

ZASTOSOWANIE GEOSYNTETYKÓW W BUDOWNICTWIE HYDROTECHNICZNYM

Martyna Lalik, Dominika Dąbrowska

Uniwersytet Śląski, Wydział Nauk Przyrodniczych, Sosnowiec

SRESZCZENIE

Obiekt hydrotechniczny to obiekt wraz z urządzeniami i związanymi z nim instalacjami technicznymi, służący do gospodarowania wodami oraz kształtowania i korzystania z zasobów wodnych. Szczególną uwagę należy zwrócić na właściwości zastosowanych materiałów, ale także na działanie wody i wszelkich procesów towarzyszących. Z biegiem lat geosyntetyki są coraz częściej stosowane jako materiał w budownictwie, w tym w hydrotechnice. Priorytetowym aspektem przy wyborze materiału geosyntetycznego jest podejście do spełnienia określonej funkcji, obniżenie kosztów inwestycji, zapewnienie stabilności i wzmocnienia konstrukcji, a także łatwość montażu. Dzięki szerokiemu zakresowi zastosowań i zaletom ekonomicznym zyskały reputację pełnowartościowych materiałów budowlanych. W artykule przedstawiono najważniejsze możliwości zastosowania polimerów syntetycznych w hydrotechnice. Uwzględniono funkcje i zalety poszczególnych materiałów przepuszczalnych i nieprzepuszczalnych. Jako zbrojenie służy większość geosyntetyków, takie jak geowłókniny, geosiatki trójosiowe, geosiatki, geokompozyty. Materiały te stosowane są do wzmocnienia gruntów i skarp, oddzielania gruntów, jako niezależne drenaże oraz jako zabezpieczenia systemów odwadniających.

Słowa kluczowe: hydrotechnika, geosyntetyki, filtracja, hydrologia.

ARTICLE INFO

PolHypRes 2024 Vol. 87 Issue 2 pp. 19 – 32

ISSN: 1734-7009 eISSN: 2084-0535

DOI: 10.2478/phr-2024-0008

Strony: 14, rysunki: 0, tabele: 2

page **www of the periodical:** www.phr.net.pl

Typ artykułu: przeglądowy

Termin nadeśnięcia: 14.02.2024 r.

Termin zatwierdzenia do druku: 03.03.2024 r.

Publisher

Polish Hyperbaric Medicine and Technology Society



WSTĘP

Realizując inwestycje hydrotechniczne należy zwrócić szczególną uwagę na właściwości zastosowanych materiałów, ale także na oddziaływanie wody [1] i wszelkich procesów towarzyszących. Zgodnie z normą polską PN-EN ISO 10318:2007 materiały geosyntetyczne definiuje się jako „wyrób, którego co najmniej jeden składnik wykonany jest z polimeru (poliestru, polipropylenu, polietylenu lub poliamidu), w postaci arkusza, taśmy lub formy przestrzennej, stosowany w kontakcie z gruntem (lub innym materiałem) w geotechnice, fundamentowaniu i budownictwie lądowym [2]. Budowle hydrotechniczne uwzględniają różne okresy użytkowania. Mogą być traktowane jako obiekty tymczasowe, dla których przewidywany okres użytkowania jest krótszy niż 5 lat lub, niezależnie od okresu użytkowania, służą do budowy, naprawy lub renowacji innego obiektu hydrotechnicznego, oraz obiekty trwałe, dla których przewidywany okres użytkowania jest dłuższy niż 5 lat.

Ogólne informacje dotyczące budownictwa i budowli wodnych zawarte są w odpowiednich aktach prawnych. Są to przede wszystkim ustawa z dnia 10 marca 2023 r. Prawo budowlane [Dz. U. 2023 poz. 682] oraz ustawa z dnia 16 czerwca 2023 r. Prawo wodne [Dz. U. z 2023 r. poz. 1478]. Aktami prawnymi pomocniczymi, sporządzonymi na podstawie ww. rozporządzeń, są rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 20 kwietnia 2007 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budowle hydrotechniczne i ich usytuowanie oraz rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 21 sierpnia 2019 r. w sprawie zakresu instrukcji gospodarowania wodami [J.O. 2019, 1725].

Oprócz wcześniej wymienionej normy definiującej geosyntetyki istnieją inne normy związane z budownictwem hydrotechnicznym:

- PN-EN 13252:2002 Geotekstylii i wyroby pokrewne - Właściwości wymagane dla wyrobów stosowanych w systemach odwadniających;
- PN-EN 13253:2002 Geotekstylii i wyroby pokrewne - Właściwości wymagane dla wyrobów stosowanych w ochronie przeciwerozwojowej (ochrona i wzmacnianie brzegów);
- PN-EN 13254:2002 Geotekstylii i wyroby pokrewne - Właściwości wymagane dla wyrobów stosowanych do budowy zbiorników wodnych i zapór;
- PN-EN 13255:2002 Geotekstylii i wyroby pokrewne - Właściwości wymagane dla wyrobów stosowanych do budowy kanałów; oraz
- PN-EN 13361 Bariery geosyntetyczne - Właściwości wymagane dla wyrobów stosowanych do budowy zbiorników i zapór;
- PN-EN 13362 Bariery geosyntetyczne - Właściwości wymagane dla wyrobów stosowanych do budowy kanałów.

