

dr inż. Joanna Grzybowska-Pietras^{1)*}

ORCID: 0000-0002-4253-3062

dr inż. Patrycja Antonik-Popiołek¹⁾

ORCID: 0000-0001-5949-8112

mgr inż. Dominika Borecka

Geotextile materials based on sheep wool in erosion control

Materiały geotekstylne na bazie wełny owczej w ochronie przeciwerozylnej

DOI: 10.15199/33.2025.06.16

Abstract: With the increasing demands of a circular economy, the use of natural waste materials is important. This paper discusses the use of Kemafil ropes of biodegradable sheep's wool geotextiles, arranged in a grid as slope erosion protection. The research showed that they serve functions of drainage and retention, storing water in the surface layer of the soil.

Keywords: erosion, drainage, Kemafil rope, sheep wool.

Streszczenie: W obliczu rosnących wymagań dotyczących gospodarki o obiegu zamkniętym ważne jest wykorzystanie naturalnych materiałów odpadowych. W artykule omówiono zastosowanie sznurów Kemafil z biodegradowalnych geowłóknin z wełny owczej, ułożonych w kratownicę stanowiącą zabezpieczenie przeciwerozylnej skarp. Badania wykazały, że pełnią one funkcje drenażową i retencyjną, magazynując wodę w warstwie przypowierzchniowej gruntu.

Słowa kluczowe: erozja, drenaż, sznur Kemafil, wełna owcza.

Progressing civilisational development, urbanisation and expansion of the transport infrastructure are factors that influence transformation of the natural environment both in the spatial as well as and functional aspects. Nowadays, these processes are additionally intensified by progressing climatic changes, which are an important factor shaping geotechnical and hydrological conditions in the ground environment, which is of direct relevance in the case of design, implementation, as well as maintenance of engineering structures.

Particularly important is the current climate change, which in Central Europe manifests itself very frequently in the occurrence of extreme weather phenomena such as heavy rainfall, prolonged droughts or intense snowmelt. An increase in the frequency and intensity of heavy rainfall, prolonged droughts or intense snowmelt leads to a deterioration of the physical and mechanical properties of the soil. The consequences of these phenomena include: surface erosion of soil, leaching of mineral nutrients, lowering of the stability of slopes and transport embankments and degradation of cover vegetation which performs the function of biological anti-erosion protection [1, 2]. In addition, the nature and intensity of erosion processes are significantly influenced by the type of soil and its grain size, hydrological conditions; vegetation cover, as well as the slope and exposure of escarpments and embankments. These changes affect the modification of geotechnical parameters of soils, especially their bearing capacity and susceptibility to settlement, which threaten the durability and safety of engineering structures, especially linear structures (e.g. roads and railways) and hydrotechnical structures, e.g. flood banks [3÷5].

Postępujący rozwój cywilizacyjny, urbanizacja oraz rozbudowa infrastruktury komunikacyjnej to czynniki, które mają wpływ na przekształcenie środowiska naturalnego zarówno w aspekcie przestrzennym, jak i funkcjonalnym. Współcześnie procesy te są dodatkowo intensyfikowane przez postępujące zmiany klimatyczne, które stanowią istotny czynnik kształtujący warunki geotechniczne i hydrologiczne w środowisku gruntowym, co ma bezpośrednie znaczenie w przypadku projektowania, realizacji, a także utrzymania obiektów inżynierskich.

Szczególną rolę odgrywają występujące obecnie zmiany klimatyczne, które w Europie Środkowej objawiają się bardzo często występowaniem ekstremalnych zjawisk atmosferycznych, takich jak ulewne opady, długotrwałe susze, czy intensywne roztopy. Wzrost częstotliwości i intensywności silnych opadów, długotrwałych suszy, czy intensywnych roztopów prowadzi do pogorszenia właściwości fizycznych i mechanicznych gruntów. Konsekwencją tych zjawisk jest m.in.: erozja powierzchniowa gleby, wypłukiwanie składników mineralnych, obniżenie stateczności skarp i nasypów komunikacyjnych oraz degradacja roślinności okrywowej pełniącej funkcję biologicznego zabezpieczenia przeciwerozylnego [1, 2]. Ponadto na charakter oraz intensywność procesów erozyjnych istotny wpływ ma: rodzaj gruntu i jego uziarnienie, warunki hydrologiczne; pokrycie roślinne, a także nachylenie i ekspozycja skarp oraz nasypów. Zmiany te wpływają na modyfikację parametrów geotechnicznych gruntów, szczególnie na ich nośność oraz podatność na osiadanie, co zagraża trwałości i bezpieczeństwu konstrukcji inżynierskich, szczególnie obiektów liniowych (np. drogowych i kolejowych) oraz hydrotechnicznych, np. wałów przeciwpowodziowych [3÷5].

Współczesna działalność człowieka zarówno w wymiarze gospodarczym, jak i społecznym nieodłącznie wiąże się z ge-

¹⁾ Uniwersytet Bielsko-Bialski; Wydział Inżynierii Materiałów, Budownictwa i Środowiska

^{*)} Correspondence address: jpietras@ubb.edu.pl

Contemporary human activity both economically and socially is inextricably linked to the generation of various wastes. The composition, quantity and their properties are determined by the level of technological development and the economic wealth of society. According to current legal regulations, including the Waste Act, special emphasis is now placed on minimising their quantity, reducing their negative impact on the environment and maximising their reusability within a circular economy closed [6]. Industrial waste, and also agricultural waste such as sheep's wool, hemp shive are a valuable source of secondary raw materials that can be used in construction. In connection with this, there is growing interest in technologies that enable their use as components of composite materials or enhancers of the properties of natural materials [7, 8].

