

dr inż. Marcin Grygierek^{1)*}

ORCID: 0000-0002-2969-7054

dr inż. Piotr Kalisz²⁾

ORCID: 0000-0003-1749-2577

dr inż. Magdalena Zięba²⁾

ORCID: 0000-0002-7294-9210

dr inż. Andrzej Pytlik³⁾

ORCID: 0000-0003-0899-0590

Badania niezwiązanej mieszanki stabilizowanej georusztem o monolitycznych węzłach poddanej deformacjom rozluźniającym

Tests of an unbound mixture stabilized with a geogrid with monolithic nodes subjected to loosening deformations

DOI: 10.15199/33.2023.09.11

Streszczenie. W artykule przedstawiono badania dotyczące stosowania georusztów o sztywnych monolitycznych węzłach do wzmocnienia warstw wykonanych z mieszanek niezwiązanych. Celem badań było sprawdzenie skuteczności funkcji stabilizującej, którą przypisuje się georuszom współpracującym z ziarnami kruszywa, w warunkach osłabienia podłoża. Podłoże zostało osłabione przez rozluźnienie najniższej warstwy wykonanej z piasku, co symulowało oddziaływanie eksploatacji górniczej. Uzyskane wyniki potwierdziły, że wzmocnienia georusztem znacznie ograniczają degradację sztywności warstwy z niezwiązanej mieszanki poddanej deformacjom górniczym.

Słowa kluczowe: stabilizacja georusztem; niezwiązane kruszywo; obciążenie płytą; deformacje górnicze.

Abstract. The article presents the research works focus on geogrids with rigid monolithic nodes to reinforce layers made of unbound mixes. The aim of the research was to check the effectiveness of the stabilizing function, which is attributed to geogrids cooperating with aggregate grains, in conditions of subgrade weakening. The subgrade was weakened by loosening the lowest layer made of sand, which simulated mining impact. The obtained results confirmed that the reinforcement with a geogrid significantly reduces the degradation of the stiffness of the unbound mix layer subjected to mining deformations.

Keywords: geogrid stabilisation; unbound aggregate; plate load test; mining deformation.


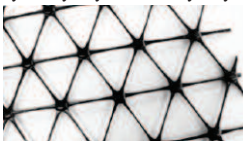

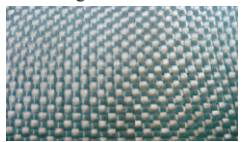

W budownictwie komunikacyjnym stosowanie geosyntetyków znane jest od kilku dekad. Jednym z celów ich użycia jest poprawa mechanicznych właściwości wbudowywanych warstw w podłożu nawierzchni [1, 2], jak również warstw nawierzchni [3]. Rozwój geosyntetyków [4] wymaga stałych badań weryfikujących skuteczność wzmocnianych warstw z mieszanek niezwiązanych wzmocnianych wkładkami geosyntetycznymi (tabela 1) [5].

Z najczęściej stosowanych geosyntetyków cechy wzmacniające przypisuje się geosiatkom, geotkaninom oraz georusztem. Wymienione geosyntetyki współpracują z warstwami niezwiązanego kruszywa [3]. Geosiatkom i geotkaninom przypisuje się pracę zgodnie z mechanizmem tzw. napiętej geomembrany – funkcję zbrojącą (rysunki 1 i 2), zaś georusztem – zgodnie z mechanizmem skrępowania bocznego ziaren kruszywa – funkcję stabilizującą (rysunki 1 i 2) [3]. Szczególnym przypadkiem

uzasadnionego stosowania geosyntetyków są wzmocnienia warstw na terenach górniczych [2, 6], na których dochodzi do pogorszenia parametrów warstw konstrukcyjnych nawierzchni, a przede wszystkim jej podłoża. Charakteryzując zmiany sztywności warstw nawierzchni i jej podłoża w obszarze ciągłych deformacji górniczych [7], powodujących poziome odkształcenia podłoża gruntowego maksymalnie 0–3 mm/m (teren zaliczany do II kategorii szkód górniczych), należy zauważyć, że re-

