



JAN BRODA¹⁾
ANDRZEJ MITKA²⁾
ANDRZEJ GAWŁOWSKI³⁾

INNOVATIVE TECHNIQUE FOR ROAD SLOPE STABILISATION

INNOWACYJNA TECHNOLOGIA STABILIZACJI SKARP DROGOWYCH

STRESZCZENIE. W artykule opisano badania przeprowadzone w zakresie stosowania innowacyjnej metody stabilizacji i zazieleniania nowo uformowanych skarp drogowych. Do wykonania stabilizacji skarpy wykorzystano ułożone meandrycznie grube sznury wykonane z odpadów tekstylnych, które zostały przykryte warstwą gruntu wymieszanego z losowo rozmieszczonymi włóknami wełnianymi i poliestrowymi. Sznury zainstalowano na skarpie w okresie jesiennym. Hydrosiew wykonano następnego wiosny. Stan skarpy regularnie monitorowano na przestrzeni kilku miesięcy. W początkowym okresie – w miesiącach jesiennych i zimowych – zastosowane sznury w połączeniu ze zbrojeniem rozproszonym gruntu z włókien zmniejszyły niebezpieczeństwo powstania osuwisk i erozji gruntu. Po wykonaniu hydrosiewu system zapewnił nawodnienie niezbędne do kiełkowania nasion. W trakcie wzrostu trawy uwidoczniło się użyźniające działanie związków azotu uwalnianych wskutek biodegradacji włókien wełnianych. W efekcie końcowym uzyskano stabilną powierzchnię skarpy porośniętą wysoką trawą wyhodowaną w stosunkowo krótkim czasie.

SŁOWA KLUCZOWE: erozja gruntu, osuwisko, stabilizacja skarp, sznury kemafilowe, wzmocnienie gruntu, zazielenianie skarp.

ABSTRACT. The paper describes an innovative method for stabilisation and greening of newly formed road slopes. Meandrically arranged thick ropes made from textile waste covered with soil mixed with randomly distributed wool and polyester fibres were applied for stabilisation. The ropes were installed on the slope in autumn. Hydroseeding was performed the following spring. Behaviour of the slope during several months was regularly monitored. In the first period – during autumn and winter – the ropes in combination with fibre-reinforced soil reduced the danger of local landslides and soil erosion. After hydroseeding the system provided water supply needed for seed germination. During grass growth the fertilising effect of nitrogen compounds released as a result of wool biodegradation was revealed. Finally, a stable slope covered with high grass grown in a relatively short time was achieved.

KEYWORDS: erosion, Kemafil ropes, landslide, slope greening, slope stabilisation, soil reinforcement.

DOI: 10.7409/rabdim.020.011

¹⁾ Akademia Techniczno-Humanistyczna w Bielsku-Białej, Instytut Inżynierii Tekstyliów i Materiałów Polimerowych; ul. Willowa 2, 43-300 Bielsko-Biała; jbroda@ath.bielsko.pl (✉)

²⁾ Eurovia Polska S.A., Bielany Wrocławskie, ul. Szwedzka 5, 55-040 Kobierzyce; andrzej.mitka@eurovia.pl

³⁾ Akademia Techniczno-Humanistyczna w Bielsku-Białej, Instytut Inżynierii Tekstyliów i Materiałów Polimerowych; agawlowski@ath.bielsko.pl

1. WPROWADZENIE

Budowa dróg i autostrad jest niezbędnym elementem rozwoju ludzkiej cywilizacji. Zwiększenie mobilności ludności oraz transportu towarów wymaga ciągłej intensyfikacji robót budowlanych oraz nieustającej rozbudowy sieci drogowej. Rozwój infrastruktury drogowej wywiera znaczący wpływ na morfologię terenu i stymuluje znaczące zmiany w otaczającym krajobrazie [1-6]. Budowa dróg zmienia pierwotny profil naturalnych zboczy i często wiąże się z formowaniem nowych sztucznych skarp i nasypów. W początkowym okresie, bezpośrednio po uformowaniu, nowo powstałe zbocza są pozbawione zapewniającej ochronę roślinności naturalnej. Brak roślinności obniża spoiwość i wytrzymałość gruntu na ścinanie, sprzyja odpajaniu się cząstek gruntu od powierzchni wskutek uderzeń kropli deszczu oraz zwiększa ich podatność na erozję wodną. Skutkuje to poważnymi problemami związanymi z erozją wywołaną opadami deszczu, płytkimi ruchami masowymi i/ lub utratą stabilności skarp w głębszych warstwach gruntu [7-8].

Niestabilne skarpy w sąsiedztwie dróg stanowią poważne zagrożenie dla bezpieczeństwa uczestników ruchu drogowego i w znacznym stopniu obniżają trwałość konstrukcji drogowej. Zabezpieczenie niestabilnych zboczy ma kluczowe znaczenie dla utrzymania konstrukcji drogi i przeciwdziałania wypadkom drogowym. W różnych krajach świata do zabezpieczenia skarp i nasypów stosowane są metody biologiczne, inżynieryjne i bioinżynieryjne [9-10].

Powszechną praktyką stosowaną do ochrony skarp nasypów biegnących wzdłuż nowo wybudowanych dróg jest obsiewanie ich trawą. Obsiew wykonuje się zwykle bezpośrednio po zakończeniu robót ziemnych, gdy grunt jest jeszcze sypki. W warunkach klimatu umiarkowanego trawa rośnie szybko, tworząc gęstą ochronną pokrywę gruntu. W wielu przypadkach, siew nasion przynosi zadawalające rezultaty w stosunkowo krótkim czasie, nawet w przypadku stromych zboczy [11-12]. W przypadku, gdy obsiew nasionami trawy jest mało skuteczny do zabezpieczenia niestabilnych skarp mogą być stosowane metody bioinżynieryjne [13-15]. Systemy bioinżynieryjne łączą w sobie elementy mechaniczne i biologiczne, które funkcjonują w sposób zintegrowany, wzajemnie się uzupełniając. W systemach materiały pochodzenia naturalnego są wykorzystywane do budowy konstrukcji, które pełnią funkcje inżynieryjne i stwarzają korzystne warunki dla rozwoju roślinności. Szybko wyrastająca gęsta i bujna pokrywa roślinna zapewnia skuteczną ochronę skarpy. Metody bioinżynieryjne są metodami skutecznymi i tanimi. Prace instalacyjne przeprowadza się bez konieczności wykorzystania ciężkiego sprzętu. Prace można przeprowadzić poza sezonem wegetacyjnym, gdy inne prace inżynieryjne prowadzone są

1. INTRODUCTION

Construction of roads and highways is an indispensable element in the development of human civilisation. In order to increase human mobility and transportation of commodities, construction works are constantly intensified and the worldwide road network is continually expanded. Development of road infrastructure strongly affects terrain morphology and promotes great changes in the surrounding landscape [1-6]. Construction of roads modifies the initial profile of natural slopes and is often connected with formation of new artificial slopes and embankments. In the initial period immediately after formation, new slopes are denuded and devoid of protective natural vegetation. The absence of vegetation reduces cohesion and shear strength of the soil, intensifies soil detachment caused by raindrops and increases susceptibility of soil particles to water erosion. As a result, serious problems of rainfall-induced erosion, shallow mass movement and/or deep-seated slope stability failure are generated [7-8].

