

Jarosław KRAŻELEWSKI, Ryszard J. IZBICKI

Instytut Geotechniki i Hydrotechniki  
Politechnika Wrocławska

## WPLYW STARZENIA NA ZACHOWANIE GEOSYNTETYKÓW

**Streszczenie.** W pracy przedstawiono wpływ starzenia na zachowanie geosyntetyków. Wykonano obliczenia numeryczne z zastosowaniem modelu opracowanego przez J. Krażelewskiego. Wykorzystano program FLAC, do którego wprowadzono model materiału J. Krażelewskiego. Model ten opisuje zmianę wytrzymałości geosyntetyku w czasie. Parametry materiałowe wykorzystane do symulacji numerycznych uzyskano z badań laboratoryjnych przeprowadzonych przez Li Mengjia [8]. Na podstawie uzyskanych danych określono czas „życia materiału”.

## THE INFLUENCE OF AGING ON THE GEOSYNTHETICS BEHAVIOUR

**Summary.** In this paper the influence of the aging process on the geosynthetics behaviour was presented. The numerical calculations were performed using computer model build by J. Krażelewski. The FLAC software was used into which the model by J. Krażelewski was inserted. The model describes the change of the tensile strength of the geosynthetics over time. Material properties used in the numerical simulation were adopted from the laboratory tests by Li Mengjia [8]. Based on the results “the life time of the material” was specified.

### 1. Wprowadzenie

Starzenie geosyntetyków jest bardzo ważnym czynnikiem, wpływającym na jego zachowanie w czasie, a tym samym zachowanie całej konstrukcji. Wpływ ten często jest zanedbywany przez projektantów, którzy nie zwracają uwagi na projektowany czas „życia konstrukcji”. Dla przykładu, w tabeli 1 podano wymagane czasy „życia konstrukcji”, z użyciem geosyntetyków wg Koermera [7].

Projektując konstrukcje z gruntu zbrojonego wg normy Brytyjskiej [1], projektant zobowiązany jest do sprawdzenia dwóch stanów granicznych. Dobierając jednak materiał geosyntetyczny, często kieruje się tylko I SGN (stanu granicznego nośności), zapominając

o II SGU (stanie granicznym użyteczności). W tabeli 2 przedstawiono dopuszczalne wartości odkształceń konstrukcji zbudowanej z geosyntetyków po zakończeniu budowli (dla całego okresu użyteczności). Dlatego ważne wydaje się rzetelne rozpoznanie czynników wpływających na zmianę wytrzymałości geosyntetyku w czasie [5, 6], uwzględniając wpływ właściwości reologicznych oraz wpływ starzenia.

Tabela 1  
Oczekiwane „czasy życia” geosyntetyków w różnych zastosowaniach w latach [7]

Typ geosyntetyków	drogi / dreny	ściany / zbocza	tamy / tunele	Składowiska odpadów
Geotekstylii/geosiatki	50-100	75-100	100-200	30-1 000
Geomembrany/GCL	nie dotyczy	nie dotyczy	100-200	30-1 000
Geosiatki/Geokompozyty	nie dotyczy	nie dotyczy	100-200	30-1 000

Tabela 2  
Dopuszczalne wartości odkształceń po zakończeniu budowli

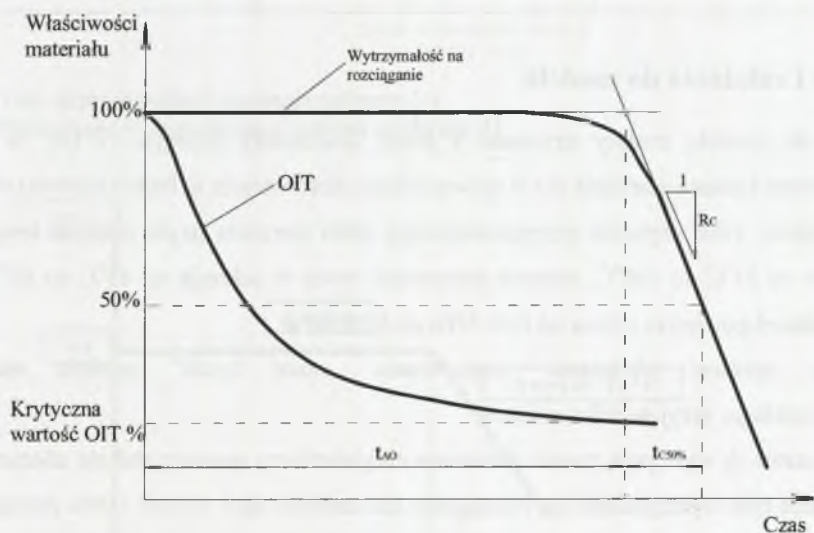
Kraj	Norma	Rodzaj konstrukcji	$\epsilon_{\max}$
Francja	BNSR; Geotekstylii i produkty pokrewne; projekt XP G 38064; pozycja 03/2000	Proste	1,0%
		Normalne	1,0%
		Złożone	0,5%
Wielka Brytania	BS8006:1995; Wzmocnienie/zbrojenie gruntu	Przyczółki mostowe	0,5%
		Ściany oporowe	1,0%