Tabela 1. Geosyntetyki o funkcji stabilizującej oraz zbrojącej

Table 1. Geosynthetics with a stabilizing and reinforcing function

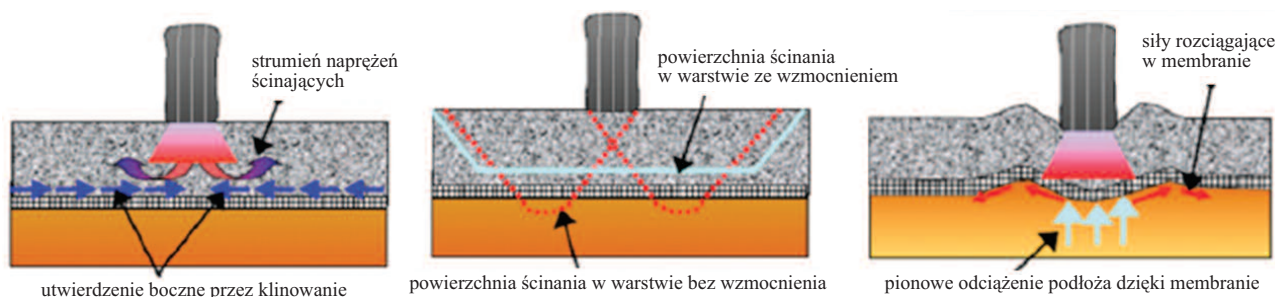
Funkcja – stabilizacja kruszywa			Funkcja – zbrojenie	
Georuszty o sztywnych monolitycznych węzłach			geotkanina	geosiatka
				
wielosiowy	wielosiowy/trójosiowy	dwuosiowy		

¹⁾ Politechnika Śląska, Wydział Budownictwa

²⁾ Główny Instytut Górniczo-Geologiczny, Zakład Geologii, Geofizyki i Ochrony Powierzchni

³⁾ Główny Instytut Górniczo-Geologiczny, Zakład Badań Mechanicznych i Inżynierii Materiałowej

^{*} Adres do korespondencji: marcin.grygierek@polsl.pl



Rys. 2. Mechanizmy zachowania się geosyntetyku wzmocniającego warstwy [3]

Fig. 2. Mechanisms of behaviour of geosynthetic reinforcing layers [3]

dukcja modułu podłoża może wynieść ok. 50%, a redukcja modułu niezwiązanych warstw nawierzchni ok. 40% [6]. Zmiany te mogą wystąpić w przypadku nawierzchni bez wzmocnienia geosyntetycznego. Należy oczekiwać, że zastosowanie geosyntetyku zwiększy odporność nawierzchni na działanie deformacji rozluźniających [8, 9, 10].

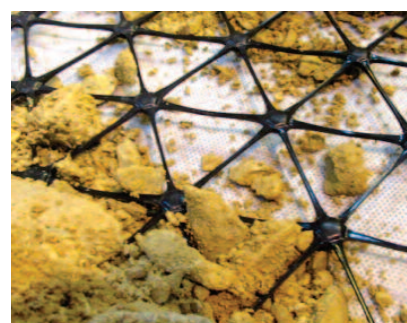
Badania

Badania laboratoryjne przeprowadzono na stanowisku (rysunek 3) umożliwiającym wbudowanie warstw o łącznej miąższości 50 cm, cykliczne obciążenie tego układu warstw, symulujące oddziaływanie od kół pojazdu, oraz rozsuwanie dwóch ścian, symulujące górnicze rozluźnienie. Wykonano dwa modele – z i bez wzmocnienia wieloosiowym georusztem o sztywnych monolitycznych węzłach. W każdym przypadku układ warstw poddano cyklicznym obciążeniom oraz przyłożono odkształcenia rozluźniające rzędu 6 mm/m, symulujące wpływ deformacji górniczych. Badany układ warstw składał się z dolnej warstwy wykonanej z piasku równo-

ziarnistego oraz górnej z mieszanki niezwiązanej o parametrach odpowiadających kruszywu stosowanemu do podbudów pomocniczych ($CBR \geq 60\%$) [12]. Pomiedzy warstwą piasku oraz kruszywem zastosowano warstwę „agrowłókniny” o pomijalnej wytrzymałości na rozciąganie. Zadaniem tej warstwy było niedopuszczenie do przemieszania się kruszywa z piaskiem.