Zgodnie z definicją prawną budowlą hydrotechniczną jest budowla wraz z urządzeniami i instalacjami technicznymi z nimi związanymi, służąca do gospodarowania wodami oraz kształtowania i wykorzystania zasobów wodnych [3], w tym: zapory ziemne i betonowe, jazy, budowle zrzutowe z przelewami i upustami, przepusty wałowe i mnisze, śluzy żeglugowe, wały przeciwpowodziowe, elektrownie wodne i elektrociepłownie, ujęcia wód powierzchniowych śródlądowych, upusty ścieków, misy zbiorników wodnych ze skarpami i spadkami, przepompownie, kanały, sztolnie, rurociągi hydrotechniczne, syfony, leje, akwedukty, budowle regulacyjne na rzekach i potokach, progi, grodzie, zbiorniki nadziemne gromadzące substancje płynne i półpłynne, porty, baseny kąpielowe, pomosty, mola, falochrony, nabrzeża, bulwary, pochylnie i falochrony na wodach śródlądowych, przepławki dla ryb [4,5].

Definicja budowli hydrotechnicznej obejmuje również budowlę piętrzącą i jest definiowana jako budowla umożliwiająca stałe lub okresowe spiętrzenie wody lub substancji płynnych lub półpłynnych ponad przyległym obszarem lub zbiornikiem [6]. Do najpopularniejszych budowli hydrotechnicznych śródlądowych zalicza się tamy, zaś wśród budowli morskich nabrzeża. Rola takich budowli jest nieoceniona nie tylko w kontekście zapewnienia racjonalnej gospodarki wodnej, ale także kształtowania zasobów wodnych. Przykładowo zapory umożliwiają tworzenie elektrowni wodnych. W latach 50. XX wieku wybudowano ponad 40 000 zapór, a obecnie dzięki tamom wytwarza się prawie 20% całkowitej energii elektrycznej. Nabrzeża są natomiast nieodłącznym elementem każdego portu. Pod względem funkcjonalności nabrzeża można podzielić na nabrzeża portowe i brzegi. Te pierwsze umożliwiają statkom bezpośrednio cumowanie przy brzegu, postój na nim i ich obsługę, natomiast drugie są osłonami brzegowymi, które podtrzymują obszary przybrzeżne.

Projektowanie budowli hydrotechnicznych, zarówno pod względem konstrukcji, jak i zastosowanych materiałów, wymaga wiedzy i dobrego rozpoznania warunków środowiskowych danego obszaru. Geosyntetyki są coraz częściej stosowane jako materiał w ochronie środowiska i budownictwie, w tym w hydrotechnice [7]. Ze względu na szerokie spektrum zastosowań i zalety ekonomiczne, zaczęto je nazywać pełnoprawnymi materiałami budowlanymi [8]. Geomateriały są wykorzystywane do budowy infrastruktury pracującej w warunkach dużych obciążeń [9, 10, 11]. Jednak parametry użytkowe geosyntetyków są stale monitorowane ze względu na stałe działanie czynników destrukcyjnych [12, 13].

Celem artykułu jest wskazanie najważniejszych rodzajów geosyntetyków stosowanych w hydrotechnice oraz funkcji, jakie pełnią w zależności od swoich właściwości.

METODYKA

ROLA GEOSYNTETYKÓW Z ZALEŻNOŚCI OD ICH PARAMETRÓW

Priorytetowym aspektem przy wyborze materiału geosyntetycznego jest podejście do spełnienia określonej funkcji, obniżenie kosztów inwestycji, zapewnienie stabilności i wzmocnienia konstrukcji, a także łatwość montażu [14]. Materiały geosyntetyczne wytwarzane są z różnych rodzajów polimerów, które różnią się właściwościami mechanicznymi, hydraulicznymi i chemicznymi [15], ale podstawowym parametrem jest przepuszczalność. Materiały nieprzepuszczalne to: Geomembrany, Bentomaty i Geomembrany bentonitowe, natomiast materiały przepuszczalne to: Geowłókniny, Geowłókniny,

Geokraty, Geomaty, Geokraty, Geokomórki, Geokompozyty. Najczęściej stosowane to: polietylen, polipropylen, poliamid, poliester, aramid, polialkohol winylowy.

Projektując obiekty inżynierskie, w tym obiekty hydrotechniczne, należy brać pod uwagę takie parametry geosyntetyków, jak wytrzymałość na rozciąganie, sztywność, wodoprzepuszczalność i chropowatość powierzchni [16]. W tabeli 1 przedstawiono znaczenie parametrów inżynierskich w zależności od rodzaju geosyntetyku.

Tab. 1

Porównanie znaczenia cech inżynierskich wybranych geosyntetyków [17].

Rodzaj	Przepuszczalność		Wytrzymałość	Sztywność	Chropowatość powierzchni
	pozioma	pionowa			
Geowłókniny	D	D	D	D	Geowłókniny
Geomembrany	S	S	M	M	Geomembrany
Geosiatki	D	S	D	S	Geosiatki
Geokompozyty	S	D	D	S	Geokompozyty

Znaczenie: D- istotne, M- średnie, S-małe

Polimery syntetyczne są różnorodne i wielofunkcyjne, dlatego zazwyczaj pełnią więcej niż jedną funkcję. Podstawowe funkcje dzielą się na dwie grupy. Pierwszą stanowią funkcje mechaniczne, takie jak: funkcja separacyjna, funkcja wzmacniająca, funkcja ochronna i funkcja przeciwozyjna. Drugą grupę stanowią funkcje hydrauliczne, do których zalicza się: funkcję filtracyjną, funkcję uszczelniającą i funkcję drenażową [18,19].

Funkcja separacyjna ma na celu zapobieganie mieszanemu się sąsiednich warstw gruntu, podczas gdy woda swobodnie przepływa. Funkcja filtracyjna pozwala na zatrzymanie wnikania gruntu lub cząstek do warstw przepuszczalnych. Funkcja uszczelniająca jest barierą, która zapobiega przepływowi wody między dwiema warstwami, np. gruntem. Funkcja wzmacniająca umożliwia poprawę właściwości mechanicznych gruntu, np. nośności podłoża lub wytrzymałości na rozciąganie powierzchni. Funkcja ochronna służy jako dodatkowa ochrona mechaniczna lub chemiczna dla innych materiałów budowlanych. Funkcja drenażowa umożliwia przepływ wody, cieczy i gazów w płaszczyźnie geosyntetyków. Funkcja antyerozyjna służy ograniczeniu lub zapobiegnięciu przemieszczaniu się gleby na powierzchni stoku [20].