## 2. Degradacja utlenienia

W degradacji utlenienia łańcuch polimerów zachodzi w reakcję z tlenem, zmieniając jego strukturę molekularną (cząsteczkową) i morfologię polimeru [2]. W konsekwencji prowadzi to do przzerwania głównego łańcucha polimeru, redukcji masy cząsteczkowej i w efekcie do redukcji wytrzymałości mechanicznej. Inne efekty to wzrost kruchości, powierzchniowe spękania i zmiana koloru. Utlenianie poliolefinów jest reakcją łańcuchową, której chemia jest złożona, ale całkiem dobrze poznana. Ogólnie przyjmuje się, że główną przyczyną utlenienia materiałów polimerowych jest tworzenie się wolnych łańcuchów rodników, które mogą powstawać w wyniku wzrostu energii promieniowania (promieniowanie ultrafioletowe) albo

w wyniku ogrzania. Reakcja ta może zostać przyspieszona przez katalizatory, takie jak: jony metali ciężkich, łącznie z żelazem (por. PN-EN ISO 13438:2006 [9]).

Szczegółowy opis zachodzącego zjawiska chemicznego przedstawiono w pracy [11]. Aby wydłużyć czas zachodzącej reakcji chemicznej utlenienia w polimerach, a tym samym opóźnić proces degradacji materiału, stabilizuje się go w procesie produkcyjnym (zestawem) pakietem antyutleniaczy. Dokładny skład związków chemicznych znajdujących się w zestawie antyutleniaczy chroniony jest patentami poszczególnych firm. Skuteczność antyutleniaczy zależy od różnych czynników, wliczając w to całkowitą ilość antyutleniaczy w zestawie oraz typy i kombinacje poszczególnych składników, a także temperaturę otoczenia, w której będzie pracował geosyntetyk. Ich zadaniem jest przekształcanie aktywnych substancji, takich jak wolne rodniki i aktywne nadtlenki alkinu, na stabilne cząstki i zapobieganie w ten sposób występowaniu reakcji w polimerze. Zakłada się, że prędkość utlenienia wolnych rodników równa się prędkości utlenienia antyutleniaczy, które cały czas kontrolujemy podczas wykonywania badania. Z tego też względu, ażeby oszacować „czas życia” geosyntetyków, musimy najpierw określić czas zubożenia antyutleniaczy (OIT) (rys.1).



Rys. 1. Typowa krzywa utlenienia dla włókna PP geowłókniny [8]

Fig. 1. A typical oxidation curve for PP geocloth fibre

Ponieważ konstrukcje z gruntu zbrojonego stosowane są na całym świecie, z tego też względu mogą pracować w różnych temperaturach gruntu itp.: w UK temp. określona przez

Departament Transportu w nasypie wynosi  $10^{\circ}\text{C}$ , w Hong Kongu temp. zmierzona w nasypie przez Hoowellsa i Panga [3] na głębokości 3 m wynosiła od  $30$  do  $35^{\circ}\text{C}$ , a we Francuskich Alpach temp. zmierzona w okresie lata w nasypie wynosiła  $30^{\circ}\text{C}$  [12]. W tabeli 3 przedstawiono „czas życia” antyutleniaczy dla różnych temperatur.

Obliczono średni „czas życia” antyutleniaczy w geowłókninie dla temperatury otoczenia na okres 573 miesięcy (47,7 lat). Po czasie tym nastąpi degradacja polimeru (rys. 1).