Program badań obejmował wykonanie dwóch serii pomiarowych. W pierwszej badano układ warstw bez georusztu (rysunek 3), a w drugiej układ warstw z zastosowaniem trójosiowego georusztu o sztywnych monolitycznych węzłach, zainstalowanego w spągu niezwiązanego kruszywa (fotografia 1, tabela 2). Każda z serii pomiarowych składała się z następujących etapów:

- etap 1 – zbudowanie układu warstw: grubości 30 cm z piasku, a następnie grubości 20 cm z kruszywem. W drugiej serii dodatkowo pomiędzy warstwami wbudowano georuszt;
- etap 2 – statyczny pomiar kołową płytą oraz wyznaczenie pierwotnego



Fot. 1. Wieloosiowy georuszt zastosowany w badaniach

Photo 1. Multiaxial geogrid used in tests

Tabela 2. Właściwości georusztu o monolitycznych węzłach wykorzystanego do badań

Table 2. Properties of the geogrid with monolithic nodes used for the tests

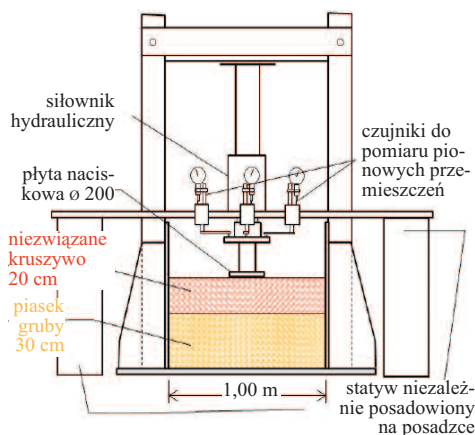
Paramer	Metoda badania ¹⁾	Wymagana wartość	Tolerancja
Sztywność radialna przy odkształceniu 0,5%	TR 041 B.1.	480 kN/m	-90
Współczynnik izotropii sztywności	TR 041 B.1	0,80	-0,15
Efektywność węzła	TR 041 B.2	100%	-10
Rozmiar sześcioboku	TR 041.B.4	80 mm	±4

¹⁾ wg Raportu Technicznego Europejskiej Organizacji Aprobata Technicznych EOTA

i wtórnego modułu odkształcenia, a także wskaźnika odkształcenia E2/E1; pomiar głębokości deformacji powierzchni warstwy kruszywa;

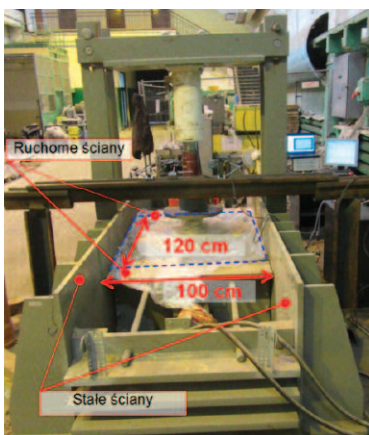
- etap 3 – cykliczne obciążanie układu warstw – 17 tys. cykli, przy obciążeniu 450 kPa;

• etap 4 – statyczny pomiar kołową płytą oraz wyznaczenie pierwotnego i wtórnego modułu odkształcenia, a także wskaźnika odkształcenia E2/E1; pomiar głębokości deformacji powierzchni warstwy kruszywa;



Rys. 3. Stanowisko badawcze – pierwsza seria badań [11]

Fig. 3. The test stand – first series of tests [11]



- etap 5 – rozluźnienie badanego układu poziomym odkształceniem ok. 6,0 mm/m;

- etap 6 – statyczny pomiar kołową płytą i wyznaczenie pierwotnego i wtórnego modułu odkształcenia oraz wskaźnika odkształcenia E2/E1; pomiar głębokości deformacji powierzchni warstwy kruszywa;

- etap 7 – cykliczne obciążanie układu warstw – 10 tys., przy obciążeniu 450 kPa;

- etap 8 – statyczny pomiar kołową płytą i wyznaczenie pierwotnego i wtórnego modułu odkształcenia oraz wskaźnika odkształcenia E2/E1; pomiar głębokości deformacji powierzchni warstwy kruszywa.

gim obciążeniu różnice pomiędzy układem wzmocnionym i niewzmocnionym były zdecydowanie mniejsze, co jest konsekwencją dogęszczenia rozluźnionego ośrodka pierwszym obciążeniem. Warto zauważyć, że konsekwencją odbudowy tej sztywności jest znaczne zwiększenie głębokości deformacji trwałej w układzie bez georusztu (rysunek 5).