The groundworks usually includes reinforcement of weak grounds, using synthetic fibres of different lengths and geometries, is increasingly used in earthworks [9]. This makes it possible to increase the shear strength and increase the modulus of strain of the soil. An alternative to synthetics is natural fibres, including those derived from wool waste, which additionally show biodegradability. Their decomposition biological decomposition leads to the release of components (nitrogen), which support the development of vegetation cover and thus stabilise the soil surface in the long term [10, 11].

Geosynthetics are widely used in earth structures as materials with both mechanical (separation, protection, reinforcement) and hydraulic (filtration, drainage) functions. They are used, among others, in road embankments, escarpments, flood embankments and landfills. In anti-erosion protection they reduce the effects of erosion on escarpments by reducing the velocity of run-off water, minimising the effective impact of raindrops on the soil surface, and also support the development of vegetation by stabilising its moisture content and protecting it from excessive sunlight and temperature spikes [12]. In some conditions the use of geosynthetics can be limited, especially when escarpments require rapid integration with vegetation and long-term protection from intense rainfall. Geotextiles have a separation function, preventing the mixing of layers of materials. Drainage geocomposites enable the effective drainage of water and reduce the risk of overwatering the ground, while geosynthetics increase the safety and durability of engineering structures due to their high strength and resistance to external factors [13, 14].

Numerous engineering concepts are currently being developed to adapt geosynthetics to specific soil and hydrodynamic conditions. Increasing importance is attributed to the use of natural fibres in the structure of engineering materials both as reinforcing additives and components with ecological functions [15, 16].

Natural fibres such as sheep's wool are characterised by favourable mechanical properties and full biodegradability. It is important to manage fibres that are not used in the textile industry and constitute a nuisance agricultural waste. Numerous studies confirm the effectiveness of their use in soil composites, where they improve strength parameters while reducing the risk of cracking [17]. Full biodegradability and annual recyclability make a very promising textile material in the context of sustainable construction [18].

nerowaniem różnorodnych odpadów. Skład, ilość oraz ich właściwości determinowane są przez poziom rozwoju technologicznego oraz zasobność ekonomiczną społeczeństwa. Zgodnie z obowiązującymi regulacjami prawnymi, w tym ustawą o odpadach, szczególnie nacisk kładzie się obecnie na minimalizację ich ilości, ograniczenie negatywnego wpływu na środowisko oraz maksymalizację możliwości ponownego wykorzystania w ramach gospodarki o obiegu zamkniętym [6]. Odpady przemysłowe, a także rolnicze typu wełna owcza, paździerz konopny stanowią cenne źródło surowców wtórnych, które mogą być stosowane w budownictwie. W związku z tym coraz większe zainteresowanie budzą technologie umożliwiające ich wykorzystanie jako komponentów materiałów kompozytowych lub ulepszczy właściwości materiałów naturalnych [7, 8].

W budownictwie ziemnym coraz częściej stosuje się wzmacnianie gruntów słabonośnych przez ich zbrojenie, najczęściej przy użyciu włókien syntetycznych o różnej długości i geometrii [9]. Umożliwia to zwiększenie wytrzymałości na ścianie oraz zwiększenie modułu odkształcenia gruntu. Alternatywę dla tworzyw syntetycznych stanowią włókna naturalne, w tym pochodzące z odpadów wełnianych, które dodatkowo wykazują zdolność do biodegradacji. Ich rozkład biologiczny prowadzi do uwolnienia składników (azotu), które wspomagają rozwój pokrywy roślinnej, a tym samym stabilizują powierzchnię gruntu w długim okresie [10, 11].

Geosyntetyki znajdują szerokie zastosowanie w budowlach ziemnych jako materiały pełniące funkcje zarówno mechaniczne (separacja, ochrona, zbrojenie), jak i hydrauliczne (filtracja, drenaż). Stosuje się je m.in. w nasypach drogowych, skarpach, wałach przeciwpowodziowych oraz składowiskach odpadów. W ochronie przeciwozyjnej ograniczają skutki erozji na skarpach przez zmniejszenie prędkości spływającej wody, minimalizowanie efektywności uderzeń kropel deszczu o powierzchnię gruntu, a także wspomagają rozwój roślinności przez stabilizację jego wilgotności oraz ochronę przed nadmiernym nasłonecznieniem i skokami temperatury [12]. W niektórych warunkach zastosowanie geosyntetyków może być ograniczone, szczególnie gdy skarpy wymagają szybkiej integracji z roślinnością oraz długotrwałej ochrony przed intensywnymi opadami. Geowłókniny i geotkaniny pełnią funkcję separacyjną, zapobiegając mieszanii się warstw materiałów. Geokompozyty drenażowe umożliwiają skuteczne odprowadzanie wody i zmniejszenie ryzyka nadmiernego nawodnienia gruntu, natomiast geosyntetyki zwiększają bezpieczeństwo oraz trwałość konstrukcji inżynierskich dzięki dużej wytrzymałości i odporności na czynniki zewnętrzne [13, 14].

Obecnie rozwijane są liczne koncepcje inżynierskie zmierzające do dostosowania geosyntetyków do konkretnych warunków gruntowych i hydrodynamicznych. Coraz większe znaczenie przypisuje się zastosowaniu naturalnych włókien w strukturze materiałów inżynierskich zarówno jako dodatków wzmacniających, jak i komponentów pełniących funkcje ekologiczne [15, 16].