Tabela 3

Czas życia” antyutleniaczy dla różnych temperatur

Temperatura [ $^{\circ}\text{C}$ ]	Ciśnienie tlenu dla 1 atm [MPa]	„Czas życia” antyutleniaczy $t_{A0}$ [miesiące/lata]
5	0.02	735 / 61
10	0.02	573 / 48
15	0.02	448 / 37
20	0.02	355 / 30
25	0.02	283 / 23
30	0.02	227 / 19
35	0.02	184 / 15

### 3. Dane i założenia do modelu

Dane do modelu zostały uzyskane z pracy doktorskiej Mengjia Li [8]. W pracy przedstawiono badania starzenia dla 4 (powszechnie stosowanych w budownictwie) różnych geosyntetyków. Jako czynnika przyspieszającego efekt starzenia użyto różnych temperatur w zakresie od  $35^{\circ}\text{C}$  do  $105^{\circ}\text{C}$ , różnych temperatur wody w zakresie od  $45^{\circ}\text{C}$  do  $65^{\circ}\text{C}$  oraz różnych ciśnień powietrza i tlenu od  $0,02$  MPa do  $6,30$  MPa.

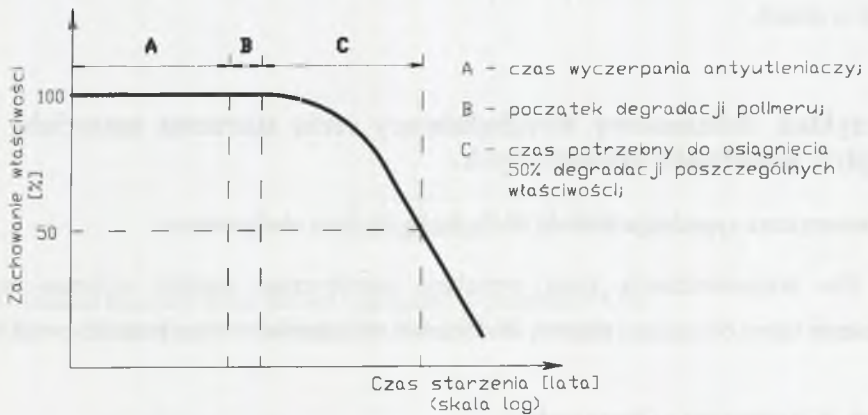
Ażeby uprościć obliczenia oszacowania „czasu życia” modelu materiału J. Kraźelewskiego, przyjęto kilka założeń:

- w stanie A występuje proces zubożenia antyutleniaczy poprzez reakcje utlenienia. W stanie tym wytrzymałość na rozciąganie nie zmienia się i wynosi 100% początkowej wytrzymałości zmierzonej podczas testu rozciągania na szerokich próbkach [10]. Proces degradacji zestawu antyutleniaczy zachodzi zgodnie z reakcją pierwszego rzędu i jest funkcją wykładniczą [5];
- stan B (degradacji) nie występuje w materiale;

- w stanie C zestaw antyutleniaczy jest całkowicie wyczerpany. W stanie tym następuje utlenienie materiału przy stałej prędkości reakcji. Następuje zmiana wytrzymałości materiału na rozciąganie w czasie (efekt starzenia).

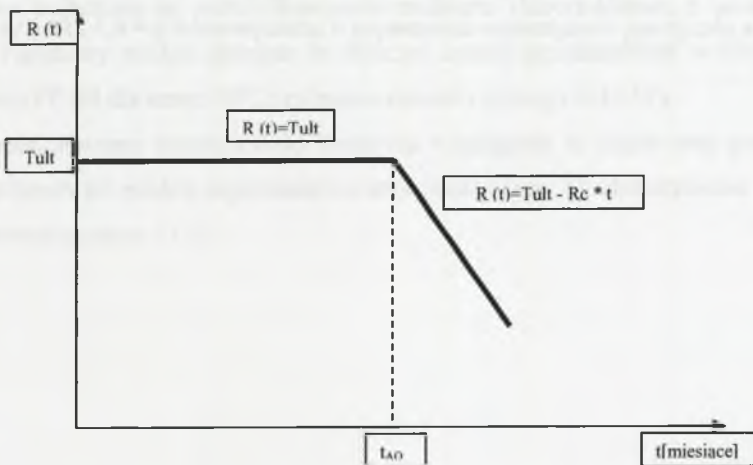
Powyższe założenia zostały zaprezentowane na rys. 2.