Unstable slopes located in the vicinity of roads pose a serious threat to the safety of drivers and reduce the durability of the road structure to a large extent. Protection of unstable slopes is crucial for avoidance of traffic accidents and maintenance of the road structure. Various biological, engineering and bioengineering measures serving this purpose were developed throughout the world [9-10].

A common practice, often used for protection of slopes adjacent to newly constructed roads, is sowing of grass seeds. Seeding is usually carried out immediately after completion of earthworks, when the soil is friable. In temperate climate grasses grow quickly and form a dense protective ground cover. In many cases, dry seeding provides satisfactory results in a relatively short time, even on steep slopes [11-12]. On slopes unstable from soil erosion or shallow slope failure, soil bioengineering methods can be applied [13-15]. In bioengineering systems, mechanical and biological elements are combined to function in an integrated and complementary manner. Vegetative elements are used to construct structures that perform engineering functions and create favourable conditions for the development of plants. Dense and mature vegetation later provides efficient protection of the slope. Soil bioengineering methods are attractive and cost-effective. Installation of soil bioengineering systems does not require the use of heavy equipment. The installation can be performed in the dormant season when other engineering activities are limited. Indigenous plant species, which are usually readily available and well adapted to local climate and soil conditions, are applied for

w ograniczonym zakresie. Do ochrony skarp wykorzystywane są rodzime gatunki roślin, które są zwykle łatwo dostępne i dobrze przystosowane do miejscowych warunków klimatyczno-glebowych. Zastosowanie metod bioinżynieryjnych zapewnia korzystne zmiany krajobrazu i tworzy siedliska sprzyjające rozwojowi fauny.

Metody bioinżynieryjne polegają na wykorzystaniu wiązek faszyny lub przegród wykonanych z materiałów naturalnych. Konstrukcje wykonane z materiałów biologicznych układane są w poprzek skarp, tworząc niskie konstrukcje oporowe oraz bariery mechaniczne, które powstrzymują osuwanie się luźnych cząstek gruntu. Bariery przedzielają powierzchnię zbocza, w wyniku czego utrzymują prędkość spływu powierzchniowego poniżej wartości granicznej, która sprzyjałaby powstawaniu wyżłobień erozyjnych. Jednocześnie, zainstalowane elementy umocnień pełnią rolę drenażu skarpy zapewniającego kontrolowaną trasę spływu wody opadowej oraz miejsca odprowadzenia nadmiaru wilgoci. Bariery mechaniczne pełnią swoją rolę bezpośrednio po instalacji, stanowiąc tymczasowe zabezpieczenie skarp przed powstaniem na niej szaty roślinnej. Zastosowane konstrukcje stwarzają korzystne warunki do kiełkowania nasion i wzrostu siewek, umożliwiając powstanie w pełni rozwiniętej roślinności w stosunkowo krótkim czasie. Funkcje pełnione przez konstrukcje bioinżynieryjne można osiągnąć poprzez zastosowanie geotekstyliów uformowanych z ułożonych meandrycznie grubych sznurów kemafilowych. Sznury tego typu zostały z powodzeniem wykorzystane do rekultywacji zdegradowanych terenów po kopalniach odkrywkowych, do stabilizacji stromego zbocza w nieczynnej żwirowni oraz zabezpieczenia brzegów rowu melioracyjnego [16-20].

We wcześniej realizowanych projektach geotekstyli stosowano również do zabezpieczania skarp oraz rowów odwadniających uformowanych podczas budowy dróg. W niemieckim Chemnitz, geotekstyli wyprodukowane z różnych naturalnych i syntetycznych materiałów tekstylnych zostały ułożone na sztucznym nasypie stanowiącym ekran akustyczny wzdłuż obwodnicy biegnącej wokół centralnej części miasta. Zastosowanie geotekstyliów zapewniło stabilizację nasypu oraz znacznie przyspieszyło jego zazielenienie [21]. W Międzyrzeczu geotekstyli zostały zainstalowane jako obudowa rowu odwadniającego biegnącego wzdłuż nowo wybudowanej drogi. Ułożone sznury utworzyły system poprzecznych mikrotam, które spowolniły spływ wód opadowych i zmniejszyły ich erozyjne oddziaływanie na brzegi rowu [22]. Podczas badań prezentowanych w niniejszej pracy geotekstyli wykonane z meandrycznie ułożonych grubych sznurów obsypane gruntem zmieszanim z włóknami odpadowymi zastosowano do zabezpieczenia skarpy ukształtowanej w trakcie

protekcji. The application of bioengineering methods provides improved landscape and creates beneficial habitat for the development of wildlife.

In bioengineering methods brush, wattles or fences from vegetative materials are used. Structures built from biological materials are installed across the slopes to form small retaining walls and mechanical barriers to retain the loose soil particles. The barriers break the slope length to keep the runoff velocity below the limit value that would promote formation of erosion rills. Simultaneously, the installed elements act as drains to provide a preferred flow path for water and drain sites for excess moisture. The barriers act immediately after installation and protect the slopes temporarily before the vegetation is planted. The installed constructions provide favourable conditions for seed germination and plant growth, enabling development of mature vegetation in a relatively short time.

The functions performed by bioengineering constructions can be achieved by application of geotextiles formed from meandrically arranged thick Kemafil ropes. The ropes were successfully used for reclamation of degraded land left after the closure of open-cast mines, stabilisation of a steep slope in an abandoned gravel pit and protection of banks of a drainage ditch [16-20].

In previous projects, the geotextiles were also applied for protection of slopes and ditches formed during road construction. In Chemnitz (Germany), geotextiles produced from various natural and synthetic textile materials were installed on an artificial embankment serving as a noise barrier beside the ring road built around the city centre. The geotextiles provided stabilisation of the embankment and significantly accelerated its greening [21]. In Międzyrzecze (Poland) the geotextiles were installed as lining in a road-side ditch. The installed ropes formed a system of transverse micro-dams, which decelerated the stream of water and reduced its erosive impact on the ditch banks [22]. During the presented investigations, geotextiles made from meandrically arranged thick ropes coupled with fibre soil reinforcement were used for protection of a slope shaped during road construction. The effect of the system on slope stabilisation and greening as well as its functionality in subsequent stages of operation are analysed in the paper.

2. MATERIALS AND METHODS

2.1. SITE CHARACTERISTICS

The geotextiles were installed on an embankment shaped during construction of a new road in Wapienica in the

budowy drogi. Podczas badań analizowano wpływ zastosowanego systemu na stabilizację i zazielenienie skarpy oraz jego funkcjonalność w kolejnych etapach eksploatacji.

2. MATERIAŁY I METODY

2.1. CHARAKTERYSTYKA TERENU OBJĘTEGO BADANIEM

Geotekstylią ułożono na nasypie uformowanym podczas budowy drogi w Wapienicy, zachodnich przedmieściach Bielska-Białej. Teren zlokalizowany jest na przedgórzu Beskidu Śląskiego i posiada współrzędne geograficzne 49°48' N i 18°58' E. W ramach budowy nowej drogi zbudowano wiadukt nad torami kolejowymi wraz z drogami dojazdowymi poprowadzonymi na świeżo uformowanych nasypach. Po obu stronach drogi uformowano nowe strome skarpy o nachyleniu 1:1,5 schodzące do naturalnego poziomu terenu. Zgodnie z dokumentacją projektową, większość skarp zabezpieczono matami antyerozyjnymi. Do badań wydzielono odcinek skarpy o długości 40 m. Teren objęty badaniami był zlokalizowany przy łączniku łączącym nowo wybudowaną drogę z istniejącą siecią dróg lokalnych. W miejscu włączenia łącznika do drogi głównej wysokość skarpy była maksymalna i wynosiła około 12 m nad poziomem terenu. W miarę wzrostu odległości od skrzyżowania wysokość skarpy stopniowo malała, zrównując się ostatecznie z pierwotnym poziomem terenu. Na terenie objętym badaniami długość skarpy mierzona wzdłuż jej powierzchni zmniejszała się z 10 m do 4 m.

