

Ocena stanu wzmocnienia skarpy składowiska georusztem PEHD po 20 latach eksploatacji

Mgr inż. Agnieszka Kiersnowska, mgr inż. Piotr Osiński, dr hab. inż. Eugeniusz Koda, prof. SGGW
Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie, Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska

Geosyntetyki to wyroby zbudowane z tworzyw sztucznych, które od kilkudziesięciu lat znalazły szerokie zastosowanie w budownictwie i inżynierii środowiska [3, 10, 12, 13]. Jedną z głównych wątpliwości przy stosowaniu tych materiałów na obiektach inżynierskich jest ich trwałość w czasie. Dotychczasowe doświadczenia dotyczące stosowania tych materiałów odnoszą się do okresu około 40 lat, natomiast wymagany czas pracy geosyntetyków jest znacznie dłuższy.

Trwałość geosyntetyków zależy przede wszystkim od rodzaju surowca, z którego je wykonano, odporności na wpływy chemiczne i mikrobiologiczne oraz odporności na uszkodzenia mechaniczne powstałe podczas przechowywania, wbudowania i eksploatacji w planowanym okresie użytkowania [5, 10]. Jeżeli geosyntetyki mają pełnić funkcję zbrojenia, można zastosować odpowiednie współczynniki bezpieczeństwa, aby określić ich wytrzymałość długoterminową. Do wyznaczenia charakterystycznej wytrzymałości długoterminowej należy skorzystać z następującej zależności [2, 4]:

$$R_{B,k} = \frac{R_{B,k0}}{(A_1 \cdot A_2 \cdot A_3 \cdot A_4 \cdot A_5)} \quad (1)$$

gdzie:

- $R_{B,k}$ – charakterystyczna wartość wytrzymałości długoterminowej geosyntetyku,
- $R_{B,k0}$ – charakterystyczna wartość wytrzymałości krótkoterminowej geosyntetyku (5% tolerancji),
- A_1 – współczynnik redukcyjny uwzględniający wpływ odkształcenia podczas pełzania oraz zniszczenie przy pełzaniu,
- A_2 – współczynnik redukcyjny uwzględniający wpływ uszkodzenia podczas transportu, układania oraz zagęszczania,
- A_3 – współczynnik redukcyjny uwzględniający wpływ szwów, złączy i połączeń,
- A_4 – współczynnik redukcyjny uwzględniający wpływ środowiska (odporność na starzenie się w warunkach atmosferycznych oraz odporność chemiczną i mikrobiologiczną),
- A_5 – współczynnik redukcyjny uwzględniający wpływ oddziaływań dynamicznych.

Projektową (obliczeniową) wartość wytrzymałości długoterminowej $R_{B,d}$ oblicza się, dzieląc wartość charakterystyczną wytrzymałości długoterminowej $R_{B,k}$ przez częściowy współczynnik bezpieczeństwa γ_M związany z wytrzymałością strukturalną, tzw. współczynnik bezpieczeństwa materiałowego. Uwzględnia on wszelkie odchyłki w geometrii konstrukcji, a także parametry charakterystyczne geosyntetyku w porównaniu z tymi, które zidentyfikowano w laboratorium [2, 4]:

$$R_{B,d} = \frac{R_{B,k}}{\gamma_M} \quad (2)$$

gdzie:

- $R_{B,d}$ – projektowa (obliczeniowa) wartość wytrzymałości zbrojenia,
- $R_{B,k}$ – charakterystyczna wartość wytrzymałości długoterminowej geosyntetyku,
- γ_M – częściowy współczynnik materiałowy konstrukcji z gruntu zbrojonego elementami odkształcalnymi [4].