Na podstawie badań laboratoryjnych i rozwiązań analitycznych przeprowadzonych przez Li Mengjia [8] określono krzywą nachylenia zmiany wytrzymałości na rozciąganie w czasie, która dla temp.  $10^{\circ}\text{C}$  i ciśnienia atmosferycznego wynosi  $R_c = 0.0032\%$  dziennie.



Rys. 2. Trzy etapy degradacji utlenienia polimeru [4]

Fig. 2. Three stages of degradation of polymer oxidation [4]



Rys. 3. Wytrzymałość materiału na rozciąganie w czasie

Fig. 3. Tensile strength of the material in time

Przyjęto, że wytrzymałość polimeru na rozciąganie od czasu początku degradacji ( $t_{AO}$ ) do „czasu życia materiału” ( $t_{zycia}$ ) zmienia się liniowo, zgodnie ze wzorem (1) (rys. 3).

$$R(t) = T_{ult} - Rc * t \quad (1)$$

gdzie:

$R(t)$  – wytrzymałość materiału na jednoosiowe rozciąganie zmienna w czasie ( $t$ );

$T_{ult}$  – wytrzymałość krótkotrwała materiału na rozciąganie metodą szerokich próbek [10];

$Rc$  – stały współczynnik starzenia [%/dzień], zależy od temperatury i ciśnienia powietrza;

$t$  – czas w dniach.

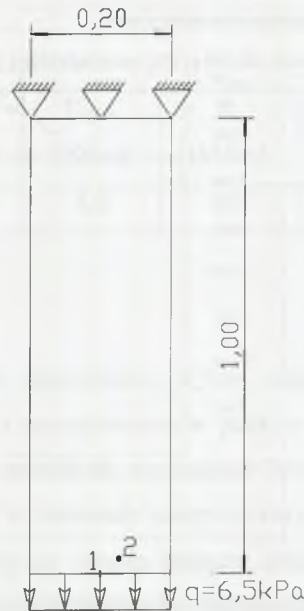
## 4. Przykład obliczeniowy uwzględniający efekt starzenia materiału oraz wpływ właściwości reologicznych

### 4.1. Numeryczna symulacja modelu obciążonego stałym obciążeniem

Do przeprowadzenia testu symulacji numerycznej modelu wybrano płaskie zagadnienie taśmy obciążonej osiowo, obciążeniem rozłożonym o intensywności  $q=6.5$  kPa.

### 4.2. Schemat statyczny zadania (taśmy)

Długość taśmy wynosi 1,0 m, szerokość 0,20 m. Górna krawędź taśmy została unieruchomiona w dwóch kierunkach (poziomym i pionowym), natomiast dolna krawędź taśmy została obciążona, obciążeniem rozłożonym o intensywności  $q = 6,5$  kPa (rys.4).

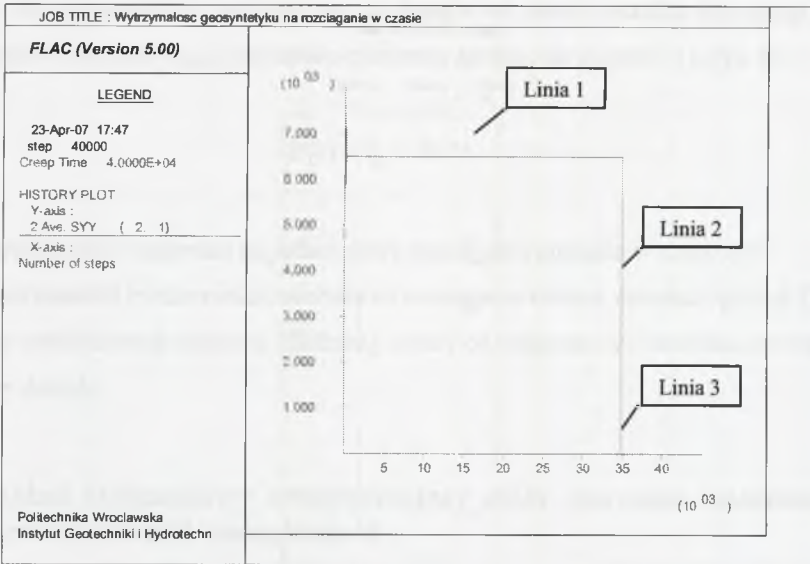


Rys. 4. Schemat statyczny taśmy osiowo rozciąganej w programie FLAC  
Fig. 4. Static scheme of axial stretching of the tape in FLAC program