2.2. MATERIAŁY

Do zabezpieczenia skarpy zastosowano geotekstylią uformowane z grubych sznurów wykonanych z włókien ponownych pozyskanych w wyniku rozdrabniania pokonsumenckich odpadów tekstylnych. Sznurowo o średnicy 100 mm posiadały opłot z cienkiego sznurka polipropylenowego. Sznurowo ułożono w układzie meandrowym segmentami o szerokości 2 m i długości dopasowanej do długości zbocza. Kolejne zwoje sznurów w poszczególnych segmentach połączono pięciorami regularnie rozmieszczonymi łańcuchami wykonanymi ze sznurka polipropylenowego. Grunt wzmocniono odpadami wełnianymi pochodzącymi z garbarni, wełną o niskiej jakości zestrzyżoną z owiec z lokalnej hodowli oraz włóknami poliestrowymi pochodzącymi z recyklingu butelek.

2.3. MONTAŻ GEOTEKSTYLIIÓW

W celu zabezpieczenia skarp segmenty geotekstyliów rozłożono na powierzchni. Sznurowo zakotwiono w koronie skarpy, a następnie przytwierdzono do podłoża przy pomocy stalowych szpilek. Szpilki wbijano ręcznie na głębokość 40 cm. Geotekstylią przykryto warstwą gruntu zmieszanego

western suburbs of Bielsko-Biala in southern Poland. The site is located at 49°48' N and 18°58' E in the foothills of the Silesian Beskids mountain range. As a part of the new road, a viaduct over a railway track was built with access roads constructed on freshly formed embankments. As a result, new steep slopes with an inclination of 1:1.5 reaching the level of native ground were shaped on both sides of the road. In accordance with the design documentation, the majority of slopes were protected with anti-erosion mats. Apart of the slope with the length of 40 m was separated for investigations. The site was located at the link connecting the newly constructed road with the existing municipal road network. In the place where the link was connected with the main road, the height of the slope was maximal, ca. 12 m above the ground. Further from the crossing the height of the slope gradually decreased, until it reached the original ground level. In the experimental site, the slope length measured along the surface decreased from 10 m to 4 m.

2.2. MATERIALS

Geotextiles formed using thick ropes made from non-woven material manufactured from recycled fibres obtained by shredding of post-consumer textile waste were applied for protection of the slope. The ropes with a diameter of 100 mm were wrapped with a sheath made from thin polypropylene twine. The ropes were arranged in a meandering pattern. Segments with the width of 2 m and the length fitted to the length of the slope were prepared. The subsequent turns of ropes in segments were connected with five regularly spaced chains made from polypropylene three-wire twine. The soil was reinforced with wool waste from a tannery, poor quality wool sheared from local sheep and polyester fibres (PTE) obtained from recycled bottles.

2.3. INSTALLATION OF THE GEOTEXTILES

To protect the slope, the segments of geotextiles were spread on its surface. The ropes were anchored in the crown of the slope and fastened to the surface with steel pins. The pins were hand-hammered to the depth of 40 cm. The geotextiles were covered with a layer of soil mixed with wool and PTE fibres. For covering, locally available clayey (C) and agricultural soils (AS) were applied. Mixtures of soils with fibres were prepared separately using a road recycler machine (Fig. 1). The geotextiles were covered with topsoil according to the layout presented in Table 1. The soil was used to fill the space between the ropes and form a thin covering layer with a thickness of 1-3 cm. Finally, the topsoil layer was compacted using the excavator bucket.

Table 1. Schematic layout of the experimental plots
 Tablica 1. Schematyczny układ poletek doświadczalnych

Plot / Poletko	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Soil / Gleba ^{*)}	AS / GU	AS / GU	C / G	C / G	C / G	AS / GU	AS / GU	C / G	C / G	AS / GU
Wool / Wełna [%] ^{**)}	0.25 ^{***)}	0.25 ^{***)}	0.25	0.25	–	–	0.1	0.1	0.25	0.25
PTE [%]	–	–	–	–	–	–	0.1	0.1	0.25	0.25

^{*)} agricultural soil (AS); clay (C) / gleba uprawna (GU); glina (G)
^{**)} fibre content by weight / wagowa zawartość włókien
^{***)} tannery wool / wełna stanowiąca odpad garbarski



a)



b)

Fig. 1. Installation of the geotextiles: a) mixing of soil with fibres using a road recycler, b) covering of the geotextiles with the fibre-reinforced soil

Rys. 1. Montaż geotekstyliów: a) wykonywanie mieszanki gleby z włóknami przy użyciu recyklera drogowego, b) obsypywanie geotekstyliów gruntem zbrojonym włóknami

z włóknami wełnianymi oraz poliestrowymi. Wykorzystano lokalnie dostępny grunt gliniasty oraz ziemię z pól uprawnych. Mieszanki gruntu z włóknami przygotowano przy użyciu recyklera drogowego (Rys. 1). Geotekstylia pokryto warstwą gruntu zgodnie ze schematem przedstawionym w Tabl. 1. Grunt użyto do wypełnienia przestrzeni pomiędzy sznurami oraz utworzenia cienkiej warstwy okrywowej o grubości 1-3 cm. Na zakończenie instalacji warstwą gruntu zagęszczono łyżką koparki.

Montaż geotekstyliów przeprowadzono w ostatnich dniach listopada 2018 r, pod koniec polskiego okresu wegetacyjnego. W kwietniu 2019 roku na skarpie przeprowadzono hydrosiew wieloskładnikową mieszanką zawierającą mulcz celulozowy, dodatki organiczno-mineralne, biostymulator, hydrożel polimerowy w proszku, nawóz oraz mieszankę nasion sześciu gatunków traw.

2.4. METODY POMIAROWE

Po instalacji sznurów stan skarpy był regularnie monitorowany. Stan powierzchni skarpy oraz stopień jej zazielenia oceniano wizualnie. Jednocześnie dokonywano regularnych

The installation of the geotextiles was performed in late November 2018, at the end of the Polish growing season. In April 2019 the slope was hydroseeded with a multi-component mixture containing cellulose mulch, organic and mineral supplements, biostimulator, polymeric hydrogel powder, fertiliser and a seed mixture of six grass species.

2.4. MEASUREMENT METHODS

After installation of ropes, the condition of the slope was regularly monitored. The state of the slope and the progress of grass growth was evaluated visually. The height of grass was regularly measured and its colour was assessed. The measurements were performed at 10 points per plot, evenly distributed over its entire surface. For each experimental plot, the mean value and the 95% confidence interval were determined.

3. TEST RESULTS

3.1. THE PERIOD PRECEDING THE DEVELOPMENT OF VEGETATION

In the first weeks following the installation, subsequent turns of the ropes formed a system of dams, which prevented local

pomiarów wysokości trawy oraz oceniano jej wybarwienie. Pomiary prowadzono w dziesięciu punktach każdego poletka doświadczalnego rozmieszczonych równomiernie na powierzchni skarpy. Dla każdego poletka wyznaczono wartość średnią z pomiarów oraz 95% przedział ufności.