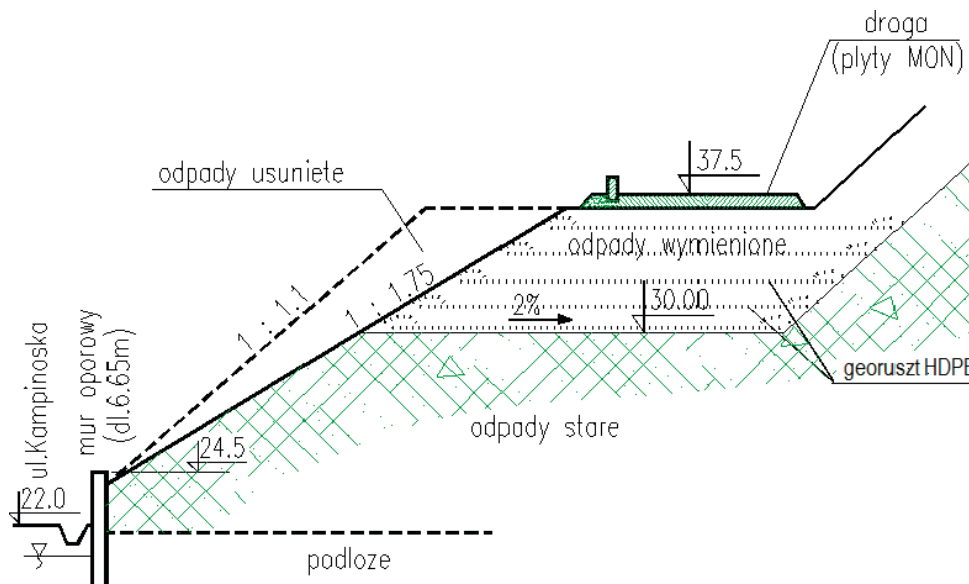
Budowa skarp składowisk odpadów i budowli ziemnych wymaga zastosowania materiałów trwałych i wytrzymałych konstrukcyjnie ze względu na pełnioną funkcję wzmocnienia. Zastosowane geosyntetyki powinny być wytrzymałe na obciążenia i jednocześnie odporne na wpływy środowiska, w którym były użyte. Georuszty PEHD, ze względu na wysoką wytrzymałość i trwałość są stosowane powszechnie do wzmocnienia stromych skarp. Podczas zastosowania georusztów o sztywnych węzłach dochodzi do zazębienia i klinowania się gruntu w oczkach tego geosyntetyku. Grunt przechodzący przez oczka georusztu częściowo zaklinowuje się w przestrzeniach między żebrami, tworząc swoisty rodzaj kotwienia georusztu. Wytrzymałość i sztywność żeber georusztu uniemożliwia przemieszczenie się gruntu na boki, ale może dochodzić wówczas do mechanicznego uszkodzenia geosyntetyku. Właściwe zastosowanie georusztu w gruncie prowadzi do znaczącego zwiększenia nośności gruntu oraz wydłuża okres użytkowania konstrukcji (3).

CHARAKTERYSTYKA OBIEKTU

Składowisko odpadów „Radiowo” o powierzchni około 16 ha i wysokości przekraczającej 60 m n.p.t. jest zlokalizowane przy północno-zachodniej granicy Warszawy. W latach 1961-1991 były na nim składowane odpady komunalne, od 1992 roku był to obiekt technologiczny przyjmujący odpady balastowe z kompostowni, a od 2014 roku składa się na nim tzw. stabilizat, stanowiący odpad poutylizacyjny z regionalnej instalacji Mechaniczno-Biologicznego Przetwarzania Odpadów. Przy wysokich stromych skarpach kluczowym zagadnieniem stało się zapewnienie ich stateczności, dlatego przeprowadzono kompleksowe badania parametrów mechanicznych odpadów i zastosowano różne techniki wzmocnienia, dostosowane do nachylenia, rodzaju odpadów, rezerwy terenu obok składowiska i stanu kształtowania bryły składowiska [7, 9].

W 1993 roku na składowisku rozpoczęto prace rekultywacyjne obejmujące, między innymi, bezpieczne pod względem geotechnicznym kształtowanie bryły składowiska. W celu poprawy warunków stateczności skarpy północnej oraz wykonania konstrukcji podbudowy głównej drogi wjazdowej na składowisko zastosowano mur oporowy, złagodzenie nachylenia skarpy oraz poziome wzmocnienia georusztem jednokierunkowym PEHD (rys. 1). Uzasadnienie dodatkowych wzmocnień na skarpie północnej wynikało z bezpośredniego sąsiedztwa ulicy Kampinoskiej przy podstawie tej skarpy [9].

Głównym założeniem projektu było wbudowanie na składowisku jak największej ilości odpadów. Jednak struktura odpadów nie odpowiadała warunkom materiału właściwego do budowy skarpy pełniącej jednocześnie podbudowę drogi wjazdowej na składowisko, dlatego opracowano specjalną technologię ich wbudowania i zagęszczenia. Na podstawie analizy stanu



Rys. 1. Przekrój projektowy elementów wzmacniających północną skarpe składowiska [9]



Rys. 2. Georuszt PE HD podczas instalacji na składowisku „Radiowo” (1993 rok) [6]

odpadów na składowisku (duża ściśliwość) i utrudnione ich zagęszczenie (odprężenie przy przejściu sprzętu zagęszczającego) podjęto decyzję o konieczności stabilizacji (doziarnienia) odpadów piaskiem. Do jednorazowego zagęszczania układano warstwy odpadów balastowych o miąższości 0,6 m i piasku o miąższości 0,3 m. Zagęszczenie realizowano stosując 10 przejazdów po jednym śladzie walca wibracyjnego okółkowanego umożliwiającego częściowe przemieszczanie odpadów z piaskiem.