Uzyskane wyniki jednoznacznie wskazują na korzystniejszą reakcję układu warstw podłoża wzmocnionego georusztem. Jest to widoczne zwłaszcza po wykonaniu statycznych badań (etap 6) po rozluźnieniu układu warstw (etap 5). Warto zauważyć, że w układzie bez georusztu deformacja znacznie się

zwiększa w kolejnych etapach, a w układzie z georusztem jej przyrost jest o wiele mniejszy. Ostatecznie głębokość w układzie bez georusztu wynosi ok. 18 mm, a w układzie z georusztem ok. 5 mm. W związku z tym należy oczekiwać, że w pełnej nawierzchni drogowej, wzmocnionej georusztem i poddanej rozluźniającym deformacjom górniczym, powstanie koleina strukturalna o ok. 75% mniejszej głębokości w porównaniu z sytuacją, gdy nie zastosowano georusztu. Ponadto wizualna ocena powierzchni kruszywa wykazała, że po przyłożeniu odkształceń rozluźniających w układzie bez georusztu pojawiły się spękania (fotografia 2). Tego typu uszkodzeń nie ob-

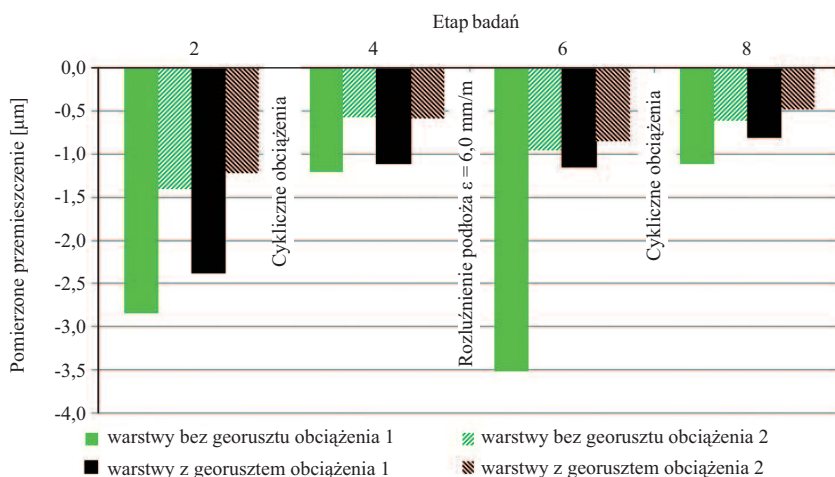
Wyniki badań

Wykonanie badań statycznego obciążenia powierzchni kruszywa płytą $\varnothing 200$ mm umożliwia analizę jej przemieszczeń, obliczenie pierwotnego i wtórnego modułu odkształcenia oraz analizę trwałych deformacji. W pierwszym pomiarze płytą (etap 2) maksymalne przemieszczenia (rysunek 4) wskazują na większą sztywność układu z georusztem, niż gdy go nie było. Największe różnice w pomierzonych przemieszczeniach wystąpiły w etapie 6, tj. po rozluźnieniu podłoża (symulacja oddziaływań górniczych). W układzie warstw „bez georusztu” przemieszczenie przy pierwotnym obciążeniu wyniosło ok. 3,5 mm, a w przypadku układu z georusztem – 1,2 mm. W dru-



Rys. 5. Deformacja na powierzchni układu warstw pomierzona po wtórnym obciążeniu płytą statyczną

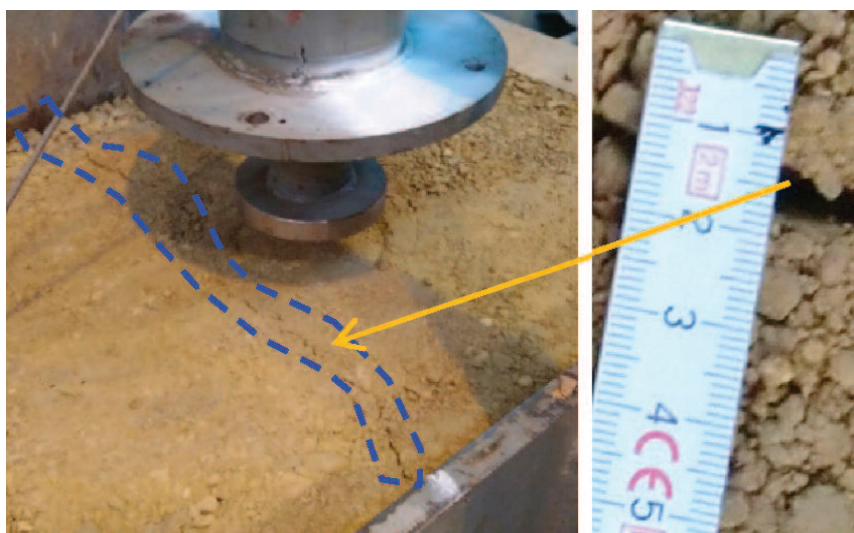
Fig. 5. Deformation on the surface of the layer system measured after secondary loading with a static plate