3. WYNIKI BADAŃ

3.1. OKRES POPRZEDZAJĄCY ROZWÓJ POKRYWY ROŚLINNEJ

W pierwszych tygodniach po montażu kolejne zwoje sznurów tworzyły system zapór, które zapobiegały miejscowemu grawitacyjnemu osuwaniu się gruntu. W tym czasie włókna wprowadzone do gruntu wspomagały działanie sznurów. Wspólne działanie sznurów i włókien zapobiegło osuwaniu się cząstek gruntu słabo związanych z gruntem rodzimym. Cząstki gruntu stopniowo osiadały w przestrzeniach pomiędzy ułożonymi na skarpie sznurami. Wraz z wyeliminowaniem osuwania się płytkich warstw gruntu, sznury zapewniły ochronę zbocza przed erozją wywołaną spływem wód powierzchniowych. Podczas jesiennych opadów, sznury spowolniły spływ wody ze skarpy i skutecznie ograniczyły transport cząstek gruntu odrywanych przez krople deszczu z powierzchni zbocza.

W tygodniach zimowych skarpa była pokryta warstwą śniegu. Na wiosnę przed rozwojem szaty roślinnej, powierzchnia skarpy pozostawała równa i nie wykazywała żadnych oznak zniszczenia. Porównanie stanu powierzchni skarpy z okresu poprzedzającego zimę i po jej zakończeniu nie wykazało żadnych widocznych różnic (Rys. 2).

3.2. KIEŁKOWANIE NASION

Wiosną, po ustaniu wiosennych przymrozków, wykonano hydrosiew skarpy. W kolejnych tygodniach rozpoczęło się kiełkowanie nasion. W tym czasie, w okresie największego zapotrzebowania na wodę niezbędną do kiełkowania nasion ustały wiosenne opady i rozpoczął się trzytygodniowy okres bezdeszczowy (Rys. 3).

W tym okresie woda zmagazynowana w sznurach podczas roztopów oraz wiosennych opadów była stopniowo uwalniana do gruntu. Dzięki przewodności hydraulicznej sznurów, woda była transportowana do podstawy skarpy i rozprowadzana skutecznie i równomiernie na całej jej powierzchni. Sznury zapewniły wysoki poziom wilgotności gleby i dostarczyły wodę w ilości potrzebnej do kiełkowania nasion. Pomimo braku opadów, nasiona traw wysiane na skarpie kiełkowały bez konieczności dodatkowego nawadniania. Po kilkunastu dniach na skarpie pojawiły się pierwsze siewki traw. Korzystny wpływ zamontowanego systemu na kiełkowanie nasion oraz

gravity landslides of covering soil. Simultaneously, the fibres embedded in the covering soil supported the action of the ropes. As a result, movement of soil particles integrated poorly with the native ground was avoided. Soil particles gradually settled in the space between the ropes. Simultaneously with elimination of shallow gravity landslides, the ropes protected the slope against surface water erosion. During autumn rains, the ropes slowed down the water flow and successfully reduced transport of soil particles detached by raindrops from the surface of the slope.

In the following winter weeks the slope was covered with a layer of snow. Then, during several spring weeks, before the vegetation developed, the surface of the slope remained even and showed no signs of failure. Upon comparison of the surface of the slope before and after the winter, no differences can be observed (Fig. 2).



Fig. 2. The protected slope: a) before winter (November 2018), b) after winter (March 2019)

Rys. 2. Zabezpieczona skarpa: a) przed okresem zimowym (listopad 2018), b) po okresie zimowym (marzec 2019)

na wczesny wzrost trawy widoczny był poprzez porównanie zabezpieczonej skarpy z innymi jej fragmentami usytuowanymi w pobliżu. W miejscach zabezpieczonych matami przeciwozryjnymi brak wilgoci praktycznie całkowicie uniemożliwił kiełkowanie nasion. Po wykonaniu hydrosiewu, większość nasion szybko wyschła i nie wykiełkowała. Niewielki odsetek nasion ukrytych w nierównościach gleby wykiełkował dopiero po kilku tygodniach. Po kilku tygodniach w tych miejscach pojawiła się niewielka ilość rzadko rozmieszczonych siewek.

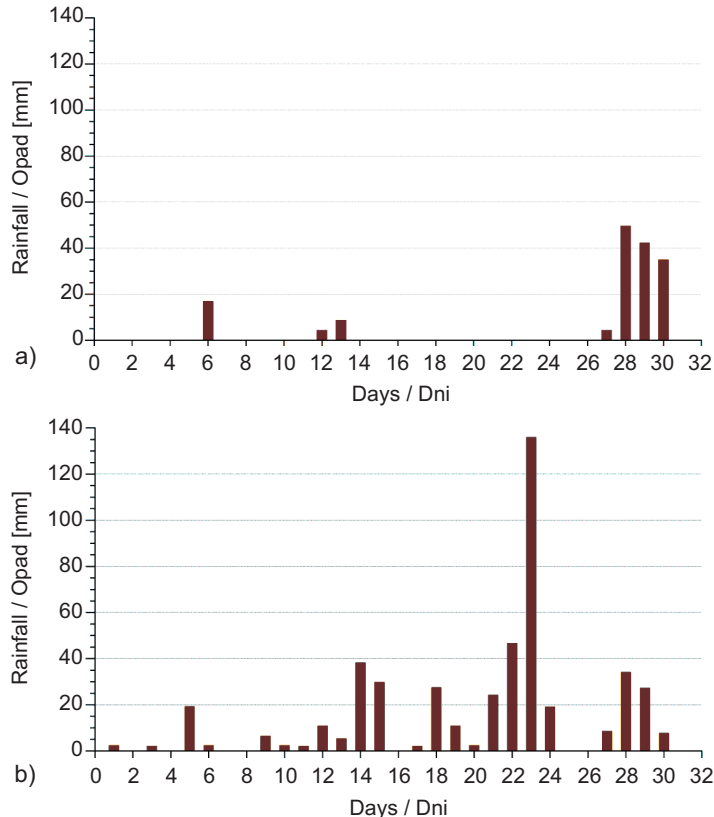


Fig. 3. Rainfall during seed germination and initial grass growth: a) April 2019, b) May 2019

Rys. 3. Opady deszczu w sezonie kiełkowania nasion oraz w początkowym okresie wzrostu trawy: a) kwiecień 2019, b) maj 2019

3.3. WZROST TRAWY

Pod koniec kwietnia okres bezdeszczowy zakończył się i wystąpiły warunki pogodowe sprzyjające intensywnemu wzrostowi trawy (Rys. 3). Wraz z nadejściem łagodnych wartości temperatury oraz częstych opadów, wzrost trawy został znacznie przyspieszony. W tym okresie obserwowany postęp zazielenienia skarpy był regularnie monitorowany. Wyniki pomiarów wysokości źdźbeł trawy wyrosniętej na poszczególnych poletkach doświadczalnych przedstawiono w Tabl. 2.

3.2. SEED GERMINATION

In spring, once the spring ground frosts were over, hydroseeding of the slope was performed. In the following weeks, seed germination was initiated. Exactly at this time, during the largest water demand for seed germination, spring precipitation stopped and a rainless period lasting three weeks occurred (Fig. 3).