Tab. 2

Rola geosyntetyków [21].

Rodzaj stosowanego materiału	Funkcja						
	Filtracja	Sealing	Filtracja	Reinforcement	Filtracja	Protection	Filtracja
Geotkaniny	+	Geotkaniny	+	Geotkaniny	+	Geotkaniny	+
Geowłókniny	+	Geowłókniny	+	Geowłókniny	+	Geowłókniny	+
Georuszty		Georuszty		Georuszty		Georuszty	
Geosiatki		Geosiatki		Geosiatki		Geosiatki	
Geomaty		Geomaty		Geomaty		Geomaty	
Geodreny		Geodreny		Geodreny		Geodreny	
Geokompozyty		Geokompozyty		Geokompozyty		Geokompozyty	
Geomembrany		Geomembrany		Geomembrany		Geomembrany	

ZASTOSOWANIA GEOSYNTETYKÓW

Aby stosować geosyntetyki przy budowie obiektów hydrotechnicznych, należy spełnić określone wymagania, aby zmaksymalizować ich żywotność [22]. Powierzchnia gruntu, na której zostanie umieszczona warstwa materiału polimerowego, musi być wolna od elementów, które mogłyby uszkodzić strukturę materiału, np. korzeni lub kamieni o ostrych krawędziach, musi być równa i mieć takie same warunki zagęszczenia i wilgotności [23]. Zaleca się również układanie geowłókniny według wcześniej przygotowanego szczegółowego projektu w kierunku „pod górę”, przy użyciu specjalnych maszyn lub ręcznie. Geosyntetyki należy mocować za pomocą stalowych szpilek w kształcie litery U o średnicy 10



mm i długości min. 500 mm, szerokość zakładki na warstwy powinna wynosić od 30 cm do 60 cm, a skrajne krawędzie powinny być przedłużone o 1,5 m. Rozłożony materiał syntetyczny nie powinien mieć żadnych zagięć, ale powinien być lekko naciągnięty i szybko pokryty warstwą podkładu, aby chronić go przed promieniowaniem UV [24]. Materiały geosyntetyczne, dzięki zróżnicowanej budowie, rodzajowi splotu czy układowi włókien, mogą pełnić różne role w stosowanej konstrukcji. W budownictwie hydrotechnicznym stosowane materiały muszą mieć określone cechy, aby mogły być wykorzystane do budowy obiektu [25]. Ponadto prace remontowe w obiektach hydrotechnicznych są szczególnie wymagające, materiały te muszą charakteryzować się wysoką bezawaryjnością i dużą odpornością na obciążenia mechaniczne. Ponadto powinny zajmować niewielką przestrzeń, ponieważ w takich miejscach zazwyczaj nie da się stworzyć dużego placu budowy.

Materiały stosowane muszą być odporne na różne czynniki. Są to czynniki mechaniczne, chemiczne, atmosferyczne i biologiczne. Czynniki te obejmują:

- odporność na starzenie,
- wytrzymałość na rozciąganie,
- mrozoodporność,
- elastyczność,
- odporność na degradację chemiczną,
- odporność na wilgoć,
- odporność na pleśń, grzyby i inne mikroorganizmy,
- parametry hydrauliczne (np. przepuszczalność wody, wielkość porów),
- odporność na temperaturę,
- odporność na promieniowanie słoneczne,
- wodoodporność [26].

Ponadto polimery syntetyczne nie mogą reagować z wodą, być toksyczne ani powodować zanieczyszczenia wody i środowiska [27]. Geowłókniny mogą rozkładać się na mniejsze cząsteczki (mikroplastiki), które mogą stanowić zagrożenie dla wody i biosfery [28], jednak ze względu na niską biodostępność generalnie nie stanowią zagrożenia dla środowiska.

Ważnym aspektem wyboru materiałów polimerowych jest maksymalne wykorzystanie ich funkcjonalności, łatwość montażu i wysoka dostępność, ale także obniżenie kosztów inwestycyjnych [29]. Obecnie nie ma jasnych norm i wytycznych, których powinny przestrzegać osoby odpowiedzialne za konstrukcje wykorzystujące geosyntetyki [30].

Brak ujednoczonych norm lub obliczeń teoretycznych i empirycznych wynika z różnic w jakości lub mechanizmie działania, co powoduje, że producenci materiałów polimerowych tworzą wytyczne projektowe wyłącznie dla swoich produktów, co utrudnia ich porównywanie [24].

Hydrotechnikę można rozpatrywać zarówno w odniesieniu do wód powierzchniowych, jak i podziemnych o różnych właściwościach fizykochemicznych i bakteriologicznych [31]. Erozja jest procesem, który ma największy wpływ na sieć hydrograficzną, a tym samym na znajdujące się w niej budowle hydrotechniczne. Powoduje ona wymywanie przez przepływ wody gruntu (najczęściej piasku i piasku mulistego) znajdującego się na dnie i brzegach cieków. Długotrwałe działanie erozyjne powoduje m.in. osuwiska. Aby zabezpieczyć cieki wodne przed wymywaniem, do budowy umocnień brzegowych i dennych można stosować geowłókniny. Najlepiej sprawdzają się w tym przypadku materiały geowłókninowe. Ze względu na splot geowłóknin pełnią one funkcję warstwy filtracyjnej, która chroni grunt przed wymywaniem. Cząsteczki gruntu pozostają na warstwie geowłókniny, nie powodując utraty materiału dna i krawędzi. Grunt nie wnika do wody i nie przyczynia się do wzrostu ciśnienia porowego. Oprócz funkcji filtracyjnej, zastosowanie geowłóknin do wzmocnienia dna i skarp cieków wodnych stanowi barierę separacyjną, która zapobiega mieszanemu się różnych frakcji gruntu użytego w konstrukcji [32, 33]. Przestrzenne geomaty antyerozyjne mogą być również stosowane do ochrony brzegów. Stosuje się je głównie na zboczach o nachyleniu większym niż 1:3. Dzięki swojej strukturze geomaty zatrzymują glebę, co ułatwia posadzoną roślinom rozwój systemu korzeniowego, a także pomagają utrzymać wilgotność gleby, chroniąc zbocze przed wysychaniem lub narażeniem na działanie promieni słonecznych. Ponadto interakcja geomaty, gleby i rosnących na niej korzeni roślin powoduje, że geosyntetyk przyczepia się do podłoża, tworząc warstwę chroniącą grunt przed erozją [34].

