ρ – gęstość wody,
n – porowatość materiału wypełniającego.

Jeżeli równania (5, 6) są spełnione, to przyjmuje się, że warunek stateczności geotuby jest zachowany. Są to równania ogólne, które w przypadku zabezpieczeń przeciwpowodziowych można zastosować pod warunkiem, że jako wysokość fali znacznej przyjmie się spodziewaną maksymalną wysokość wód powodziowych.

Ostatnio [1, 2, 19] pojawiły się sugestie, że w przypadku geotub wypełnionych piaskiem i narażonych na oddziaływanie fal, których wysokość przekracza wysokość geotub, stateczność konstrukcji na poślizg należy sprawdzać przy użyciu zależności:

$$\frac{C\sqrt{H_s}}{\Delta\sqrt{B}\left(\xi\cos\alpha + \sin\alpha\right)} < 0,65 \tag{7}$$

gdzie:
C – wartość stałej, zależnej od kąta nachylenia fal oddziałujących na konstrukcję (C = 0,50 ÷ 0,65%),
H_s – wysokość fali znacznej,
B – szerokość powłoki,
ξ – współczynnik tarcia pomiędzy geotubą i podłożem,
α – kąt nachylenia pomiędzy konstrukcją betonową, na której spoczywa geotuba i podłożem – por. rys. 5.

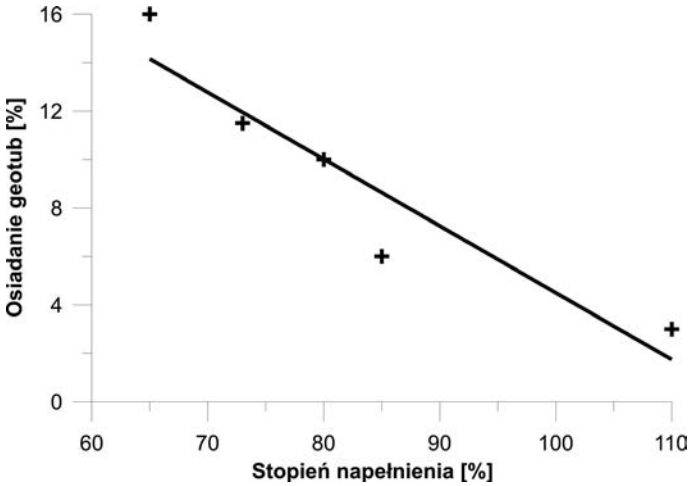
W przypadku, gdy wartość współczynnika C = 0,65, a wartość kąta α = 0 wzór (7) przyjmuje postać:

$$\frac{H_s}{B} \le \left(\Delta\xi\right)^2 \tag{8}$$

gdzie:
C_D, C_L – współczynniki,
λ – współczynnik kształtu geotuby definiowany jako: $\lambda = B / D$,
φ – współczynnik związany z prędkością fali.

DEFORMACJE GEOTUB

W trakcie projektowania konstrukcji złożonej z geosyntetycznych powłok istotne jest prawidłowe oszacowanie ich końcowej wysokości, tzn. określenie osiadania geotub definiowanego jako S_{tub}:



Rys. 6. Charakter zależności pomiędzy wielkością osiadania geotub, a stopniem ich napełnienia.

$$S_{tub} = \frac{D_K - D_P}{D_P} \tag{9}$$

gdzie:
D_K – końcowa wysokość geotuby
D_P – to początkowa wysokość geotuby

Parametrem, który ma istotny wpływ na wartość osiadania geotub jest stopień ich napełnienia materiałem wypełniającym (rys. 6). Wyniki badań doświadczalnych wskazują, że dopiero przy stopniu wypełnienia przekraczającym 80% można spodziewać się osiadań geotub, które nie przekroczą 10% [1, 2].

UWAGI KOŃCOWE

Konstrukcje ochronne zbudowane z geosyntetycznych powłok stanowią atrakcyjną alternatywę wobec rozwiązań tradycyjnie stosowanych do ochrony przeciwpowodziowej. Rozwiązania takie są z powodzeniem wykorzystywane w praktyce inżynierskiej już od kilkudziesięciu lat. Dostępna jest też coraz szersza baza danych dotyczących różnych rodzajów badań takich zabezpieczeń, w tym wyniki monitoringu pracy rzeczywistych konstrukcji. Wciąż jednak można wymienić co najmniej kilka czynników, które ograniczają rozwój tej technologii. Do najważniejszych z nich można zaliczyć:

1. Fakt, że dotychczasowe doświadczenia praktyczne wskazują, iż w przypadku niektórych realizacji poniesione koszty nie były niższe od nakładów związanych z budową tradycyjnych konstrukcji ochronnych w tym samym miejscu. Atrakcyjność cenowa tych rozwiązań zawsze wymaga sprawdzenia w przypadku realizacji konkretnej inwestycji [1, 2].
2. Geosyntetyczne powłoki dobrze sprawdzają się jako rozwiązania tymczasowe. W przypadku, gdy mają być użyte do budowy zabezpieczeń użytkowanych przez dłuższy czas, muszą być poddawane okresowym dokładnym przeglądom lub tworzyć rdzeń konstrukcji zabezpieczającej (powinny być przykryte innymi materiałami, które są bardziej odporne na uszkodzenia). Wszelkie zaobserwowane uszkodzenia geosyntetyków, z których wykonano powłoki, powinny być na bieżąco naprawiane (są zawsze groźne dla trwałości konstrukcji zabezpieczającej).