Dodatkowymi elementami zabezpieczającymi stateczność skarpy było zastosowanie do wzmocnienia podbudowy drogi 5 warstw georusztu z PEHD (pod każdą wbudowaną nową warstwą odpadów i gruntu) oraz złagodzenie nachylenia skarpy składowiska (rys. 1).

Po każdej zagęszczonej warstwie wbudowanego materiału układano georuszt PEHD w kierunku prostopadłym do osi drogi (rys. 2), stosując zakład minimalny 10 cm dla sąsiednich pasów georusztu. Końce georusztu zawijano do góry i przysypywano piaskiem [9].

BADANIA PARAMETRÓW GEORUSZTU PEHD PO 20 LATACH EKSPLOATACJI

Wytrzymałość charakterystyczna f_k georusztu w kierunku podłużnym, liczona na okres 120 lat w temperaturze 10°C, założona do celów projektowych wynosiła 22,0 kN/m. Wytrzymałość charakterystyczną podaną dla georusztu Tensar SR55 poparto świadectwem zgodności wydanym przez British Board of Agreement [1]. Otrzymaną wartość wytrzymałości charakterystycznej wykorzystano do obliczenia projektowanej wartości wytrzymałości zgodnie z wzorem deklarowanym przez producenta w latach dziewięćdziesiątych [1]:

$$\text{Safe Design Strength} = \frac{f_k}{\gamma_M \cdot \text{Overall Factor of Safety}} \quad (3)$$

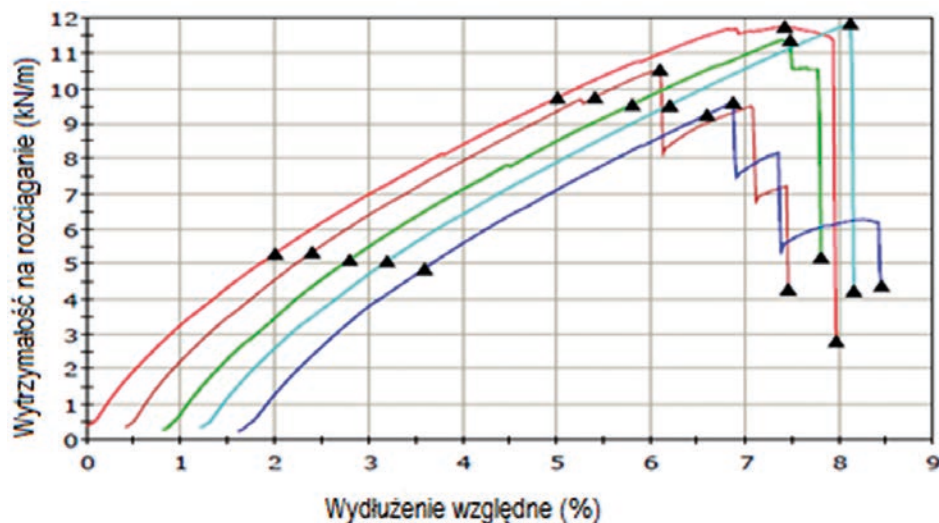
gdzie:

- Overall Factor of Safety – przyjęto wartość deklarowaną przez producenta równą 1,70 (ogólny współczynnik bezpieczeństwa dla frakcji gruntu powyżej 75 mm);
- γ_M – wartość współczynnika materiałowego deklarowana przez producenta 1,35.

Dla zastosowanego materiału otrzymano wartość: Safe Design Strength = 9,61 kN/m.

W celu sprawdzenia aktualnych parametrów mechanicznych georusztu PEHD zainstalowanego w 1993 roku pobrano próbki materiału z miejsca eksploatacji (z podbudowy głównej drogi wjazdowej w sąsiedztwie skarpy północnej składowiska) i wykonano badania wytrzymałości na rozciąganie oraz określono jego wydłużenie względne przy wytrzymałości maksymalnej (rys. 3), a następnie porównano uzyskane wyniki z parametrami mechanicznymi nowego georusztu PEHD (tabl. 1). Badania wytrzymałości georusztu przeprowadzono zgodnie z normą PN-EN ISO 10 319 [11] z wykorzystaniem urządzenia Instron w laboratorium Producenta.