Maty antyerozyjne oprócz wspomaganie wzrostu roślinności przyczyniają się do zwiększenia stabilności zbocza, tworząc w ten sposób ogólną (wraz z porośniętą roślinnością) trwałą konstrukcję odporną na czynniki środowiskowe [35].

Geosiatki komórkowe sprawdzają się również do wzmocnienia zboczy, ponieważ ich struktura przypominająca plaster miodu pozwala na wypełnienie ich odpowiednio dobranym materiałem wypełniającym (np. piaskiem, betonem, ziemią). Zaletą stosowania geosiatek jest to, że można je układać na wcześniej wykonanym podłożu geowłókninowym, pod warunkiem, że warunki zbocza i wybrany sposób wypełnienia lub zakotwiczenia na to pozwalają [36].

Geosyntetyczne materiały antyerozyjne mają na celu, oprócz ochrony podłoża przed czynnikami erozji, również podtrzymywanie roślinności – ułatwianie wzrostu systemu korzeniowego na zboczach i dnie [34]. Dodatkowo poprzez obsianie zboczy roślinnością zwiększa się stabilność brzegów [24].

Kolejną grupą budowli hydrotechnicznych, w których budowie wykorzystuje się materiały geosyntetyczne, są drenaże liniowe, do których zalicza się na przykład drenaże lub rowy. W drenażu geosyntetyki pełnią funkcję filtra pomiędzy istniejącym gruntem a systemem odprowadzania wody. Niektóre materiały mogą również pełnić typową funkcję drenażową. Przykładami zastosowania produktów geosyntetycznych w systemach odwodnień liniowych są drenaż francuski, drenaż żebrowy, drenaż powierzchniowy i bariera geosyntetyczna. W tego typu konstrukcjach najczęściej stosuje się geokompozyty, geomembrany i geowłókniny. Najpopularniejszą opcją jest taka, gdy geowłóknina pokrywa/otacza warstwę łatwo przepuszczalnego gruntu wypełniającego rów [37].

Drenaż żebrowy opiera się na filtrze geowłókninowym i rdzeniu w postaci na przykład geosiatki drenażowej doprowadzającej wodę do rury drenażowej. W przeciwieństwie do drenażu francuskiego lub powierzchniowego, rura drenażowa jest owinięta geokompozytem, który ma właściwości przepuszczające wodę [38]. Geosyntetyki (bariery polimerowe) są również stosowane jako bariery geosyntetyczne w drenażu liniowym. Stosuje się je do uszczelniania podłoża nawierzchni, zbiorników lub rowów. Ponadto, ze względu na swoje właściwości, wyroby geowłókninowe mogą być

stosowane do pokrywania systemów drenażowych w celu ich ochrony przed zamulaniem drobnociarnistymi gruntami oraz do ochrony uszczelnień geomembranowych przed uszkodzeniami mechanicznymi [39].

Popularnymi budowlami hydrotechnicznymi są wszelkie zbiorniki wodne, które w zależności od potrzeb spełniają różne funkcje – od przechwytywania fal powodziowych, poprzez retencję opadów, aż po cele rekreacyjne. Konstrukcje zbiorników, zwłaszcza skarpy i dna, muszą być dostosowane do ich zadań. Najczęściej geosyntetyki stosuje się w szambach i zbiornikach rozsączających [30].

Szczelne zbiorniki przeznaczone są do gromadzenia wody. Najczęściej zasilane są wodami opadowymi, powierzchniowymi spływami z terenów przyległych oraz dopływami z sieci hydrograficznej. Aby prawidłowo funkcjonowały, potrzebują odpowiedniej konstrukcji, w tym zwrócenia szczególnej uwagi na uszczelnienie dna i skarp. W tym celu celowe będzie zastosowanie geosyntetyków, m.in.: geowłókniny i bariery geosyntetycznej. Zastosowanie uszczelnienia geosyntetycznego zapobiega przedostawaniu się cieczy przez dno i skarpy oraz zatrzymuje zanieczyszczenia. Dodatkowa warstwa materiału geowłókninowego umieszczona na barierze geosyntetycznej wspomaga ochronę przed przebiciem, dzięki czemu cała konstrukcja jest mocniejsza i trwalsza [40]. Zbiorniki infiltracyjne przechwytyują wodę z powierzchniowego spływu i jednocześnie odprowadzają ją do gruntu. W tego typu zbiornikach stosuje się również geowłókninę. Stanowi ona warstwę rozdzielającą pomiędzy rodzimym gruntem a dnem zbiornika wykonanym ze żwiru i piasku w odpowiednim ułożeniu frakcyjnym (warstwa filtracyjna). Jej zadaniem jest wychwytywanie zanieczyszczeń i zapobieganie wymywaniu dna podczas infiltracji wody do gruntu. Brzegi takiego zbiornika są często obsadzone roślinnością wodną w celu wspomagania procesów wstępnego oczyszczania [18].