#### 4.3. Model materiałowy

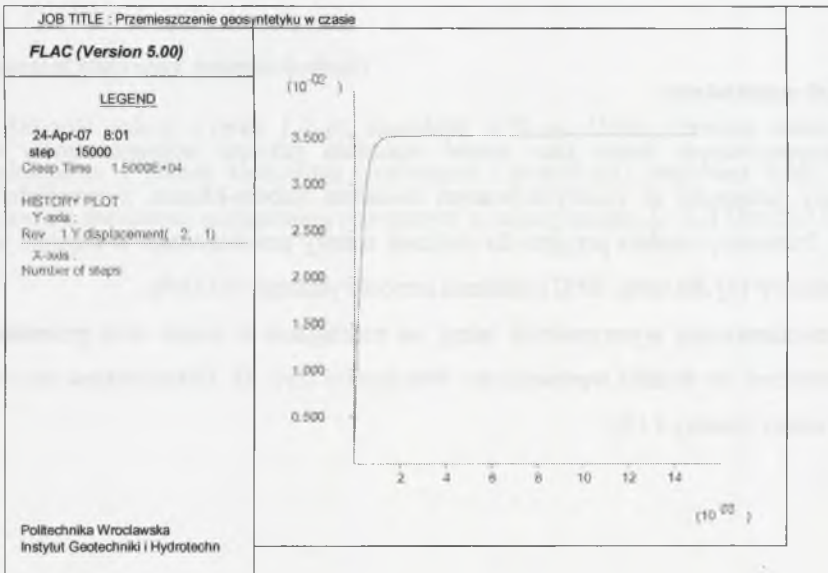
W rozpatrywanym teście jako model materiału przyjęto trójparametrowy model reologiczny, połączony ze zmodyfikowanym modelem Hubera-Misesa, z uwzględnieniem starzenia. Parametry modelu przyjęte do obliczeń zostały przedstawione w tabeli 4 jak dla geowłókniny PP [8] dla temp.  $10^{\circ}\text{C}$  i ciśnienia atmosferycznego 1013 hPa.

W celu monitorowania wytrzymałości taśmy na rozciąganie w czasie oraz przemieszczeń podczas obliczeń do modelu wprowadzono dwa punkty (rys. 4), zlokalizowane przy dolnej krawędzi taśmy (punkty 1 i 2).



Rys. 5. Wytrzymałość geosyntetyku w czasie, z uwzględnieniem wpływu starzenia i właściwości reologicznych

Fig. 5. Geosynthetic's strength in time taking aging and rheological characteristics into account



Rys. 6. Przemieszczenia geosyntetyku w czasie, zgodnie z reologicznym modelem trójparametrowym  $\Delta l = 0,0356$  m

Fig. 6. Geosynthetic's displacement in time according to rheological three-parametric model  $\Delta l = 0,0356$  m



Tabela 4

Parametry materiałowe przyjęte do modelu

$t_{AO}$ [dni]	$R_c$ [%/dzień]	$T_{ult}$ [kN/m]	$T_{120lat}$ [kN/m]	$E_1$ [kN/m]	$E_2$ [kN/m]	$\eta$ [kN*dzień/m]
17 446	0,0032	13	8,0	690	135	14921,25

## 5. Wyniki i wnioski

Rysunki 5 i 6 przedstawiają odpowiednio wykres naprężenia rozciągającego  $R(t)$  w czasie w punkcie 2 oraz wykres przemieszczeń w punkcie 1 dla modelu materiału. Na rys. 5, na osi pionowej zaznaczono naprężenia rozciągające  $R(t)$  w kPa, na osi poziomej czas ( $t$ ) w dniach. Przyrost naprężenia w materiale następuje natychmiastowo (linia 1, rys. 5). Właściwości mechaniczne materiału nie ulegają zmianie, dopóki antyutleniacze występują w materiale. Oznacza to, że dopiero po wyczerpaniu pakietu antyutleniaczy nastąpi utlenienie (degradacja) materiału, a co się z tym wiąże zmiana właściwości mechanicznych materiału. Czas wyczerpania antyutleniaczy obliczono z równania reakcji pierwszego rzędu (por. [6])  $t_{OA} = 17\,446$  dni = około 48 lat.