Włókna naturalne typu wełna owcza charakteryzują się korzystnymi parametrami mechanicznymi oraz pełną biode-

One innovative solution is the use of biodegradable Kemafil ropes (photo 1), whose structural backbone is wastesheep's wool fibres, which act as anti-erosion protection for slopes [19, 20]. Previous studies have shown that these ropes accelerate the greening of slopes, as well as the development of protective vegetation during the seed germination phase and during their growth [10, 28]. Gruchot et al. presented the results of laboratory and field studies evaluating the hydraulic properties of woolly Kemafil ropes as a function of service time. In addition, numerical calculations were carried out to determine the conditions of water flow through these ropes and the process of its infiltration into the soil [29]. The aim of the research was to assess whether, in the initial stage of operation, the Kemafil



Photo 1. View of the Kemafil cord
Fot. 1. Widok sznura Kemafil

Photo: authors
Fot. autorzy

ropes can perform the function of a passive distribution system of water, supporting infiltration and moisture retention in the near-surface zone of the escarpment. The applied solution may favour the acceleration of natural reclamation processes and biological escarpment stabilisation by mechanical loosening of the surface layer of soil and initiation of autogenic plant succession processes.

Material and test stand

The Kemafil ropes with a diameter of 120 mm, made of stitched geotextile from waste sheep wool fibres, were used to protect the slope. The core was reinforced with braided polypropylene yarn with a linear weight of 240 tex, which provides resistance to damage during the installation of the Kemafil ropes on the slope and during the initial phase of their operation (photo 1). Selected physical, hydraulic and mechanical properties of the

gradowalnością. Istotne jest zagospodarowanie włókien, które nie znajdują zastosowania w przemyśle tekstylnym i stanowią uciążliwy odpad rolniczy. Liczne badania potwierdzają skuteczność ich zastosowania w kompozytach gruntowych, gdzie poprawiają parametry wytrzymałościowe, jednocześnie zmniejszając ryzyko spękań [17]. Pełna biodegradowalność oraz możliwość recyklingu w cyklu rocznym powodują, że są bardzo perspektywnym materiałem włókienniczym w kontekście zrównoważonego budownictwa [18].

Jednym z innowacyjnych rozwiązań jest stosowanie biodegradowalnych sznurów Kemafil (fotografia 1), których szkieletem konstrukcyjnym są odpadowe włókna wełny owczej, pełniące funkcję zabezpieczenia przeciwozyjnego skarp [19, 20]. Dotychczasowe badania wykazały, że sznury te przyspieszają zazielenienie zboczy, a także rozwój roślinności ochronnej w fazie kiełkowania nasion i podczas ich wzrostu [10, 28]. Gruchot i in. zaprezentowali wyniki badań laboratoryjnych i terenowych oceny właściwości hydraulicznych wełnianych sznurów Kemafil w funkcji czasu eksploatacji. Ponadto przeprowadzili obliczenia numeryczne w celu określenia warunków przepływu wody przez te sznury i procesu jej infiltracji do gruntu [29]. Celem badań była ocena, czy w początkowym etapie eksploatacji sznury Kemafil mogą pełnić funkcję pasywnego systemu dystrybucji wody, wspomagającego infiltrację oraz retencję wilgoci w strefie przypowierzchniowej skarpy. Zastosowane rozwiązanie może sprzyjać przyspieszeniu procesów naturalnej rekultywacji oraz biologicznej stabilizacji zboczy przez mechaniczne rozluźnienie warstwy powierzchniowej gruntu i inicjację autogenicznych procesów sukcesji roślinnej.

Materiał i stanowisko badawcze

Do zabezpieczenia skarpy zastosowano sznury Kemafil o średnicy 120 mm, wykonane z przesywanej geowłókniny z odpadowych włókien wełny owczej. Rdzeń został wzmocniony opłotem z przędzy polipropylenowej o masie liniowej 240 tex, który zapewnia odporność na uszkodzenia w trakcie instalacji sznurów Kemafil na skarpie oraz w początkowej fazie ich eksploatacji (fotografia 1). Wybrane właściwości fizyczne, hydrauliczne i mechaniczne geowłókniny przesywanej na bazie odpadowej wełny owczej, wykorzystanej do produkcji sznurów Kemafil, przedstawiono w tabeli 1.

Stanowisko badawcze zlokalizowane zostało na terenie Nadleśnictwa Ujszoły, w miejscowości Rycerka Górna (gmina Rajcza, powiat żywiecki, województwo śląskie). Obszar położony jest w Beskidach. Cechuje się silnie zróżnicowaną rzeźbą terenu, dużą sumą opadów rocznych oraz długim okresem zalegania pokrywy śnieżnej, co sprzyja erozji powierzchniowej i powstawaniu osuwisk. Dodatkowym czynnikiem destabilizującym jest niekorzystna budowa geologiczna, szczególnie obecność fliszu karpackiego [26]. Cieki wodne w obrębie zbocza przyczyniają się do erozji skarpy i podmywania drogi leśnej (fotografia 2).

Po przeprowadzeniu analizy makroskopowej gruntów skarpy w Ujszołach, sklasyfikowanych jako grunty ilaste z domieszką frakcji pylastej i zwirowej, w październiku 2018 r. zainstalowano sznury Kemafil w dwóch wariantach [27].

geotextile stitched on the basis of waste sheep wool, used for the production of Kemafil ropes, are presented in Table 1.

The test site was located on the territory of the Ujsolę Forest Inspectorate, in the village of Rycerka Górna (commune Rajcza, żywiecki powiat, voivodeship śląskie). The area is located in the Beskidy Mountains, characterised by strongly varied relief, high annual precipitation and a long period of snow cover, which favours surface erosion and the formation of landslides. An additional destabilising factor is the unfavourable geological structure, especially the presence of the Carpathian flysch [26]. Watercourses within the slope contribute to the erosion of the escarpment and the undercutting of the forest road (photo 2).