Duża gęstość sieci hydrograficznej wymaga stosowania środków ochronnych na terenach przyległych do rzek. Jednym z takich sposobów jest budowa wałów przeciwpowodziowych. Ich zadaniem jest przechwytywanie i zatrzymywanie wody w przypadku wystąpienia wezbrania lub powodzi. Wał ziemny podniesiony ponad wysokość koryta rzeki nazywa się wałem przeciwpowodziowym. Wały ziemne wykonuje się z różnych materiałów, w tym: z geosyntetyków. Materiały geosyntetyczne stosuje się na różnych etapach budowy i modernizacji wałów [41].

Materiały geosyntetyczne, głównie geomembrany i bentomaty, stosuje się do uszczelniania korpusu wałów przeciwpowodziowych, w tym jako ekrany zboczowe, a także do uszczelniania korpusu wału w postaci pionowego rdzenia antyfiltracyjnego [36].

Odbudowę wału przeciwpowodziowego uszkodzonego przez zbyt długie przesiąkanie (wymywanie) wód powodziowych przeprowadza się poprzez drenaż u dołu wału, stosując w konstrukcji geomembrany i maty bentonitowe do uszczelniania gruntu pod wałem [42,43].

Wzmocnienie wałów przeciwpowodziowych można wykonać stosując geowłókninę jako warstwę rozdzielającą grunt po stronie powietrza i korpus wału. Oddzielenie warstw przepuszczalnych od spoistych i niespoistych międzywarstw wzmacnia konstrukcję wału, ale także umożliwia podniesienie wału i chroni go przed wymywaniem [18].

Zastosowanie geosyntetyków znajduje również odzwierciedlenie w ochronie brzegów morskich [44]. Konstrukcje ochrony brzegu są uważane za konstrukcje hydrotechniczne, które wpływają na kształt brzegu morskiego, zapewniając jednocześnie jego ochronę. Do takich konstrukcji zalicza się: wały sztormowe, pasy nadbrzeżne, ostrogi, falochrony nadbrzeżne, progi podwodne i wzmocnienia powierzchniowe. Głównym rodzajem materiałów polimerowych stosowanych do tych konstrukcji jest geowłóknina. W budownictwie morskim jest ona stosowana głównie do wzmocniania brzegów jako filtr w wzmocnieniach wyściółki, do rozdzielania warstw o różnych frakcjach, jako worki do wypełniania piaskiem oraz jako maty zabezpieczające przed wymywaniem dna. [45]. Wzmocnienia brzegów morskich, falochrony i ostrogi wykonuje się również z georur (długich cylindrycznych rękawów wypełnionych materiałem płynnym, np. wodą i piaskiem). Woda wypływająca grawitacyjnie pozostawia zwarty blok, który wskutek zagęszczenia staje się osłoną antyfiltracyjną, a także wzmocnieniem. Georura może być rdzeniem konstrukcji ochronnej lub konstrukcją startową, np. dla kamiennego narzutu kamiennego. Ponadto lokalny materiał (np. pobrany z dna) doskonale nadaje się do wypełnienia, co obniża koszty wykonania takiego wzmocnienia. [46].

NAJBARDZIEJ INTERESUJĄCE PRZYKŁADY

W północnych Niemczech w 1973 roku na rzece Eider zbudowano zapórę sztormową. Jej zadaniem była ochrona wybrzeża Morza Północnego przed falami sztormowymi. Z biegiem lat bariera traciła stabilność na skutek rozmywania. W związku z tym w 1993 roku podjęto decyzję o zwiększeniu wytrzymałości i stabilizacji podwodnego zbocza. W tym celu zdecydowano się na zastosowanie pojemników z geowłókniny wypełnionych piaskiem (geobagi). Dzięki stabilizacji bariera zatrzymuje fale do 4 m. Zastosowanie geosyntetyków pozwoliło również na redukcję kosztów. [47].

We Francji w 1974 roku zbudowano pierwszy budynek z wykorzystaniem podwójnej warstwy geomembrany. W ten sposób powstał zbiornik Pont-de-Claix, który miał gromadzić wodę wykorzystywaną do naśnieżania zboczy górskich. Podwójna warstwa geosyntetyki miała być dodatkową ochroną przed przeciekami i naruszeniem stabilności zbocza. Warstwy rozdzielono drenażem. W zbiorniku przeprowadzono monitoring, który w 2004 roku wykazał przeciek w zachodniej części zbiornika. Awarię usunięto poprzez przyklejenie łatki z geomembrany. W 2011 roku przeprowadzono wizualną kontrolę stanu geomembrany. Wizualna kontrola wykazała, że materiał był w dobrym stanie, poza jednym niewielkim uszkodzeniem [48].

W Polsce zapora Białobrzegi została wybudowana w dolinie Narwi i Bugu. Początkową metodą odprowadzania wody z obszaru zapory było drenowanie rurowe z wylotami do rowu obok zapory, które spływało do zbiornika wyrównawczego. Wpływ warunków hydrogeologicznych był niekorzystny i skutkowało podtopieniem i zamulaniem całego układu. W efekcie naprawiono drenaż zapory. W 1994 roku stary układ oczyszczono i wykonano dodatkowe zabezpieczenie w postaci drenażu w osłonie z geowłókniny. Geosyntetyk zastosowano jako filtr i zabezpieczenie drenażu. Po 22 latach przeprowadzono badania nad wpływem zapychania mechanicznego i chemicznego na przepuszczalność wodną geowłóknin. Wyniki wykazały 1,6-krotną redukcję współczynnika przepuszczalności wody w porównaniu z czystą geowłókniną [49].