In this period the water that had been retained earlier inside the ropes during melting of snow and early spring rains was gradually released into the soil. Due to hydraulic conductivity of the ropes, water was transported along the ropes down to the base of the slope and distributed effectively and uniformly on its whole surface. The ropes ensured high soil moisture and provided sufficient water supply for seed germination. Despite the lack of precipitation, seed germination on the slope progressed without additional irrigation. After several days the first grass seedlings appeared on the slope. The beneficial impact of the installed system on seed germination and the early grass growth was evident through comparison of the protected slope with other nearby parts of the slope. In places protected with anti-erosion mats seed germination was almost completely prevented due to lack of moisture. After hydroseeding the majority of seeds quickly dried and did not germinate at all. A small fraction of seeds hidden in local soil irregularities germinated only after a few weeks and then a few rare seedlings appeared.

3.3. GRASS GROWTH

At the end of April, the dry period ended and the weather conditions became favourable for intense grass growth (Fig. 3). With gentle temperatures and frequent rainfalls, the growth of grass on the slope considerably accelerated. The progress in grass growth was monitored and the height of grass was periodically measured. The measured values for different experimental plots are presented in Table 2.

After several weeks the result of grass growth on different plots significantly varied, depending on the composition of the mixture used to cover the ropes. The lowest stems were observed on the plot covered with clayey soil without fibres. For the plot covered with agricultural soil without additions the grass was slightly higher. For plots covered with soils mixed with both tannery wool and wool sheared from live sheep the grass was almost two times higher. Similar height was achieved on plots covered with soils mixed with wool and polyester fibres. For all plots covered with soil containing wool, a slightly higher growth was detected on agricultural soil.

Table 2. Height of grass grown on the experimental plots [cm]
 Tablica 2. Wysokość trawy rosnącej na poletkach doświadczalnych [cm]

Week / Tydzień	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
6	8.5 ± 1	8 ± 1	6 ± 1	7.5 ± 1	4 ± 1	5 ± 1	7.5 ± 1	8 ± 1	8 ± 1	10 ± 1
8	21 ± 2	19 ± 3	12 ± 1	15 ± 1	9 ± 1	10 ± 1	15 ± 1	17 ± 2	15 ± 1	20 ± 3
10	45 ± 3	43 ± 4	42 ± 4	52 ± 3	23 ± 4	30 ± 3	45 ± 3	42 ± 3	38 ± 4	58 ± 4

Po kilku tygodniach zaobserwowano znaczne różnice we wzroście trawy na poszczególnych poletkach, które zależały od składu mieszanki gruntu zastosowanego do przykrycia sznurów. Najniższe źdźbła zaobserwowano na poletku pokrytym gruntem gliniastym bez domieszki włókien. W przypadku poletka z ziemią z pól uprawnych bez domieszki trawa była nieznacznie wyższa. Prawie dwa razy wyższą trawę stwierdzono na poletkach pokrytych gruntem zmieszanim z wełną stanowiącą odpad garbarski oraz z wełną pochodzącą ze strzyżenia owiec. Podobną wysokość uzyskano na poletkach pokrytych warstwą gleby zmieszanej z odpadowym materiałem wełnianym oraz włóknami poliestrowymi. W przypadku wszystkich poletek z gruntem zawierającym domieszkę wełny nieznacznie większy wzrost trawy odnotowano na glebach pochodzących z pól uprawnych.

Oprócz wyraźniej różnicy w wysokości źdźbeł zaobserwowano także różnice w gęstości i zabarwieniu trawy. Trawa rosnąca w miejscach pokrytych gruntem gliniastym bez domieszki włókien charakteryzowała się najmniejszą gęstością i żółtawozieloną barwą. Na poletkach pokrytych glebą zmieszaną z wełną, trawa była znacznie bardziej gęsta i miała intensywnie zielony kolor. Gęsta pokrywa trawiasta o średniej wysokości 50 cm powstała w stosunkowo krótkim czasie wynoszącym około sześć tygodni od czasu pojawienia się pierwszych siewek na skarpie. Różnica w wyglądzie skarpy z tego okresu, od połowy kwietnia do początku czerwca jest wyraźnie widoczna na Rys. 4.

Bujna trawa porastająca zabezpieczoną część skarpy kontrastowała silnie z wyglądem sąsiednich poletek. W miejscach ułożenia mat przeciwoerozyjnych uzyskano pojedyncze i nieregularnie rozrzucone kępy trawy. W miejscach, które nie zostały przykryte matami trawa była rzadka, bladezielona, a jej wysokość nie przekraczała 10 cm (Rys. 5).

Trawa porastająca skarpe zwiększyła stabilizujące działanie geotekstyliów i zapewniła skuteczną ochronę skarpy przed erozją wodną oraz miejscowymi osunięciami gruntu wskutek opadów atmosferycznych. Połączone działanie zbrojenia skarpy oraz pokrywy trawiastej zapobiegło przypadkom, które miały miejsce sporadycznie po drugiej stronie drogi, gdzie w następstwie obfitych opadów doszło do nagłego osunięcia skarpy (Rys. 6).

In addition to the apparent height difference, the grass on individual plots had different density and colour. The grass that grew in places covered with clayey soil without fibres had the lowest density and a pale yellowish green colour. In plots covered with soils mixed with wool, the grass was much denser and had an intense dark green colour. The dense grass cover with an average height of 50 cm was formed in a relatively short time, approximately six weeks after the appearance of the first grass seedlings on the slope. The difference in the appearance of the slope in the middle of April and at the beginning of June is clearly visible in Fig. 4.

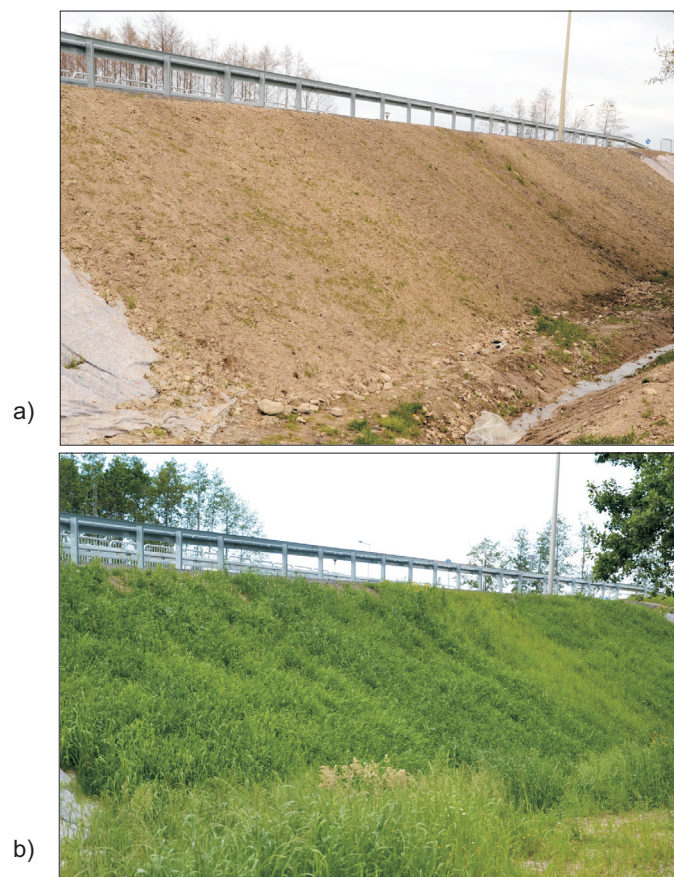


Fig. 4. The protected slope during: a) seed germination (April 2019), b) intense grass growth (June 2019)
 Rys. 4. Zabezpieczona skarpa podczas: a) kiełkowania nasion (kwiecień 2019), b) intensywnego wzrostu trawy (czerwiec 2019)