Rys. 4. Maksymalne pomierzone pionowe przemieszczenia w trakcie badania układu warstw statyczną płytą

Fig. 4. Maximum measured vertical displacements when testing the layer system with a static plate

serwowano w przypadku wzmocnienia georusztem. Poza przedstawionymi wynikami badań, obliczono również wartość pierwotnego i wtórnego modułu odkształcenia. Moduł odkształcenia obliczono zgodnie z zależnością jak w badaniu płytą VSS, przyjmując przyrost przemieszczenia pionowego w przypadku obciążenia 100 – 200 kPa. Korzystniejsze wartości modułów odkształcenia uzyskano również w przypadku układu wzmocnionego georusztem. Szczególnie jest to widoczne w etapie 6, tj. po przyłożeniu rozluźnienia (etap 5). Wartość pierwotnego modułu odkształcenia w układzie bez georusztu zmniejszyła się do 23 MPa. Ten sam moduł, ale dla układu wzmocnionego georusztem, wyniósł 56 MPa

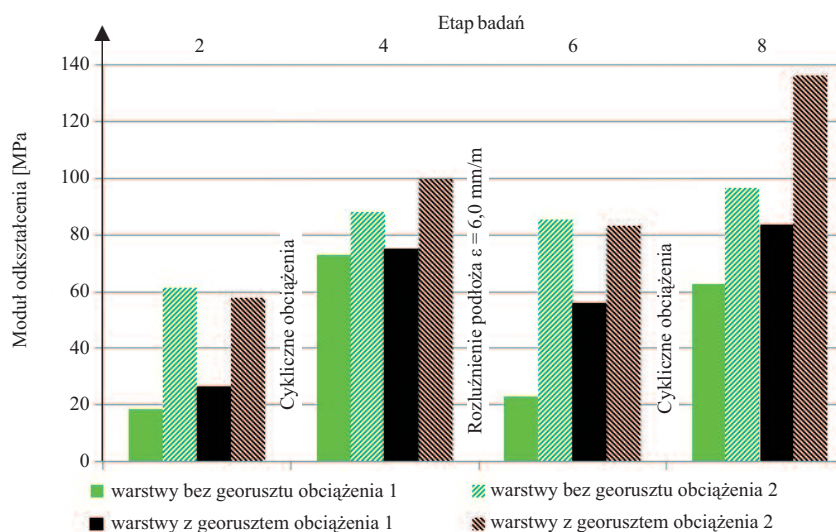


Fot. 2. Uszkodzenia w formie spękań warstwy kruszywa po rozluźnieniu w podłożu ($e = 6 \text{ mm/m}$)

Photo 2. Damage in the form of cracks in the aggregate layer after loosening in the subgrade ($e = 6 \text{ mm/m}$)

(rysunek 6). Wyniki wskazują na większą o 50% redukcję sztywności badanego układu warstw w przypadku bez zastosowania georusztu.

• układ warstw wzmocniony wkładką georusztu zapewnia o ok. 50% mniejszą redukcję pierwotnego modułu odkształcenia względem takiego samego



Rys. 6. Obliczone moduły odkształcenia (pierwotny i wtórny) w kolejnych etapach badań układów warstw „z” i „bez” georusztu

Fig. 6. Calculated deformation moduli (primary and secondary) in subsequent stages of testing the layer systems with and without geogrid

Podsumowanie

Na podstawie wyników badań stwierdzono:

- stosowanie georusztu o sztywnych monolitycznych węzłach minimalizuje negatywne skutki deformacji górniczych w przypadku poziomych odkształceń rozluźniających 6 mm/m;
- zastosowanie georusztu redukuje o 75% głębokość deformacji trwałej;

układu warstw, ale bez georusztu wzmocniającego;

- wymierną korzyścią stosowania georusztu w układzie warstw niezwiązanych jest zapewnienie większej jednorodności w warstwie kruszywa przez wyeliminowanie lub znaczne ograniczenie spękań warstwy kruszywa.