Zgodnie z zależnością (1) po przekształceniu określono wartość ogólną (łącną) współczynników redukcyjnych po 20 latach od wbudowania georusztu:



Rys. 3. Badania wytrzymałości na rozciąganie próbek georusztu PEHD po 20 latach eksploatacji [6]

Tabl. 1. Porównanie parametrów georusztu „nowego” i georusztu po 20 latach eksploatacji

Numer próbki	Próbki przed zabudową (wytrzymałość deklarowana 55 kN/m)		Próbki po 20 latach od wbu- dowania	
	Wytrzy- małość na rozciąganie rzeczywista [kN/m]	Wydłużenie względne przy maksy- malnej wy- trzymałości [%]	Wytrzy- małość na rozciąganie [kN/m]	Wydłużenie względne przy maksy- malnej wy- trzymałości [%]
1	60,77	9,55	52,18	7,41
2	61,68	9,80	46,74	5,69
3	60,79	9,32	50,48	6,68
4	61,45	10,07	52,55	6,92
5	60,28	9,66	42,63	5,28
Wartość średnia	60,99	9,68	48,92	6,40
Odchylenie standardowe	0,57	0,28	4,20	0,89
Współczyn- nik zmienno- ści (%)	0,93	2,89	8,58	13,86

$$(A_1 \cdot A_2 \cdot A_3 \cdot A_4 \cdot A_5) = \frac{R_{B,k0}}{R_{B,k20}} = \frac{57,94}{48,92} = 1,18 \quad (4)$$

gdzie:

$R_{B,k0}$ – przyjęto średnią wartość rzeczywistą = 60,99 kN/m (przy 95% przedziale ufności),

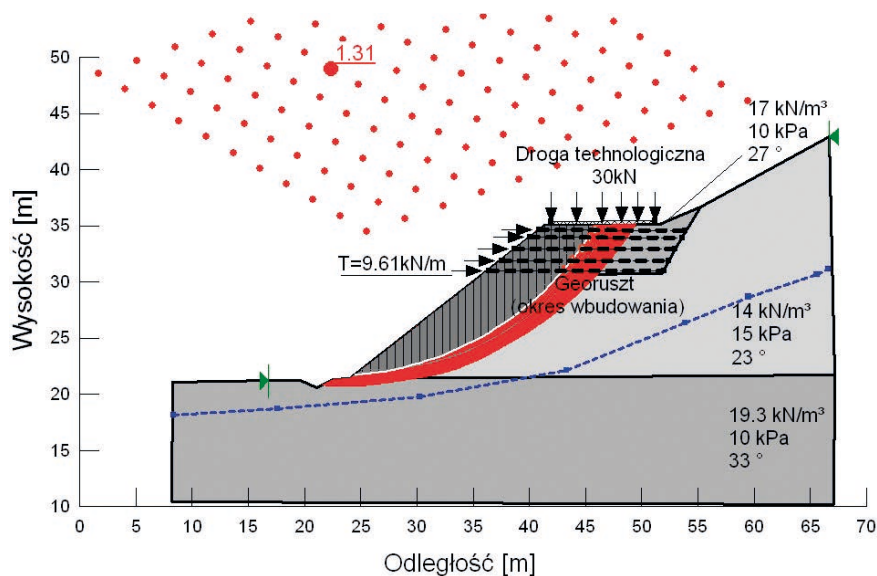
$R_{B,k20}$ – przyjęto średnią wartość wytrzymałości po 20 latach eksploatacji = 48,92 kN/m.