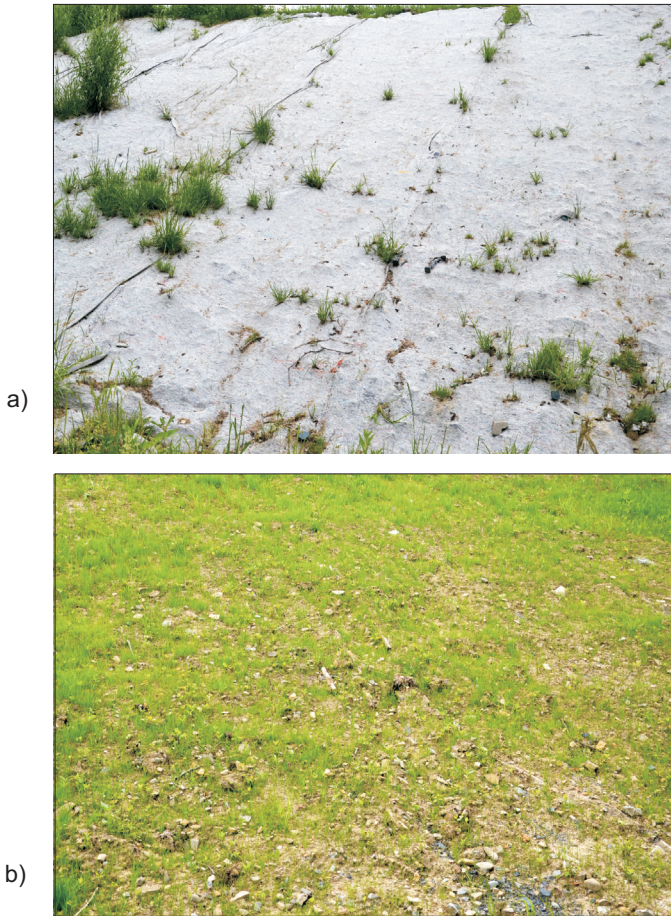


Fig. 5. The green cover developed on unprotected parts of the slope: a) grass clumps grown on anti-erosion mats, b) grass cover grown in places not covered with mats (June 2019)

Rys. 5. Szata roślinna powstała na niezabezpieczonej części skarpy: a) kępki trawy rosnące na matach antyerozyjnych, b) trawa porastająca miejsca nie pokryte matami (czerwiec 2019)

4. DYSKUSJA

Bezpośrednio po zainstalowaniu sznury pełniły na skarpie funkcję barier mechanicznych. Funkcje te są przypisane fasczynie lub przegrodom wykonanym z materiałów naturalnych stosowanym w systemach bioinżynieryjnych. Po ułożeniu w poprzek nasypu sznury utworzyły niewielkie ścianki oporowe oraz bariery mechaniczne ułatwiające konsolidację gruntu i znacznie ograniczające ryzyko wystąpienia lokalnych osuwisk. Kolejne zwoje ułożonych meandrowo sznurów przedzieliły powierzchnię skarpy. W wyniku tego sznury utworzyły system mikrotam, które spowolniły spływ wody, ograniczyły wymywanie cząstek gruntu oraz zapobiegły powstawaniu wyżłobień erozyjnych.

W początkowym okresie użytkowania oba rodzaje włókien – włókna wełniane i poliestrowe – poprawiły mechaniczne

The lush grass grown on the protected part of the slope contrasted strongly with adjacent plots, where only a poor green cover was obtained. In places covered with anti-erosion mats, scattered and irregularly distributed grass clumps were obtained. In spots not covered with mats the grass was sparse, had a pale green colour and did not exceed 10 cm in height (Fig. 5).

The grass grown on the slope supported the stabilising function of the system and efficiently protected the slope against water erosion and local rainfall-induced landslides. The combined action of slope reinforcement and grass cover prevented the events that occasionally occurred on the other side of the road, where an abrupt slope failure was detected after heavy rains (Fig. 6).



Fig. 6. The rainfall-induced local slope failure on section protected with anti-erosion mats (June 2019)

Rys. 6. Lokalne osuwisko spowodowane opadami deszczu na odcinku skarpy zabezpieczonym matami antyerozyjnymi (czerwiec 2019)

4. DISCUSSION

Immediately after installation on the slope, the ropes performed the function of mechanical barriers, typically assigned to wattles or fences made from vegetative materials commonly applied in bioengineering systems. Upon installation across the embankment, the ropes formed small retaining walls and mechanical barriers, which facilitated ground consolidation and considerably reduced the danger of local landslides. The subsequent turns of meandrically arranged ropes broke the slope length. As a result, the ropes forming a system of micro-dams slowed down the runoff water, reduced washing out of soil particles and restrained formation of erosion rills.

In the first period of operation, both types of fibres – wool and polyester – enhanced the mechanical properties of the

właściwości gleby i przyczyniły się do stabilizacji gruntu. Oddziaływania pomiędzy cząsteczkami gleby ze spletanymi włóknami przyczyniły się do integralności strukturalnej gleby. Włókna zmieszane z gruntem utworzyły wiązanie adhezyjne i poprzez opory tarcia ograniczyły możliwość przesuwania się cząstek gruntu. Ponadto, spletane ze sobą włókna zachowywały się jak siatka strukturalna, zwiększająca integralność gruntu i spajająca jego cząstki ze sobą [23].

Sznury przysypane gruntem zmieszany z włóknami skutecznie zabezpieczyły skarpe przed osuwaniem i erozją w początkowym okresie eksploatacji, tj. jesienią i mroźną zimą, gdy rozwój roślinności był niemożliwy. Dzięki zastosowaniu tego systemu skarpa przetrwała kilka miesięcy w bardzo dobrym stanie, pomimo jesiennych opadów deszczu, zimowych opadów śniegu oraz mrozów.

Do zabezpieczenia skarpy wykorzystano sznury o wysokich zdolnościach sorpcyjnych i dobrej kapilarności. Dzięki wysokiej chłonności sznury zmagazynowały znaczną część wody opadowej. Jednocześnie, dzięki dobrej kapilarności sznury pełniły rolę drenażu, wychwytyjąc nadmiar wody z gleby i powoli odprowadzając ją do rowu odwadniającego biegnącego u podstawy skarpy. W efekcie sznury działały jak system biologicznego odprowadzania o podwójnej funkcji, służąc zarówno jako pompa zasysająca nadmiar wody z gruntu i jako rura transportująca ją na całej swojej długości do rowu odwadniającego [24]. Dzięki ułatwionemu przepływowi wody na styku między gruntem a włóknami, dodatek włókien przyczynił się do wzrostu szybkości infiltracji i przepuszczalności gleby [25-26]. Przyspieszona infiltracja miała duże znaczenie dla gleby gliniastej charakteryzującej się słabą przepuszczalnością. Zwiększona intensywność infiltracji dodatkowo ograniczyła prędkość spływu wód opadowych i usprawniła gospodarkę wodną na skarpie.