W San Diego w Kalifornii w 2003 roku ukończono budowę zapory Olivenhaim. Tworzy ona awaryjny zbiornik wody dla miasta. Do budowy ściany frontowej wykorzystano geomembranę i geosiatkę. Ważnym aspektem przy wyborze uszczelnienia była elastyczność ze względu na trzęsienia ziemi występujące w tym rejonie. Geomembrana zapobiega przeciekom i zniszczeniu zapory. Geosiatka zwiększa drenaż [50]. W 2004 roku trzęsienie ziemi o magnitudzie 5,5 w skali Richtera miało miejsce około 100 km od zbiornika. Zapora nie została uszkodzona podczas trzęsienia ziemi, co gwarantuje bezpieczeństwo [51].

W 2006 roku na wschodnim wybrzeżu Malezji wdrożono innowacyjny projekt na plażach Teluk Kalong, Kemaman i Terengganu, aby chronić brzegi morskie przed erozją. W tym celu rury geowłókninowe zostały zanurzone w strefie przybrzeżnej, aby utworzyć podwodne nasypy (groty). Zastosowanym geosyntetykiem była tkana geowłóknina o wysokiej wytrzymałości wypełniona piaskiem. W 2008 roku uruchomiono podobną inicjatywę w celu ochrony linii brzegowej w Pantai Batu Buruk, obejmującą 5-kilometrowy odcinek plaży. Po zakończeniu projektu zaobserwowano poprawę linii brzegowej i zwiększenie powierzchni brzegu [52].

Na rzece Pench w środkowych Indiach zbudowano kanały w celu dostarczania wody do upraw rolnych w regionie Nagpur. Są one podzielone na dwa główne kanały - kanał prawobrzeżny i kanał lewobrzeżny. W latach 80. kanały uszczelniono betonem. Z biegiem lat beton zaczął pękać, powodując przesiąkanie wody i pęcznienie gliny pod uszczelnieniem. Naprężenia wywołane ruchami gruntu spowodowały pęknięcie betonu, dlatego w 2019 roku podjęto decyzję o wyborze geomembrany bitumicznej jako nowego materiału wyściełającego kanał. Geomembrana charakteryzuje się dużą elastycznością i trwałością, a także odpornością na wysokie temperatury. Po tym, jak geosyntetyk okazał się skuteczny w 2022 roku, postanowiono ulepszyć kolejny odcinek kanału również za jego pomocą [53].

W ramach prac mających na celu poprawę ochrony przeciwpowodziowej na Odrze, wzdłuż granicy niemiecko-polskiej, przebudowano 3-kilometrowy odcinek wału przeciwpowodziowego. Celem prac było wzmocnienie wału, aby wytrzymać bardziej ekstremalne warunki powodziowe. Badania gleby poniżej odcinka wału ujawniły stosunkowo głębokie, miękkie warstwy torfu, mułu organicznego i gliny. Warunki te utrudniały stabilizację wału i zwiększały ryzyko jego uszkodzenia podczas powodzi. Aby zapewnić stabilność nasypu, zainstalowano geokratę o wysokiej wytrzymałości. Geokratę umieszczono na ziemi i przykryto glebą [54].

PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Wdrażanie skutecznych, szybkich i ekonomicznych rozwiązań w budownictwie nie wyklucza działu hydrotechniki. Wykonywanie elementów systemów zabezpieczeń w obiektach hydrotechnicznych w postaci materiałów geosyntetycznych sprawdza się doskonale. Geosyntetyki mają szerokie spektrum zastosowań dzięki trwałości, niskim kosztom wytwarzania, możliwości wykorzystania lokalnych materiałów, ale także podniesieniu jakości wykonywanych konstrukcji. Stosuje się je do wzmocnienia podłoża i skarp, rozdzielania gruntów, jako samodzielnie odwodnienia (drenaż), wzmocnienia konstrukcyjne oraz jako zabezpieczenie systemów drenażowych i odwodnieniowych.

Każdy rodzaj materiału geosyntetycznego charakteryzuje się określonymi właściwościami. Duża różnorodność i możliwość pełnienia kilku funkcji jednocześnie utrudniają w tym przypadku dobór odpowiednich materiałów. Obowiązujące normy prawne nieco to ułatwiają, jednak brak konkretnych schematów lub ograniczone doświadczenie projektantów może utrudnić podjęcie decyzji, który materiał sprawdzi się najlepiej. Niemniej jednak stosowane technologie geosyntetyczne dowodzą swojej skuteczności w różnych warunkach.