Po czasie tym nastąpi degradacja PP. Wartość wytrzymałości materiału na rozciąganie będzie z każdym dniem coraz mniejsza. W momencie kiedy naprężenie w materiale przekroczy wartość 6,5 kPa, nastąpi zniszczenie materiału (linia 2, rys. 5) a wartość naprężenia osiągnie 0 kPa (linia 3, rys. 5). W rozpatrywanym teście zniszczenie polimeru nastąpiło ze względu na małą odporność materiału na utlenienie. Za czas życia materiału autor przyjmuje czas jego zniszczenia  $t_{zycia} = 33\,071$  dni (około 90 lat).

Rysunek 6 przedstawia wykres zmiany przemieszczenia w czasie, zgodnie z reologicznym modelem trójparametrowym. Krzywa dąży do poziomej asymptoty w czasie.

Podczas więc projektowania konstrukcji z gruntu zbrojonego, na dłuższy okres (np.:120 lat), należy tak dobrać materiał zbrojący, żeby suma czasu wyczerpania antyutleniaczy w materiale ( $t_{AO}$ ) oraz czasu degradacji wytrzymałości geosyntetyku ( $t_{C50\%}$ ) przekraczała czas użyteczności danej konstrukcji (2).

$$t_{zycia} = t_{AO} + t_{C50\%} \geq t_{uzytkowalnosci} \quad (2)$$

**Literatura**

1. British Standard BS 8006:1995, Code of practice for strengthened/reinforced soils and other fills, British Standards Institution, 1995.
2. Hawkins W.L.: Environmental deterioration of polymers. In: Hawkins W.L. (Ed.) Polymer Stabilization, New York 1972.
3. Hoowells D.J., Pang P.L.R.: Temperature considerations in the design of geosynthetics reinforced fill structures in hot climates. Symposium on the Application of Geosynthetic and Geofibere in South East Asia, Petaling Jaya, Selangor Derul, Ehsan, Malaysia, 1989, p. 1 - 7.
4. Hsuan Y.G., Koerner R.M.: Antioxidant depletion lifetime in high density polyethylene geomembranes. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 1998, p. 532 - 541.
5. Izbicki R.J., Kraźelewski J.: Wybrane właściwości reologiczne geosyntetyków, XXVII Zimowa Szkoła Mechaniki Górotworu – Geotechnika i budownictwo specjalne, Zakopane 2004, p.105 - 114.
6. Izbicki R.J., Kraźelewski J.: Wpływ czasu na właściwości geosyntetyków, Zeszyty Naukowe Politechniki Białostockiej, z.28, 2006, s. 113-125.
7. Koerner R.M.: Designing with Geosynthetics 5<sup>th</sup> edition, Prentice Hall, 1998, p. 796.
8. Li Mengjia: Evaluation of oxidative behavior of polyolefin geosynthetics utilizing accelerated aging tests based on temperature and pressure. Praca doktorska, Drexel University, 2005.
9. PN-EN ISO 13438:2006, Geotekstyli i wyroby pokrewne - Selekcyjna metoda wyznaczania odporności na utlenianie.
10. PN-ISO 10319:1996, Geotekstyli – Badania wytrzymałości na rozciąganie metodą szerokich próbek.
11. Rowe K.R., Sangam H.P.: Durability of HDPE geomembranes. Geotextiles and Geomembranes 20, 2002, p. 77 - 95.
12. Segrestin P., Jailloux J.M.: Temperature in soils and its effect on aging of synthetic materials. Geotextiles and Geomembranes 7, 1988, p. 51 - 69.

*Praca naukowa finansowana ze środków na naukę w latach 2005/2007 jako projekt badawczy.*

Recenzent: Dr hab. inż. Zenon Szypcio, prof. Pol. Białostockiej