Wysokie zdolności sorpcyjne sznurów w połączeniu z przyspieszoną infiltracją miały olbrzymie znaczenie w początkowym okresie eksploatacji, przed rozwojem szaty roślinnej. Retencja wody wspomagała działanie sznurów jako bariery mechanicznej oraz dodatkowo ograniczała spływ powierzchniowy i wymywanie cząstek gleby. W ten sposób, sznury dodatkowo ograniczyły szkodliwy efekt erozji powierzchniowej. Jednocześnie, odprowadzając nadmiar wody do rowu sznury zapobiegały nadmiernemu wzrostowi wilgotności gruntu oraz wyeliminowały powstawanie lokalnych osuwisk nasiąkniętej wodą gleby. Co więcej, dzięki powolnemu odprowadzaniu wody opadowej w dół zbocza, sznury skutecznie i równomiernie rozprowadziły wilgoć na całej powierzchni skarpy.

Woda zatrzymana wewnątrz sznurów była w nich czasowo magazynowana a następnie uwalniana do gruntu w porze

soil and acted as soil reinforcement. The interlocking forces coupled with frictional forces between soil particles and fibres contributed to soil structural integrity. The fibres randomly distributed in the soil mobilised fibre-soil adhesive bonding and, by interface friction, restricted the sliding of soil particles. Moreover, the fibres intersecting each other behaved as a structural mesh, which increased the soil integrity and held the soil particles together [23].

The ropes covered with fibre-reinforced soil effectively protected the slope against landslides and erosion in the first period of operation during autumn and cold winter, when the development of vegetation was impossible. Owing to the system, the slope survived several months in very good condition, despite autumn rainfalls, winter snowfalls and frost.

Ropes with high absorption capacity and good capillary capability were applied as protection of the slope. Due to high absorption capacity, the ropes retained a significant part of rainwater. Simultaneously, thanks to high capillary activity, the ropes acted as drains drawing excess water from the soil and slowly draining it to a ditch running at the foot of the slope. The ropes acted as a bio-wicking system with dual function, serving both as a pump which sucked the excess water and as a pipe which transported it along its length to the ditch [24]. Due to facilitated water flow along the soil-fibre interface, addition of fibres resulted in an increase in infiltration rate and water permeability of the soil [25-26]. The accelerated infiltration had great importance in the case of clayey soil, characterised by lower water permeability. Intensification of infiltration additionally reduced the runoff velocity and improved water management on the slope.

The high absorption abilities of ropes in combination with accelerated infiltration were of great importance in the first period of operation, prior to development of grass cover. Water retention supported the action of ropes as mechanical barriers and additionally reduced the water runoff and washing out of soil particles. In this manner, the ropes additionally restrained the harmful effect of surface erosion. Simultaneously, through draining excess water to the ditch, the ropes prevented excessive soaking of the soil and eliminated local landslides of wet soil. Moreover, though slow draining down the slope, the ropes distributed moisture on the whole surface of the slope effectively and uniformly.

Water retained inside the ropes was temporarily stored and then gradually released into the soil in dry days. The irrigation function has great importance in spring, during seed germination and grass growth. Due to changing weather

suchej. Funkcja nawadniania miała szczególnie duże znaczenie wiosną, w okresie kiełkowania nasion oraz wczesnego wzrostu trawy. Wskutek zmiennych warunków pogodowych, zmian w nasłonecznieniu, różnicy temperatury w ciągu dnia i nocy oraz wpływu wiatru, uwalnianie wody na zboczu następowało w mniej równomierny sposób niż w warunkach laboratoryjnych. Niemniej jednak, sznury zminimalizowały gwałtowne zmiany wilgotności gleby między okresem wilgotnym i suchym oraz złagodziły skutki suszy. Wiosną, system zapewnił stabilność powierzchni skarpy i zagwarantował stabilne podłoże gruntowe sprzyjające wzrostowi siewek po kiełkowaniu nasion. Ponadto, system zapewnił wilgotne środowisko w płytkiej warstwie powierzchniowej gleby w strefie korzeniowej rosnącej trawy, gwarantując dogodne warunki do jej intensywnego wzrostu. W trakcie wzrostu trawy uwidoczniła się użyźniająca funkcja systemu. Dzięki enzymom wydzielanym przez mikroorganizmy naturalnie występujące w glebie keratyna obecna w wełnie ulegała stopniowej degradacji [27-28]. W rezultacie, w stosunkowo krótkim czasie skarpa została równomiernie pokryta gęstą i wysoką trawą.

5. WNIOSKI

Zastosowanie sznurów kemafilowych w połączeniu z rozproszonym wzmocnieniem gruntu włóknami jest godną uwagi techniką stabilizacji skarp i nasypów uformowanych podczas budowy dróg. Technika ta jest korzystna z ekonomicznego punktu widzenia, przyjazna dla środowiska i może służyć jako alternatywa dla innych metod mechanicznych i bioinżynieryjnych. W metodzie wykorzystywane są sznury wykonane z odpadów tekstylnych i materiałów niskiej jakości o niewielkiej wartości rynkowej. Do ich produkcji może być zastosowana nieskomplikowana technologia Kemafil, umożliwiająca wytwarzanie sznurów o różnych długościach i średnicach. Sznury są stosunkowo elastyczne i mogą być łatwo zginane i dopasowane do kształtu zabezpieczanej skarpy. Elastyczność sznurów ułatwia ich transport i montaż bez konieczności stosowania ciężkiego sprzętu i zaangażowania znacznej siły roboczej.

Sznury kemafilowe w połączeniu ze wzmocnieniem gruntu włóknami stwarzają korzystne warunki do szybkiego wzrostu roślinności ochronnej. System gwarantuje stabilizację gruntu, jak również zapewnia wilgotność gleby wystarczającą do kiełkowania nasion oraz intensywnego wzrostu trawy. W wyniku tego system gwarantuje szybkie zazielenienie skarpy, nawet przy niesprzyjających warunkach pogodowych.

W okresie użytkowania skarpy włókna wełny zmieszane z glebą ulegają powolnej biodegradacji, dostarczając w ten sposób roślinom składników odżywczych bogatych w związki azotu. Substancje odżywcze stopniowo uwalniane z wełny

conditions, varying insolation, different day and night temperatures and the effect of wind, the releasing of water on the slope occurred less uniformly than in laboratory conditions. Nevertheless, the ropes minimised rapid changes in soil moisture between wet and dry periods and mitigated the effects of drought. In spring, the system still provided stability of the slope surface and ensured stable subsoil for development of seedlings after seed germination. Moreover, the system ensured humid environment in the shallow surface layer of soil around the roots of the growing grass, guaranteeing favourable conditions for intense grass development. During grass growth, the fertilising function of the system was revealed. Due to enzymes secreted by microorganism naturally present in the soil, the wool keratin was gradually degraded [27-28]. As a result, dense and high grass, evenly covering the entire surface of the slope, was developed in a relatively short time.

5. CONCLUSIONS

Application of ropes in combination with fibre soil reinforcement serves as a noteworthy technique for stabilisation of slopes and embankments formed during road construction. The technique is economically feasible, environmentally friendly and can serve as a sustainable alternative to other mechanical and bioengineering methods. The method utilises ropes made from textile waste and low-quality materials with small market value. The simple Kemafil technology may be applied for manufacturing, enabling formation of ropes with various length and diameters. The ropes are relatively flexible and can be easily bent to adjust to the shape of the protected slope. Their flexibility facilitates operation and enables easy installation without the use of heavy equipment or greater manpower.

The ropes in connection with fibre soil reinforcement create favourable conditions for quick development of vegetation. The system ensures ground stability as well as sufficient humidity for seed germination and intense grass growth. Therefore, the system guarantees quick greening of the slope even in adverse weather conditions.