Wszystkie wymienione korzyści ze stosowania georusztu o monolitycznych węzłach powinny pozwolić na za-

pewnienie pełnej nawierzchni, funkcjonującej na terenach górniczych, większej trwałości zmęczeniowej. Należy zauważyć, że wyniki prezentowanych badań mają charakter jakościowy i będą nadal analizowane, a sam program badań zostanie poszerzony o badania terenowe.

Literatura

[1] Chua BT, Abuel-Naga H, Nepal KP. Design Charts for Geogrid-Reinforced Granular Working Platform for Heavy Tracked Plants over Clay Subgrade. Transportation Infrastructure Geotechnology. 2022; DOI: 10.1007/s40515-022-00243-5.

[2] Stilger-Szydło E. Posadowienia budowli infrastruktury transportu lądowego. Teoria – projektowanie – realizacja, 1st ed. Wrocław: Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne, 2005.

[3] Zornberg JG. Functions and Applications of Geosynthetics in Roadways. Procedia Engineering. 2017; DOI: 10.1016/j.proeng.2017.05.048.

[4] Robinson WJ. Full-Scale Evaluation of Multi-axial Geogrids in Road Applications Geotechnical and Structures Laboratory. Technical Report, Final Report US Army Corps of Engineers. Engineer Research and Development Center. ERDC/GSL TR-22-4. <https://apps.dtic.mil/sti/pdfs/AD1162925.pdf>.

[5] Horniček L, Rakowski Z, Kawalec J. Recent Trends in Wave Mechanics and Vibrations. Proceedings of WMVC 2022/ Dimitrovová Zuzanna [i in.] (red.). Mechanisms and Machine Science. 2023; vol. 125, Springer, s. 581 – 588. ISBN 978-3-031-15757-8.

[6] Grygierek M. Problematyka funkcjonowania dróg na terenach górniczych. Magazyn Autostrady. 2018; nr 1 – 2.

[7] Kwiatek J. Obiekty budowlane na terenach górniczych. Katowice: Wydawnictwo Głównego Instytutu Górnictwa. ISBN: 83/06418/9/5. 2007.

[8] Chlipalski K. Ocena wpływu rozpełzania górniczego podłoża na jego nośność. XLVI Konferencja Naukowa Komitetu Inżynierii Lądowej i Wodnej PAN i Komitetu Nauki PZITB, Wrocław – Krynica, [17 – 22 września] 2000: Problemy naukowo-badawcze budownictwa: T. 3: Geotechnika. Fizyka budowli. Organizacja i zarządzanie w budownictwie. Konstrukcje murowe i drewniane, 2000, Wrocław, Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne, s. 27 – 33.

[9] Chlipalski K, Strycharz B. Profilaktyka drogowa konstrukcji nawierzchni na terenach deformowanych górnictwem. XLVIII Konferencja Naukowa Komitetu Inżynierii Lądowej i Wodnej PAN i Komitetu Nauki PZITB „Krynica 2002”, Opole – Krynica, 15 – 20 września 2002 r.: Problemy naukowo-badawcze budownictwa: T. 4: Inżynieria komunikacyjna, mosty, sekcja grantów KBN, zagadnienia różne, 2002, Wrocław, Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne, s. 19 – 26.

[10] Kłosek K. Wybrane problemy geotechniczne terenów górniczych. Górnictwo i Środowisko. Mining and Environment. 2007; V/2007, 93–102.

[11] Grygierek M, Kalisz P, Zięba M, Pytlík A, Frąc W. Laboratory tests of unbound aggregate pavement base under cyclic loading and the impact of ground deformations caused by mining. Acta Montanistica. Slovaca. 2022; DOI: 10.46544/AMS.v27i1.09.

[12] Generalna Dyrekcja Dróg Krajowych i Autostrad. Wymagania Techniczne WT4 – Mieszanki niezwiązane do dróg krajowych. Warszawa, 2010.

Przyjęto do druku: 22.08.2023 r.