WPŁYW GEORUSZTU PEHD NA WARUNKI STATECZNOŚCI SKARPY SKŁADOWISKA PO 20 LATACH EKSPLOATACJI

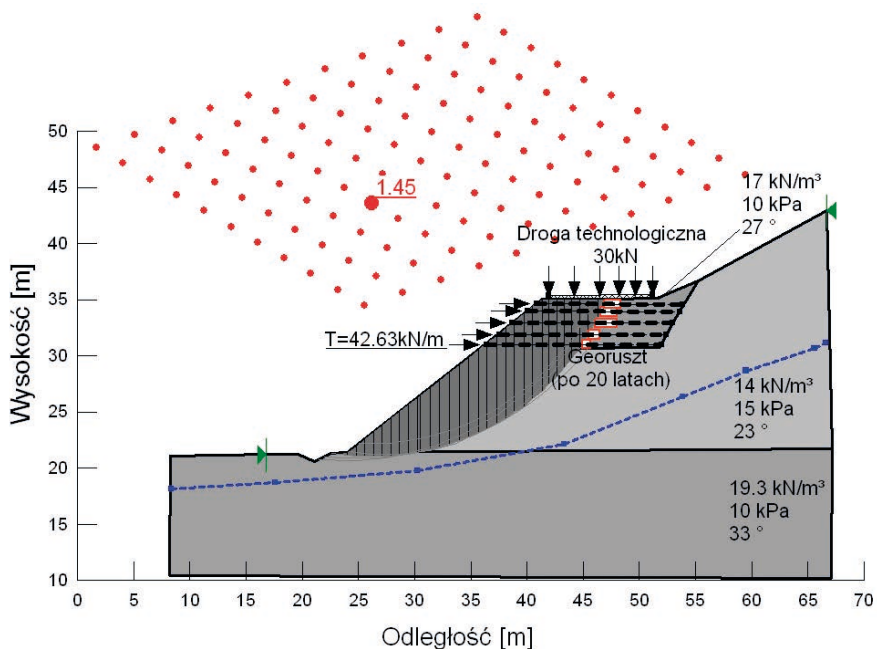
W celu wykonania oceny wpływu zmian wytrzymałości w czasie georusztu na bezpieczeństwo geotechniczne skar-

py składowiska przeprowadzono analizę stateczności skarpy zbrojonej materiałem nowo wbudowanym oraz georusztem pobranym po 20 latach eksploatacji. Na potrzeby wyznaczenia parametrów geotechnicznych na składowisku przeprowadzono szereg badań terenowych materiałów odpadowych oraz gruntów zlokalizowanych w przekroju analizowanej skarpy. W zakres badań wchodziły sondowania statyczne CPT, badania lekką sondą SL oraz sondą wkręcaną WST. Ponadto, w celu weryfikacji wyników otrzymanych na podstawie sondowań, dla bezpośredniej oceny nośności materiału wbudowanego w skarpy wykonano próbne obciążenia na nasypie doświadczalnym i przeprowadzono analizy wsteczne [8]. Zestawienie i porównanie wyników badań terenowych pozwoliły na ostateczną weryfikację parametrów mechanicznych materiału wbudowanego w północną skarpy składowiska. W warunkach początkowych, przed doziarnieniem i zagęszczeniem odpadów, przyjęto parametry odpadów: $\gamma = 14 \text{ kN/m}^3$, $\phi = 20^\circ$, $c = 10 \text{ kPa}$. Dla podłoża gruntowego wartości te wynosiły: $\gamma = 19,3 \text{ kN/m}^3$, $\phi = 33^\circ$, $c = 10 \text{ kPa}$. Przy tak przyjętych parametrach współczynnik stateczności wynosił $F = 1,06$, co oznaczało, że jest konieczne wzmocnienie skarpy. W celu poprawy warunków stateczności analizowanej skarpy zaproponowano takie rozwiązania, jak: wymianę, dogęszczenie i doziarnienie odpadów w podbudowie drogi technologicznej piaskiem i gruzem oraz zbrojenie podbudowy drogi i skarpy pięcioma warstwami georusztu PEHD [9], którego parametry opisano powyżej.

Celem analizy stateczności było nie tylko wyznaczenie współczynnika stateczności analizowanej skarpy, ale również analiza i określenie wpływu zmiennych wartości wytrzymałości na rozciąganie georusztu po 20 latach eksploatacji. Analizy przeprowadzono dla dwóch przypadków (rys. 4 i 5), przy wykorzystaniu programu Slope/W z pakietu GeoStudio 2007. Zadana metoda obliczeniowa wykorzystuje założenia równowagi granicznej (metody pasków) zaproponowanej przez Bishopa. W pierwszym analizowanym przypadku parametry wytrzymałościowe materiału geosyntetycznego przyjęto zgodnie z zaleceniami producenta i wynosiły 9,61 kN/m (wytrzymałość długoterminowa) (rys. 4). W drugim natomiast współczynnik stateczności wyznaczono przy uwzględnieniu rzeczywistej wartości wytrzymałości na rozciąganie pomierzonej bezpośrednio



Rys. 4. Analiza stateczności uwzględniająca wytrzymałość na rozciąganie nowego georusztu PEHD w czasie wbudowania w skarpe



Rys. 5. Analiza stateczności uwzględniająca wytrzymałość na rozciąganie georusztu PEHD po 20 latach eksploatacji

w laboratorium na próbkach pobranych ze składowiska po 20 latach eksploatacji (rys. 5).