Table 1. Properties of the sheep's wool geotextile used in the production of Kemafil ropes

Own work

Tabela 1. Właściwości geowłókniny z wełny owczej zastosowanej do produkcji sznurów Kemafil
Opracowanie własne

Parameter Name/Charakterystyka	Test Result/ Wartość parametru	S/V* [%]	Test Method/ Metoda badania
Mass per unit area/ Masa powierzchniowa [g/m ²]	350,50	32,0/9,9	PN-EN ISO 9864
Thickness/Grubość (2 kPa) [mm]	3,25	0,1/3,9	PN-EN ISO 9863-1
Tensile strength/ Wytrzymałość na rozciąganie [kN/m] • along/wzdłuż • across/w poprzek	4,6 1,3	0,3/6,5 0,1/7,7	PN-EN ISO 10319
Water permeability characteristics normal on the plane, without load/ Wodoprzepuszczalność w kierunku prostopadłym do powierzchni wyrobu bez obciążenia [l/m ² *s]	52	3,3/6,4	PN-EN ISO 11058

* S – standard deviation /odchylenie standardowe, V – coefficient of variation/współczynnik zmienności

After macroscopic analysis of the slope soils in Ujsolę, classified as clay soils with an admixture of silt and gravel fractions, Kemafil ropes were installed in October 2018 in two variants [27]. In the first, they were an anti-erosion protection of the slope as well as a drainage to allow excess water from the slope surface to be discharged into a drainage ditch. The ropes were placed on the slope in the form of a lattice, and at the intersections they were connected with clips. The whole was fixed to the slope surface with 80 cm long steel rods (Figure 1 and Photo 3). In the second variant, the anti-erosion reinforcement of the escarpment consisted of Kemafil ropes wrapped around the steel rods, forming a fascine system.

Research

In order to evaluate selected physical and mechanical properties of the geotextile made from post-production waste sheep wool fibres, the following were tested:

- surface mass according to PN-EN ISO 9864:2007;
- thickness according to PN-EN ISO 98631:2016 (pressure 2 kPa);
- tensile strength according to PN-EN ISO 10319:2015 (Table 1) [21÷23].

W pierwszym stanowiły one zabezpieczenie przeciwoerozyjne skarpy oraz drenaż, umożliwiający odprowadzenie nadmiaru wody z jej powierzchni do rowu melioracyjnego. Sznury rozmieszczone na skarpie w formie kratownicy, a w miejscach przecięcia połączono je opaskami zaciskowymi. Całość przytwierdzono do powierzchni skarpy za pomocą prętów stalowych o długości 80 cm (rysunek 1 i fotografia 3). W drugim wariantcie umocnienie przeciwoerozyjne skarpy stanowiły sznury Kemafil oplecione wokół prętów stalowych, tworzących system faszynowy.

Skarpa została pokryta warstwą gruntu rodzimego, wymieszanego z włóknami wełny owczej o długości 4÷10 mm, pochodzącymi z produkcji dywanów (kompozyt gruntowy)



Photo 2. View of a slope – test site

Photo: authors

Fot. 2. Widok skarpy – stanowisko badawcze
Fot. autorzy

(fotografia 4). Następnie powierzchnię obsiano mieszką traw skarpowych, składającą się z życicy wielokwiatowej (20%), życicy trwałej (20%), wiechlina łąkowej (10%), kostrzewy czerwonej (25%) oraz kostrzewy trzcinowej (25%), w ilości 50 g/m², zgodnie z normą PN-B-12074.

Badania

W celu oceny wybranych właściwości fizycznych i mechanicznych geowłókniny wykonanej z poprodukcyjnych, odpadów włókien wełny owczej badano:

- masę powierzchniową wg PN-EN ISO 9864:2007;
- grubość wg PN-EN ISO 9863-1:2016 (nacisk 2 kPa);
- wytrzymałość na rozciąganie wg PN-EN ISO 10319:2015 (tabela 1) [21÷23].

Badania właściwości hydraulicznych przeprowadzono na pojedynczych próbkach przesztywanej geowłókniny wytworzonej z odpadowej wełny owczej oraz na zestawie pięciu i siedmiu warstw materiału, odwzorowującego średnicę sznura Kemafil.

Zdolność przepływu wody w płaszczyźnie wyrobu geotekstylu definiowana jest jako objętość wody przepływającej równolegle do powierzchni materiału, przypadająca na jednostkę czasu i szerokości próbki, przy zadanym spadku hydrau-

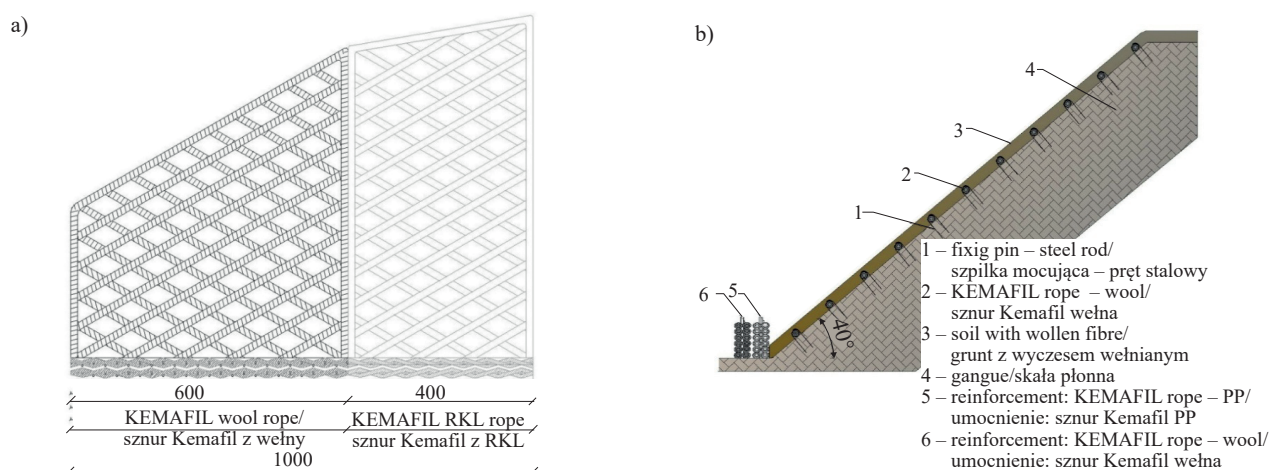


Fig. 1. Sketch of the installation of Kemafile ropes on the slope: a) plane; b) cross section
Rys. 1. Schemat instalacji sznurów Kemafile na skarpie: a) rzut; b) przekrój