BIBLIOGRAFIA

- Miyata Y, Bathurst RJ, Miyatake H. Performance of three geogrid-reinforced soil walls before and after foundation failure. *Geosynthetics International*. 2015 Apr;22(4):311-26., DOI 10.1680/gein.15.00014
- Wiewel BV, Lamoree M. Geotextile composition, application and ecotoxicology—A review. *Journal of Hazardous Materials*. 2016 Nov 5;317:640-55., DOI 10.1016/j.jhazmat.2016.04.060
- Sekulić G, Čipranić I. Benefits of Multi-Purpose Hydrotechnical Systems in Urban Areas of Developing Countries, Example od Montenegro. *Procedia engineering*. 2015 Jan 1;117:646-54., DOI 10.1016/j.proeng.2015.08.226
- Cornish GA. Pressurised irrigation technologies for smallholders in developing countries—a review. *Irrigation and drainage systems*. 1998 Aug;12(3):185-201., DOI 10.1023/A:1006037817381
- Tanchev L. Dams and appurtenant hydraulic structures. Boca Raton: CRC Press; 2014 Mar 3.
- Milillo P, Perissin D, Salzer JT, Lundgren P, Lacava G, Milillo G, et al.: Monitoring dam structural health from space: Insights from novel InSAR techniques and multi-parametric modeling applied to the Pertusillo dam Basilicata, Italy. *International journal of applied earth observation and geoinformation*. 2016 Oct 1;52:221-9., DOI 10.1016/j.jag.2016.06.013
- Touze-Foltz N, Bannour H, Barral C, Stoltz G. A review of the performance of geosynthetics for environmental protection. *Geotextiles and Geomembranes*. 2016 Oct 1;44(5):656-72., DOI 10.1016/j.geotextmem.2016.05.008
- Jeon HY, Kim SH, Yoo HK. Assessment of long-term performances of polyester geogrids by accelerated creep test. *Polymer testing*. 2002 Jan 1;21(5):489-95., DOI 10.1016/S0142-9418(01)00097-6
- Allen TM, Bathurst RJ. Characterization of geosynthetic load-strain behavior after installation damage. *Geosynthetics International*. 1994;1(2):181-99., DOI 10.1680/gein.1.0008
- Hufenus R, Rüegger R, Flum D, Sterba J. Strength reduction factors due to installation damage of reinforcing geosynthetics. *Geotextiles and Geomembranes*. 2005 Oct 1;23(5):401-24., DOI 10.1016/j.geotextmem.2005.02.003
- Pinho-Lopes M, Lopes MD. Tensile properties of geosynthetics after installation damage. *Environmental Geotechnics*. 2014 Aug;1(3):161-78., DOI 10.1680/envgeo.13.00032
- Giroud JP. Lessons learned from successes and failures associated with geosynthetics. In: *Proc. of 2nd European Geosynthetics Conference 2002* (Vol. 1, pp. 77-118).
- Liu CN, Yang KH, Ho YH, Chang CM. Lessons learned from three failures on a high steep geogrid-reinforced slope. *Geotextiles and Geomembranes*. 2012 Oct 1;34:131-43., DOI 10.1016/j.geotextmem.2012.05.003
- Jermolowicz P. Geosyntetyki w budownictwie hydrotechnicznym. *Zasady obliczeń i szczegółowe kryteria doboru. Materiały szkoleniowe. Podkarpacka Okręgowa Izba Inżynierów Budownictwa, Rzeszów; 2012*
- Ingold TS, ed. *Geotextiles and geomembranes handbook*. 1st Edition: Elsevier; 2013 Oct 22., ISBN 9781483292625
- Methacanon P, Weerawatsophon U, Sumransin N, Praharn C, Bergado DT. Properties and potential application of the selected natural fibers as limited life geotextiles. *Carbohydrate Polymers*. 2010 Nov 11;82(4):1090-6., DOI 10.1016/j.carbpol.2010.06.036
- Schmalz E, Bötcher P. Märkte und Einsatzgebiete von Geotextilien aus synthetischen Fasern und Naturfasern. *Geo-und Agrartextilien aus Hanffassern—Märkte & Ökonomie Rheine*. 1999;6:99.