3. W przeciwieństwie do rozwiązań tradycyjnych, wciąż nie opracowano powszechnie zaakceptowanych metod projektowania zabezpieczeń złożonych z tego rodzaju elementów. Stanowi to istotne ograniczenie w rozwoju tej technologii.
4. Prawidłowe zaprojektowanie konstrukcji złożonej z geosyntetycznych powłok wymaga dobrej znajomości właściwości geosyntetyków i zasad modelowania pracy tych materiałów. Wiedza na ten temat wciąż nie jest powszechna.

LITERATURA

1. Bezuijen A., Pilarczyk K. W.: Geosynthetics in hydraulic and coastal engineering: Filters, revetments and sand filled structures. Proc. EuroGeo5, Valencia, Spain, 2012.

2. Bezuijen A., Vastenburg E., van Steeg P.: Design aspects for geotextile encapsulated structures in Coastal Engineering. Proc. EuroGeo5, Valencia, Spain, 2012.

3. Biggar K., Masala S.: Alternatives to sandbags for temporary flood protection. Alberta Transportation and Utilities Disaster Services Branch and Emergency Preparedness Canada, 1998.

4. Cantre S.: Geotextile tubes – analytical design aspects, Geotextiles and Geomembranes, 20, 2002, 305-319.

5. Dassanayake D., Oumeraci H.: Hydraulic stability of coastal structures made of geotextile sand containers (GSCS): effect of engineering properties of GSCS, 2012

6. Ghavanloo E, Daneshmand: Two-dimensional analytical analysis of equilibrium shape of inflated geomembrane tube resting on rigid foundation with arbitrary shape, Mechanics Research Communications, 36 930, 2009, 405-412.

7. Hsieh J. C., Plaut R. H.: Free vibrations of inflatable dams, Acta Mech, 85 (3), 1990, 207-220.

8. Hsieh, J. C., Plaut, R. H., Yucel, O.: Vibrations of an inextensible cylindrical membrane inflated with liquid" Journal of Fluids and Struct., 3(2), 1989, 151-163.

9. Jermołowicz, P.: Geosyntetyki w budownictwie hydrotechnicznym. Zasady obliczeń i szczegółowe kryteria doboru. Materiały szkoleniowe, 2012.

10. Kazimierowicz K.: Simple analysis of deformation of sand-sausages., Proc. 5th International Conference of Geotextiles, Geomembranes and Related Products, Singapur 5-9 września 1994, 2, 775-778.

11. Kazimierowicz-Frankowska, K.: Wybrane aspekty projektowania konstrukcji geosyntetycznych wzmacniających brzeg morki, Inżynieria Morska i Geotechnika, nr 4/, 2012, 491-495.

12. Kim, M., Moler, M., Freeman, M., Filz, G.M., Plaut, R. H.: Stacked geomembrane tubes for flood control: experiments and analysis, Geosynthetics International, Vol 12, No 5, 2005, 253-259.

13. Leschinsky D., Leschinsky O., Ling H. I., Gilbert P. A.: Geosynthetic tubes for confining pressurized slurry: some design aspects, Journal of Geotechnical Engineering 122. 8, 1996, 682-690.

14. Liu, G. S., Silvester, R.: Sand sausages for beach defense work. Proceedings of the Sixth Australasian Hydraulics and Fluid Mechanics Conference, Adelaide, Australia, 1977, 340-343.

15. Malik J.: Some problems connected with 2D modeling of geosynthetics tubes., Nonlinear Anal.: Real World App., 10 (2), 2009, 810-823.

16. Plaut, R. H., Cotton, S. A.: Two-dimensional vibrations of air-filled geomembrane tubes resting on rigid or deformable foundations, J. of Sound and Vibration, 282 (1-2), 2005, 265-276.

17. Plaut, R. H.; Suherman, S.: Two-dimensional analysis of geosynthetics tubes, Acta Mechanica, 129, 1998, 207-218.

18. Shin, E. C., Oh, Y. I.: Consolidation process of geotextile tube filled with fine-grained materials, Int. J. Offshore Polar Eng., 14(2), 2004.

19. Steeg, P, Vastenburg, E., Bezuijen, A., Zengerink, E., Gijt, J.: Large-scale physical model tests on sand-filled geotextile tubes and containers under wave attack. Proc. 6th Int. Conf. On Coastal Structures, Yokohama 2011.