Own work
Opracowanie własne

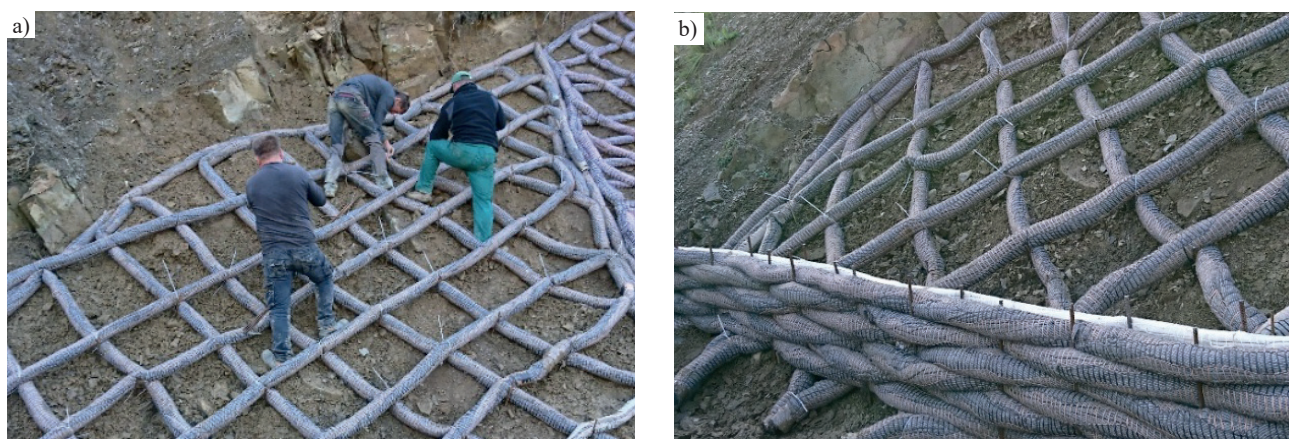


Photo 3. View of the test site during (a) and after installation of the Kemafile cords (b)
Fot. 3. Widok stanowiska badawczego w trakcie (a) i po zainstalowaniu sznurów Kemafile (b)

Photo: authors
Fot. autorzy

Tests of the hydraulic properties were carried out on single samples of stitched geotextile fabric made from waste sheep's wool and on a set of five and seven layers of material, replicating the diameter of the Kemafile rope.

The water flow capacity in the plane of a geotextile product is defined as the volume of water flowing parallel to the surface of the material, per unit time and width of the sample, at a given slope hydraulic and normal pressure [24]. This parameter is an important criterion for assessing the drainage efficiency of geosynthetics used in earth structures, especially in the context of slope stabilisation, drainage systems and anti-erosion protection. It directly affects the efficiency of draining excess water from the contact area of the soil-geosynthetic material, which is of key importance in conditions of increased landslide risk and intense precipitation.

Three samples each were prepared longitudinally and transversely (0.3×0.2 m). They were then saturated with water with wetting agent for 12 h and placed in the measuring apparatus between the contact foams and loaded with a pressure plate. Flow measurements were taken at pressures of 2, 20, 50 and 100 kPa, hydraulic gradients of 0.1 and 1.0 and at water temperatures of 18–21°C. For each system, the volume of water

licznym oraz nacisku normalnym [24]. Parametr ten stanowi istotne kryterium oceny efektywności drenażowej geosyntetyków wykorzystywanych w konstrukcjach ziemnych, szczególnie w kontekście stabilizacji skarp, systemów odwodnieniowych oraz zabezpieczeń przeciwoerozyjnych. Wpływa on bezpośrednio na efektywność odprowadzania nadmiaru wody z obszaru kontaktu grunt-materiał geosyntetyczny, co ma kluczowe znaczenie w warunkach podwyższonego ryzyka osuwiskowego oraz intensywnych opadów atmosferycznych.

Przygotowano po trzy próbki w układzie wzdłużnym i poprzecznym (0,3×0,2 m). Następnie nasycano je wodą z dodatkiem środka zwilżającego przez 12 h i umieszczano w aparacie pomiarowym między piankami kontaktowymi oraz obciążano płytą dociskową. Pomiar przepływu wykonano przy nacisku 2, 20, 50 i 100 kPa, spadku hydraulicznym 0,1 i 1,0 oraz w temperaturze wody 18–21°C. W przypadku każdego układu odnotowano objętość przepływającej wody w ustalonym czasie, a następnie obliczono zdolność przepływu w płaszczyźnie geowłókniny lub warstwie geowłókniny z uwzględnieniem współczynnika korygującego do temperatury 20°C [24].

Zdolność przepływu wody w płaszczyźnie geowłókniny oznaczono ze wzoru [24]:

flowing at a fixed time was recorded, and the flow capacity was then the flow capacity was calculated in the geotextile plane or geotextile layer with correction factor to 20°C [24]. The water flow capacity in the plane of the geotextile was determined from formula [24]:

$$q_{\text{stress/gradient}} = \frac{V \cdot R_T}{W \cdot t}$$

where:

V – average volume [m³]

R_T – correction factor for water temperature of 20 °C

W – sample width [m]

t – time [s] [24].

Test results

The results of tests on the in-plane water flow capacity of a single geotextile layer and geotextile composites made up of five or seven layers of a given geotextile are provided in Tables 2 and 3 and Figures 2 and 3 [25].