18. Mitra BC. Synthetic vs. natural geotextiles. *Textile trends*. 2002;45(8):39-41.
19. Orzeszyna HL, Pawłowski A, Garlikowski DH. Wybrane zagadnienia z zastosowania geosyntetyków w budownictwie wodno-melioracyjnym. Wyd. 1 Wrocław: WUPwW; 2008 Polish [Selected issues in the application of geosynthetics in hydraulic and drainage engineering. 1st edition] ISBN 978-83-60574-45-4
20. Duszyńska A. What is worth knowing about geosynthetics? *Inżynieria morska i geotechnika* 2/2010.
21. Mwasha A. Designing bio-based geotextiles for reinforcing an embankment erected on the soft soil. *Materials & Design*. 2009 Aug 1;30(7):2657-64., DOI 10.1016/j.matdes.2008.10.029
22. Pisarczyk S. Geoinżynieria. Metody modyfikacji podłoża gruntowego. Wyd. 3 Warszawa: Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej; 2020 Polish [Geoengineering. Methods of ground modification. 3rd edition] ISBN 978-83-7814-707-7
23. Sarsby RW, ed. Limited-life geosynthetics. *Geosynthetics in civil engineering*. 2007 Jan 1:244-86., ISBN 978-1-85573-607-8
24. Moszko M. Geosyntetyki w budownictwie. Wyd. 1 Katowice: Advert; 2015 Polish [Geosynthetics in construction. 1st edition] ISBN 978-83648004240
25. Ziegler M. Application of geogrid reinforced constructions: history, recent and future developments. *Procedia Engineering*. 2017 Jan 1;172:42-51., DOI 10.1016/j.proeng.2017.02.015
26. Opyrchał L, Lach S, Bąk A. Wybrane obliczenia w inżynierii wodnej. Wyd. 1 Kraków: Wydawnictwa AGH; 2017 Polish [Selected calculations in water engineering. 1st edition] ISBN 978-83-7464-942-1
27. Szruba M. Geosynthetics Vol. 1. Characteristics and functions according to PN-EN ISO 10318:2007. *Nowoczesne Budownictwo Inżynieryjne*; 2014, 4; 48-51.
28. Browne MA, Galloway T, Thompson R. Microplastic--an emerging contaminant of potential concern?. *Integrated Environmental Assessment & Management*. 2007 Oct 1;3(4), DOI 10.1002/ieam.5630030412
29. Puppala AJ, Banerjee A, Congress SS. Geosynthetics in geo-infrastructure applications. In *Durability of Composite Systems 2020* Jan 1 (pp. 289-312). Woodhead Publishing., DOI 10.1016/B978-0-12-818260-4.00007-7
30. Jermolowicz P. Geosyntetyki- optymalizacja zasad projektowania i wykonawstwa. Materiały szkoleniowe. Warmińsko-Mazurska Okręgowa Izba Inżynierów Budownictwa, Olsztyn/Elbląg; 2016.
31. Stefanishin DV. Simulation of accident scenarios and technogenic emergencies in safety analysis of hydrotechnical structures. *Power Technology and Engineering*. 2002 Jan;36(1):37-40., DOI 10.1023/A:1019641700684
32. Walczak N. Operational evaluation of a small hydropower plant in the context of sustainable development. *Water*. 2018 Aug 22;10(9):1114., DOI 10.3390/w10091114
33. Voicu R, Radecki-Pawlik A, Tymiński T, Mokwa M, Sotir R, Voicu L. A potential engineering solution to facilitate upstream movement of fish in mountain rivers with weirs: Southern Carpathians, the Azuga River. *Journal of Mountain Science*. 2020 Mar;17(3):501-15., DOI 10.1007/s11629-019-5572-y
34. Gajewska B. Application of geosynthetics as anti-erosion protection of slopes. *Materiały Budowlane* 2011; 3.
35. Peroński M. Protection against slope erosion. *Nowoczesne Budownictwo Inżynieryjne* 2016; 5, 82-84.
36. Dąbska A, Pisarczyk SJ, Popielski P. Nasypy budowlane. Wyd.1 Warszawa: Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej; 2022 Polish [Construction embankments. 1st edition] ISBN 978-83-8156-305-5
37. Afrin S, Islam MM, Rahman MM. Adequacy assessment of an urban drainage system considering future land use and climate change scenario. *Journal of Water and Climate Change*. 2021 Aug 1;12(5):1944-57., DOI 10.2166/wcc.2020.369
38. Misiewicz E, Szczepańska J, red. Zalecenia dotyczące stosowania geosyntetyków w odwodnieniach dróg. GDDKiA/IBDIM, Warszawa 2009.
39. Ritzema H, Abdel-Dayem S, El-Atfy H, Nasralla MR, Shaheen HS. Challenges in modernizing the subsurface drainage systems in Egypt. *Agricultural Water Management*. 2023 Oct 1;288:108484., DOI 10.1016/j.agwat.2023.108484
40. e Silva RA, Vidal D. Uni and bi-directional dewatering behaviour of open geotextile containers used for filtration of waste slurries. *Geotextiles and Geomembranes*. 2022 Apr 1;50(2):347-56., DOI 10.1016/j.geotexmem.2021.12.004
41. Almeida MS, Hosseinpour I, Riccio M, Alexiew D. Behavior of geotextile-encased granular columns supporting test embankment on soft deposit. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 2015 Mar 1;141(3):04014116., DOI 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.000125
42. Higo Y, Lee CW, Doi T, Kinugawa T, Kimura M, Kimoto S, Oka F. Study of dynamic stability of unsaturated embankments with different water contents by centrifugal model tests. *Soils and Foundations*. 2015 Feb 1;55(1):12-26., DOI 10.1016/j.sandf.2014.12.009
43. Rapti I, Lopez-Caballero F, Modaressi-Farahmand-Razavi A, Foucault A, Voldoire F. Liquefaction analysis and damage evaluation of embankment-type structures. *Acta Geotechnica*. 2018 Oct;13(5):1041-59., DOI 10.1007/s11440-018-0631-z
44. Domnin D, Burnashov E. Geographical information dataset "Geosynthetics in coastal protection of the South-East Baltic". *Data in Brief*. 2022 Feb 1;40:107693., DOI 10.1016/j.dib.2021.107693
45. Tackley HA, Lake CB, Alimohammadi M. Examining metal migration through geotextiles during dewatering. *Geotextiles and Geomembranes*. 2021 Feb 1;49(1):32-40., DOI 10.1016/j.geotexmem.2020.09.002
46. Ajdukiewicz J, Pilch M. Geopipes in the construction of flood embankments. *Materiały Budowlane* 2013;12, 31-32.
47. Müller WW, Saathoff F. Geosynthetics in geoenvironmental engineering. *Science and technology of advanced materials*. 2015 May 8;16(3):034605., DOI 10.1088/1468-6996/16/3/034605
48. Giroud JP, Gourc JP. The first double geomembrane liner forty years later. In *Proc. 10th International Conference on Geosynthetics*, Berlin 2014.
49. Miszkowska A, Koda E, Krzywosz Z, Król P, Boruc N. Zmiany właściwości filtracyjnych geowłókniny po 22 latach eksploatacji w drenażu zapory ziemnej. *Acta Scientiarum Polonorum. Architectura*. 2016;15(3), ISSN 1644-0633
50. Zornberg JG. Advances on the Use of Geosynthetics in Hydraulic Systems. In *Proceedings of the Nineteenth Geosynthetic Research Institute Conference (GRI-19)*, Geosynthetics Institute, Las Vegas, NV, December 2005 (pp. 14-16).
51. Cazzuffi D, Giroud JP, Scuero A, Vaschetti G. Geosynthetic barriers systems for dams. In *Keynote lecture, 9th International Conference on geosynthetics 2010* May (pp. 115-163).
52. Lee EC, Douglas RS. Geotextile tubes as submerged dykes for shoreline management in Malaysia. *Geotextiles and Geomembranes*. 2012 Feb 1;30:8-15., DOI 10.1016/j.geotexmem.2011.01.003
53. Llinas P, Breul B. Bituminous Geomembrane (BGM) in hot climates for hydraulic construction. In *E3S Web of Conferences 2023* (Vol. 368, p. 02011). EDP Sciences., DOI 10.1051/e3sconf/202336802011
54. Rijk Gerritsen RH, Bezuijen A, Kees Dorst C. Climate change and extreme weather conditions: Applications of geosynthetics securing flood defenses and coastal protection. In *Geosynthetics: Leading the Way to a Resilient Planet 2023* (pp. 291-303). CRC Press., ISBN 9781003386889

Dominika Dąbrowska

Uniwersytet Śląski, Wydział Nauk Przyrodniczych
Będzińska 60, 41-200 Sosnowiec
e-mail: dominika.dabrowska@us.edu.pl