During the service life of the slope, the wool fibres mixed with the soil slowly biodegrade and deliver nutrients rich in nitrogen compounds. The fertilisers gradually released from wool promote grass growth even in clayey soil deficient in organic matter and organic nutrients.

ACKNOWLEDGMENTS

The authors gratefully acknowledge the funding by ERANET-CORNET consortium under the international research project PROGEO 2 "Geotextiles from Sustainable

wspomagają wzrost trawy nawet na gruntach gliniastych ubogich w materię organiczną oraz organiczne składniki odżywcze.

INFORMACJE DODATKOWE

Autorzy dziękują konsorcjum ERANET-CORNET za dofinansowanie w ramach międzynarodowego projektu badawczego PROGEO 2 „Geotekstyli z surowców odnawialnych i tekstyliów odpadowych – nowa mobilna technologia wytwarzania i nowe obszary zastosowania w budowlach hydrotechnicznych i drenażu”, DZP/CORNET/1/20/2017.

BIBLIOGRAFIA / REFERENCES

- [1] *Forman R.T.T., Alexander L.E.*: Roads and their major ecological effects. *Annual Review of Ecology and Systematics*, **29**, 1998, 207-231
- [2] *Trombulak S.C., Frissell C.A.*: Review of ecological effects of roads on terrestrial and aquatic communities. *Conservation Biology*, **14**, 1, 2000, 18-30
- [3] *Coffin A.W.*: From roadkill to road ecology: A review of the ecological effects of roads. *Journal of Transport Geography*, **15**, 5, 2007, 396-406
- [4] *Cerda A.*: Soil water erosion on road embankments in Eastern Spain. *Science of The Total Environment*, **378**, 1-2, 2007, 151-155
- [5] *Xu X.L., Liu W., Kong Y.P., Zhang K.*: Runoff and water erosion on road side-slopes: Effects of rainfall characteristics and slope length. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, **14**, 7, 2009, 497-501
- [6] *Navarro-Hevia J., Lima-Farias T.R., de Araújo J.C., Osorio-Pelaez C., Pando V.*: Soil erosion in steep road cut slopes in Palencia (Spain). *Land Degradation and Development*, **27**, 2016, 190-199, DOI: 10.1002/ldr.2459
- [7] *Baird E.J., Floyd W., Ilja V., van Meerveld I.*: Road Surface Erosion, Part 1: Summary of Effects, Processes, and Assessment Procedures. *Streamline Watershed Management Bulletin*, **15**, 1, 2012, 1-9
- [8] *Seutloali K.E., Beckedahl R.*: A review of road-related soil erosion: An assessment of causes, evaluation techniques and available control measures. *Earth Science Research Journal*, **19**, 1, 2015, 1-13
- [9] *Fu B., Newhama L.T.H., Ramos-Scharron C.E.*: A review of surface erosion and sediment delivery models for unsealed roads. *Environmental Modelling & Software*, **25**, 1, 2010, 1-14
- [10] *Fay L., Akin M., Shi X.*: Cost-Effective and Sustainable Road Slope Stabilization and Erosion Control. *National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, Transportation Research Board*, Washington, DC, 2012
- [11] *Głażewski M.*: Badania procesów erozji wodnej skarp budowli ziemnych. *Roads and Bridges - Drogi i Mosty*, **4**, 2, 2005, 39-69
- [12] *Głażewski M., Piechowicz, K.*: Budowa i umocnienie przeciwoerozyjne skarp drogowych. *Roads and Bridges - Drogi i Mosty*, **8**, 2, 2009, 5-31
- [13] *Freer R.*: Bio-engineering: the use of vegetation in civil engineering. *Construction and Building Materials*, **5**, 1, 1991, 23-26
- [14] *Schiechl H.M., Stern R.*: Ground bioengineering techniques for slope protection and erosion control. *Wiley-Blackwell Science*, Oxford, 1996
- [15] *Punetha P., Samanta M., Sarkar S.*: Bioengineering as an Effective and Ecofriendly Soil Slope Stabilization Method: A Review. In: *Landslides: Theory, Practice and Modelling. Part of the "Advances in Natural and Technological Hazards Research" book series*, Springer Nature, Switzerland, **50**, 2019, 201-224
- [16] *Broda J., Gawłowski A., Laszczak R., Mitka A., Przybyło S., Grzybowska-Pietras J., Rom M.*: Application of innovative meandrically arranged geotextiles for the protection of drainage ditches in the clay ground. *Geotextiles & Geomembranes*, **45**, 1, 2016, 45-53
- [17] *Broda J., Przybyło S., Gawłowski A., Grzybowska-Pietras J., Sarna E., Rom M.*: Utilization of textile wastes for the production of geotextiles designed for erosion protection. *Journal of Textile Institute*, **110**, 3, 2019, 435-444
- [18] *Broda J., Gawłowski A., Przybyło S., Binias D., Rom M., Grzybowska-Pietras J., Laszczak R.*: Innovative wool geotextiles designed for erosion protection. *Journal of Industrial Textiles*, **48**, 3, 2018, 599-611
- [19] *Broda J., Grzybowska-Pietras J., Gawłowski A., Rom M., Przybyło S., Laszczak R.*: Application of wool geotextiles for the protection of steep slopes. *Procedia Engineering*, **200**, 2017, 112-119
- [20] *Broda J., Franitza P., Herrmann U., Helbig R., Große A., Grzybowska-Pietras J., Rom M.*: Reclamation of abandoned open mines with innovative meandrically arranged geotextiles. *Geotextiles and Geomembranes*, **48**, 3, 2020, 236-242, DOI: 10.1016/j.geotextmem.2019.11.003
- [21] *Seeger M.*: Preventing erosion. *Knitting International*, **115**, 2009, 28-33

Raw Materials and Textile Waste, New Mobile Production Technology and New Application Fields in Drainage and Hydraulic Engineering”, DZP/CORNET/1/20/2017.

- [22] Broda J., Gawłowski A., Rom M., Laszczak R., Mitka A., Przybyło S., Grzybowska-Pietras J.: Innovative geotextiles for reinforcement of roadside ditch. *Tekstyc*, **59**, 2, 2016, 115-120
- [23] Gowthaman S., Nakashima K., Kawasaki S.: State-of-the-Art Review on Soil Reinforcement Technology Using Natural Plant Fiber Materials: Past Findings, Present Trends and Future Directions. *Materials*, **11**, 4, 2018, 553, DOI: 10.3390/ma11040553
- [24] Lin C., Zhang X.: A bio-wicking system to dehydrate road embankment. *Journal of Clean Production*, **196**, 2018, 902-915
- [25] Bordoloi S., Hussain R., Garg A., Sreedeeep S., Zhou W.H.: Infiltration characteristics of natural fiber reinforced soil. *Transportation Geotechnics*, **12**, 2017, 37-44
- [26] Junjun N., Bordoloi S., Ankit G., Shao W.: Simple Model on Water Retention and Permeability in Soil Mixed with Lignocellulose Fibres. *KSCE Journal of Civil Engineering*, **23**, 1, 2019, 138-146
- [27] Broda J., Gawłowski A.: Influence of sheep wool on slope greening. *Journal of Natural Fibers*, **17**, 6, 2020, 820-832, DOI: 10.1080/15440478.2018.1534190
- [28] Broda J., Przybyło S., Kobiela-Mendrek K., Binias D., Rom M., Grzybowska-Pietras J., Laszczak R.: Biodegradation of sheep wool geotextiles. *International Biodeterioration & Biodegradation*, **115**, 2016, 31-38