Based on the analysis of the results in Figures 2 and 3, it was found that increasing the number of layers of the geotextile increased the value of the filtration coefficient, independently of the measurement conditions ($i = 0.1$; $i = 1.0$) and the applied load. For longitudinal flow at $i = 0.1$ and a load of 2 kPa, the filtration coefficient increased from $0.68 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ (one layer) to $11.39 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ (7 layers).

A similar trend was observed for the transverse direction – with the same parameters, the value of the filtration coefficient increased from 2.86 to $37.58 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$. The increase in vertical

$$q_{\text{stress/gradient}} = \frac{V \cdot R_T}{W \cdot t}$$

gdzie:

$q_{\text{stress/gradient}}$ – zdolność przepływu wody w płaszczyźnie na jednostkę szerokości, przy danym nacisku i spadku hydraulicznym [m²/s];

V – średnia objętość [m³];

R_T – współczynnik korygujący do temperatury wody 20°C;

W – szerokość próbki [m];

t – czas [s] [24].

Wyniki badań

Wyniki badań zdolności przepływu wody w płaszczyźnie pojedynczej warstwy geowłókniny oraz kompozytów geowłókninowych zbudowanych z pięciu lub siedmiu warstw danej geowłókniny zamieszczono w tabelach 2 i 3 oraz na rysunkach 2 i 3 oraz [25].

Na podstawie analizy wyników zamieszczonych na rysunkach 2 i 3 stwierdzono, że zwiększenie liczby warstw geowłókniny wpływa na wzrost wartości współczynnika filtracji, niezależnie od warunków pomiarowych ($i = 0.1$; $i = 1.0$) oraz zastosowanego obciążenia. W przypadku przepływu wzdłużnego przy $i = 0.1$ i obciążeniu 2 kPa współczynnik filtracji zwiększył się z $0.68 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ (jedna warstwa) do $11.39 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ (siedem warstw).

Podobną tendencję zaobserwowano w przypadku kierunku poprzecznego – przy tych samych parametrach wartość współczynnika filtracji zwiększyła się z 2,86 do $37.58 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$. Wzrost obciążenia pionowego z 2 do 100 kPa spowodował znaczne zmniejszenie zdolności przepływu wody w kierunku wzdłużnym do wyrobu. Efekt ten jest wynikiem zmniejszenia grubości materiału

Table 2. Longitudinal water permeability test results for products made from waste sheep's wool in the longitudinal direction (average values of three measurements) [25]

Tabela 2. Wyniki badań wodoprzepuszczalności wzdłużnej wyrobów z odpadowej wełny owczej w kierunku wzdłużnym (wartości uśrednione z trzech pomiarów) [25]

Number of layers/ Liczba warstw	Longitudinal water permeability/ Wodoprzepuszczalność wzdłużna [m ² /s x10 ⁻⁶]							
	i = 0,1 pressure/nacisk				i = 1,0 pressure/nacisk			
	2 kPa	20 kPa	50 kPa	100 kPa	2 kPa	20 kPa	50 kPa	100 kPa
1	0,68	0,32	0,11	0,05	6,86	2,37	0,74	0,34
5	6,45	2,74	0,47	0,31	42,38	17,03	3,32	2,12
7	11,39	4,00	1,36	0,91	108,62	26,51	9,06	4,54

Table 3. Longitudinal water permeability test results for products made from waste sheep's wool in the transverse direction (average values of three measurements) [25]

Tabela 3. Wyniki badań wodoprzepuszczalności wzdłużnej wyrobów z odpadowej wełny owczej, w kierunku poprzecznym (wartości uśrednione z trzech pomiarów) [25]

Number of layers/ Liczba warstw	Longitudinal water permeability/ Wodoprzepuszczalność wzdłużna [m ² /s x10 ⁻⁶]							
	i = 0,1 pressure/nacisk				i = 1,0 pressure/nacisk			
	2 kPa	20 kPa	50 kPa	100 kPa	2 kPa	20 kPa	50 kPa	100 kPa
1	2,86	0,44	0,08	0,06	17,02	2,88	0,49	0,38
5	20,87	5,19	1,99	0,57	149,39	52,62	13,45	3,58
7	37,58	18,62	6,51	1,21	252,13	156,82	45,45	9,14

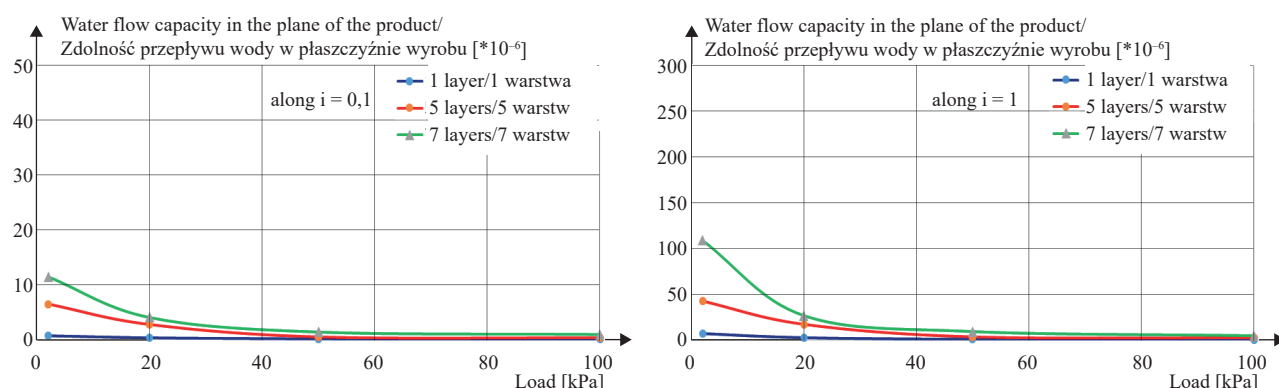


Fig. 2. Water flow capacity of the material, depending on the number of wool geotextile layers, direction of measurement, load and height of the hydraulic column determined in the longitudinal direction Own study