PODSUMOWANIE

W artykule dokonano analizy współczynników redukcyjnych zgodnie z najnowszymi zaleceniami EBGeo [4] oraz obliczono wytrzymałość georusztu na rozciąganie zgodnie z założeniami proponowanymi przez producenta w latach dziewięćdziesiątych. Określono średnią wytrzymałość krótkoterminową dla próbek georusztu PEHD, a na podstawie otrzymanych wyników wyliczono ogólną wartość współczynników redukcyjnych po 20 latach od wbudowania na składowisku „Radiowo”. Zastosowany georuszt HDPE ma jeszcze zapas wytrzymałości

na rozciąganie, co powinno zapewnić bezpieczną eksploatację drogi wjazdowej w dalszym okresie eksploatacji.

Poprawiono wartości parametrów geotechnicznych materiału wbudowanego w skarpe, uwzględniając dogęszczenie i doziarnienie odpadów piaskiem i gruzem. Przed wzmocnieniem współczynnik stateczności skarpy wynosił $F = 1,06$, natomiast po wzmocnieniu współczynniki stateczności wynosiły: $F = 1,31$ oraz $F = 1,45$, odpowiednio dla georusztów o wytrzymałości założonej $9,61 \text{ kN/m}$ oraz wartości pomierzonej $42,63 \text{ kN/m}$. Z przeprowadzonej analizy stateczności skarpy wzmocnionej, przy uwzględnieniu parametrów georusztu nowego i ze zredukowaną wytrzymałością na rozciąganie oraz zmienionymi parametrami odpadów (po stabilizacji), uzyskano znaczny wzrost współczynników stateczności skarpy do wartości znacznie wyższych od $1,3$, którą uznaje się za bezpieczną.

LITERATURA

1. Alenowicz J., Judycki J.: TENSAR. Geosiatki Tensar w budownictwie. Gdańsk 1992.
2. Duszyńska A., Szypulski P.: Wymiarowanie wzmocnienia geosyntetycznego podstawy nasypu na słabym podłożu, *Inżynieria Morska i Geotechnika*, nr 3/2012.
3. Duszyńska A.: Dobór wyrobów geosyntetycznych do zbrojenia gruntu, *Inżynieria Morska i Geotechnika*, nr 5/2014.
4. EBGeo: Recommendations for Design and Analysis of Earth Structures using Geosynthetic Reinforcements. Ernst & Sohn Verlag, 2011.
5. Kazimierowicz-Piotrowska K.: Wzmocnienie konstrukcji dróg geosyntetykami, WKiŁ, Warszawa 2014.
6. Kiersnowska A., Koda E., Fabianowski W., Kawalec J.: The impact of chemical and environmental factors on the mechanical parameters of HDPE geogrid, *Proc. of the 7 th Intern. Congr. on Envir. Geot.*, Melbourne 2014.
7. Koda E.: Stability conditions improvement of the old sanitary landfills. *Proc. of the 3th Intern. Congr. on Envir. Geot.*: Vol. I, Lisboa. 1998.
8. Koda E.: Wykorzystanie analizy wstecznej do oceny parametrów odpadów i analizy stateczności starych nadpoziomowych składowisk odpadów komunalnych. *Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Seria Budownictwo*, Zeszyt 97, 2003, 91-100.
9. Koda E. Stateczność rekultywowanych składowisk odpadów i migracja zanieczyszczeń przy wykorzystaniu metody obserwacyjnej. *Rozprawy Naukowe i Monografie Nr 384*. Wydawnictwo SGGW. Warszawa 2011.
10. Maślanka K., Pielichowski J.: Geosyntetyki w inżynierii i ochronie środowiska. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne TEZA. Kraków 2006.
11. PN-EN ISO 10319: Geosyntetyki – Badanie wytrzymałości na rozciąganie metodą szerokich próbek, 2010.
12. Wesołowski A., Krzywosz Z., Brandyk T.: Geosyntetyki w konstrukcjach inżynierskich, Wydawnictwo SGGW, Warszawa 2000.
13. Wysokiński L., Kotlicki W.: Projektowanie konstrukcji oporowych, stromych skarp i nasypów z gruntu zbrojonego geosyntetykami. *Instrukcje Nr 429/2008*. Warszawa 2008.