Rys. 2. Zdolność przepływu wody w materiale, w zależności od liczby warstw geowłókniny wełnianej, kierunku pomiaru, obciążenia oraz wysokości słupa hydraulicznego, wyznaczona w kierunku wzdłużnym Opracowanie własne

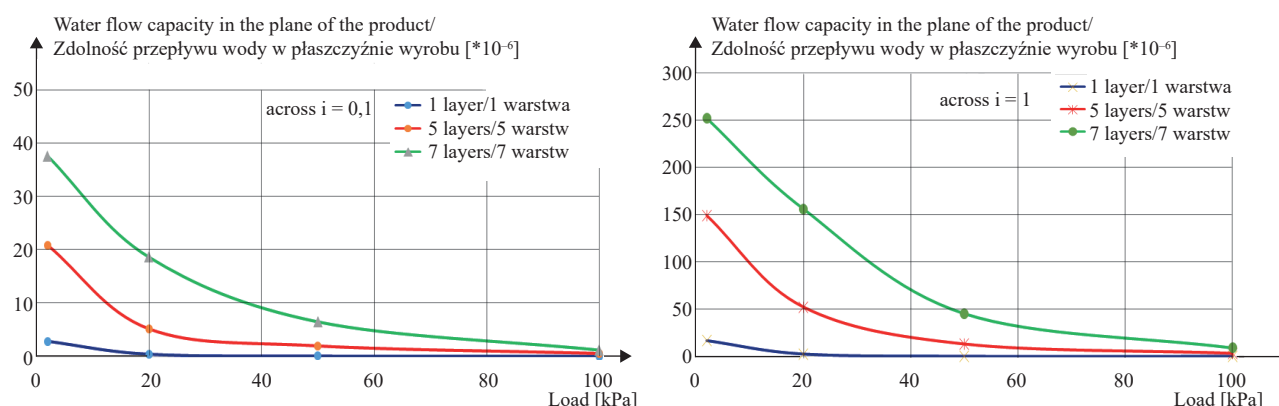


Fig. 3. Water flow capacity of the material, depending on the number of wool geotextile layers, direction of measurement, load and height of the hydraulic column, determined in the transverse direction Own study

Rys. 3. Zdolność przepływu wody w materiale, w zależności od liczby warstw geowłókniny wełnianej, kierunku pomiaru, obciążenia oraz wysokości słupa hydraulicznego, wyznaczona w kierunku poprzecznym Opracowanie własne

load from 2 to 100 kPa resulted in a significant reduction in the ability of water to flow in the longitudinal direction to the product. This effect is the result of a reduction in the thickness of the material and an increase in the apparent density and the resulting reduction in pore volume in the geotextile. On the other hand, increasing the height of the hydraulic column from $i = 0.1$ to $i = 1.0$ resulted in a several-fold increase in the value of the filtration coefficient. In the case of transverse flow in a sample with seven layers at a load of 2 kPa, the longitudinal permeability of the product increased almost sevenfold from $37.58 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ ($i = 0.1$) to $252.13 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ ($i = 1.0$). These results confirm the significant dependence of the flow of water on the difference in hydraulic potential, consistent with Darcy's law.

Summary

The use of Kemafil ropes for erosion protection of slopes and embankments, and as drainage is an innovative solution, beneficial from an ecological and material efficiency point of view. Kemafil ropes manufactured from recycled textile materials perfectly fit in with the ideas of the closed loop economy

oraz zwiększenia gęstości pozornej i wynikającego z tego zmniejszenia objętości porów w geowłókninie. Natomiast zwiększenie wysokości słupa hydraulicznego z $i = 0,1$ do $i = 1,0$ spowodowało kilkakrotny wzrost wartości współczynnika filtracji.

W przypadku przepływu poprzecznego w próbce z siedmioma warstwami przy obciążeniu 2 kPa przepuszczalność wzdłużna wyrobu wzrosła prawie siedmiokrotnie z $37,58 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ ($i = 0,1$) do $252,13 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ ($i = 1,0$). Wyniki te potwierdzają istotną zależność przepływu wody od różnicy potencjału hydraulicznego, zgodną z prawem Darcy'ego.

Podsumowanie

Zastosowanie sznurów Kemafil do zabezpieczenia przeciwozyjnego skarp i nasypów, a także jako drenażu stanowi innowacyjne rozwiązanie, korzystne z punktu widzenia ekologii i efektywności materiałowej. Sznurowy Kemafil produkowane z materiałów tekstylnych pochodzących z recyklingu doskonale wpisują się w idee gospodarki o obiegu zamkniętym oraz zrównoważonego budownictwa. Mogą być stosowane w systemach ochrony przeciwozyjnej, do stabilizacji nasypów, dre-

and sustainable construction. They can be used in anti-erosion protection systems, for stabilisation of embankments, surface drainage and in hydraulic engineering structures. Thanks to their properties they are an alternative to traditional synthetic geotextiles.

nażu powierzchniowego oraz w konstrukcjach hydrotechnicznych. Dzięki swoim właściwościom stanowią alternatywę dla tradycyjnych geowłóknin syntetycznych.

Received: 24.01.2025

Revised: 04.04.2025

Published: 24.06.2025

Artykuł wpłynął do redakcji: 24.01.2025 r.

Otrzymano poprawiony po recenzjach: 04.04.2025 r.

Opublikowano: 24.06.2025 r.

Literature

- [1] IPCC (2023). Climate Change 2023: Impacts, Adaptation and Vulnerability, www.fortomorrow.eu/en/blog/ipcc2022-part-1,
- [2] Modele IMGW-PIB 2024 2024 – podsumowanie klimatologiczne – centrum modelowania meteorologicznego IMGW-PIB,
- [3] Eekhout JPC, De Vente J.; Global impact of climate change on soil erosion and potential for adaptation through soil conservation; *Earth-Science Reviews* 226 (2022), 1–12,
- [4] Kulsrestha S. Effect of climate change on soil erosion: A report; *International Journal of Advanced Research (iJAR)* 11 (02), 2023, 962–980,
- [5] Szruba M. Stabilizacja skarp i zboczy; *Nowoczesne Budownictwo Inżynieryjne*; wrzesień – październik, 2016, 74–78,
- [6] Dz.U.2013 poz.21, Ustawa z 14 grudnia 2012 r. o odpadach,
- [7] Parlato MCM, Porto Simona MC, Valenti F. Assessment of sheep wool waste as new resource for green building elements; *Building and Environment* 225, 2022, 2–10,
- [8] Alyousef R, Ibrahim OA, Aldossari K, Al. Jabr HM. Effect of sheep wool fiber on fresh and hardened properties of fiber reinforced concrete; *International Journal of Civil Engineering and Technology*, Volume 10, Issue 05 May 2019, pp.190–199,
- [9] Pelisser F, Gleize PJP, Montedo ORK, Roman H. Mechanical properties of recycled PET fibers in Concrete, *Materials Research*, 2012, 15 (4), 679–686,
- [10] Chmura D, Salachna A, Broda J, Kobiela-Mendrek K, Gawłowski A, Rom M. Multifunctional geotextiles produced from reclaimed fibres and their role in ecological engineering; *Materials*, 2022, vol.15, iss 22, 1–14,
- [11] Kacoryk P, Starzec K, Kaszycki P, Supel P. The role of biodegradable nonwovens fabrics in efficient sodding of earth structures; *Acta Sci. Pol. Formatio Circumictus* 22 (4) 2023, 37–48
- [12] Gajewska B, Grzegorzewicz K, Kłosiński B, Rychlewski P. Zastosowanie materiałów geosyntetycznych do ochrony skarp przed erozją powierzchniową; 2005, W-wa, archiwum GDDKIA,
- [13] Kiersnowska A, Koda E. Trwałość materiałów geosyntetycznych stosowanych do wzmocnienia gruntów w konstrukcjach drogowych; *Magazyn Autostrady*, 5/2018, 50–53,
- [14] Kazimierowicz-Frankowska K. The individual properties of the selected types of geosynthetics. „Archives of Hydro-Engineering and Environmental Mechanics”, vol. 50, nr 3/2003, 193–205,
- [15] Imanzadeh S, Jarno A, Hibouche A, Bouarar A, Taibi S. Ductility analysis of vegetal-fiber reinforced raw earth concrete by mixture design. *Constr. Build. Mater.* 2020, 239,
- [16] Araya-Letelier G, Concha-Riedel J, Antico FC, Valdés C, Cáceres G. Influence of natural fiber dosage and length on adobe mixes damage-mechanical behavior. *Constr. Build. Mater.* 2018, 174, 645–655,
- [17] Parlato MCM, Cuomo M, Porto SMC. Natural fibers reinforcement for earthen building components: Mechanical performances of a low quality sheep wool (“Valle del Belice” sheep); *Constr. Build. Mater.* 2022, 326,
- [18] Grzybowska-Pietras J, Juzka A, Nguyen G. Wykorzystanie odpadowych włókien syntetycznych i wełny do zastosowań w inżynierii lądowej, *Przegląd Budowlany*, 2019; 10: 81–84,
- [19] Nguyen G, Grzybowska-Pietras J, Broda J. Application of innovative ropes from textile waste as an anti-erosion measure; *Materials*, 2021; 14 (5): 1179, 1–14,
- [20] Broda J, Gawłowski A, Rom M, Laszczak R, Mitka A, Przybyło S, Grzybowska-Pietras J. Innovative geotextiles for reinforcement of roadside ditch. *Tekstilec* 2016, 59, 115–120,
- [21] PN-EN ISO 9864. Geosyntetyki. Metoda badań do wyznaczania masy powierzchniowej geotekstyliów i wyrobów pokrewnych,
- [22] PN-EN ISO 9863-1 Geosyntetyki. Wyznaczanie grubości przy określonych naciskach. Część 1: Warstwy pojedyncze,
- [23] PN-EN ISO 10319 Geosyntetyki. Badanie wytrzymałości na rozciąganie metodą szerokich próbek,
- [24] PN-EN ISO 12958-1 Geotekstyli i wyroby pokrewne – Wyznaczanie zdolności przepływu wody w płaszczyźnie wyrobu – Część 1: Badanie in-deksowe,
- [25] Hutyra D. Zastosowanie sznurów Kemafil do zabezpieczenia przeciwo-erozyjnego skarp, praca inżynierska, Akademia Techniczno-Humanistyczna w Bielsku-Białej, 2019.
- [26] Stopkowicz A, Cała M. Analiza stateczności zboczy zlokalizowanych we fliszu karpackim z zastosowaniem metod numerycznych; *Geotechnika i budownictwo specjalne 2004: XXVII Zimowa Szkoła Mechaniki Górniczo-ru: Zakopane*, 14–19 marca 2004, T. 1/red. Danuta Flisiak, Katedra Geomechaniki, Budownictwa i Geotechniki AGH. Kraków: Wydawnictwo KGBiG AGH, 2004. S. 519–529.
- [27] Nguyen G. Influence of soil specimen preparation and test methods on soil organic matter content; *Polish Journal of Materials and Environmental Engineering*; 2023, vol.6 (26), 57–65.
- [28] Broda J, Gawłowski A. Wpływ wełny owczej na zazielenienie stoków; *Journal of Natural Fibers*, 2020; 17: 820–832.
- [29] Gruchot A, Zydroń T, Cholewa M, Stanisław J. Water Permeability of Kemafil Georopes with a Geotextile Core Made of Wool Waste Based on Laboratory and Field Tests; *Sustainability*; 2024; 16 (21): 9403.