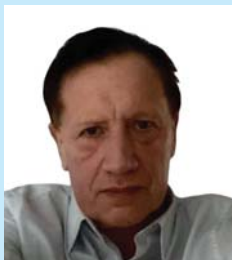




MATEUSZ KAŁUŻA

Politechnika Śląska
mateusz.kaluza@polsl.pl
ORCID: 0000-0002-9761-9066



MIROSLAW KOTASIŃSKI

Politechnika Śląska
miroslaw.kotasinski@polsl.pl
ORCID: 0000-0002-5588-0741



JOANNA BZÓWKA

Politechnika Śląska
joanna.bzowka@polsl.pl
ORCID: 0000-0002-1765-7354

Wpływ wzmocnienia nawierzchni siatką z włókna szklanego na wybrane wskaźniki krzywej ugięć nawierzchni

W budownictwie drogowym geosyntetyki stosowane są do separacji oraz wzmocnienia warstw nośnych konstrukcji nawierzchni [1, 2, 3]. Zdolność geosyntetyków do oddzielenia poszczególnych warstw podbudowy oraz podbudowy od podłoża gruntowego jest jednym z głównych czynników decydujących o wzroście trwałości konstrukcji nawierzchni drogowej. Pewne wątpliwości może budzić fakt powszechnego wzmocnienia samych warstw bitumicznych za pomocą różnego rodzaju geokompozytów, w tym siatek z włókna szklanego [3, 4, 5]. Są to rozwiązania powszechnie stosowane przez zarządców dróg, w celu podniesienia żywotności nawierzchni dróg klas niższych (D, L, Z). Zazwyczaj nie były one projektowane pod kątem występowania oddziaływań górniczych, a w opinii organów zarządzających stosowanie siatek w spodzie warstw z betonu asfaltowego stanowi alternatywę do wzmocnienia

podłoża gruntowego za pomocą stosownych, indywidualnie projektowanych rozwiązań. Problematyka właściwej lokalizacji wzmocnienia geosyntetycznego, pomimo wielu lat praktyki oraz badań, nadal pozostaje aktualna, szczególnie w kontekście obszarów występowania oddziaływań górniczych. Na analizowanym w artykule odcinku o długości 300 m zarządca drogi przeprowadził w 2008 r. remont, polegający na sfrezowaniu warstw betonu asfaltowego oraz wykonaniu nowego pakietu warstw bitumicznych. Jeden pas ruchu zrealizowano bez zabudowywania siatki z włókna szklanego, drugi natomiast wzmocniono siatką o wytrzymałości na rozciąganie 50/50 kN/m (przy wydłużeniu 3%), zabudowaną w spodzie warstw z betonu asfaltowego.

Jest to droga klasy Z, kategorii ruchu KR3, podlegająca wpływom eksploatacji górniczej zakwalifikowanym do I kategorii szkód górniczych. Na podstawie map wpływów oddziaływań górniczych uzyskanych z zakładu górniczego stwierdzono, że pomierzone obniżenia terenu w latach 2008÷2018 wyniosły do 30 cm. Obecnie teren nie podlega dalszym obniżeniom. W przypadku początkowego 100 m odcinka drogi prognozowane są oddziaływania górnicze (I kat. terenu górniczego) do 2042 r. na podstawie informacji przekazanych przez Zakład górniczy.

Materiały i metodyka badań

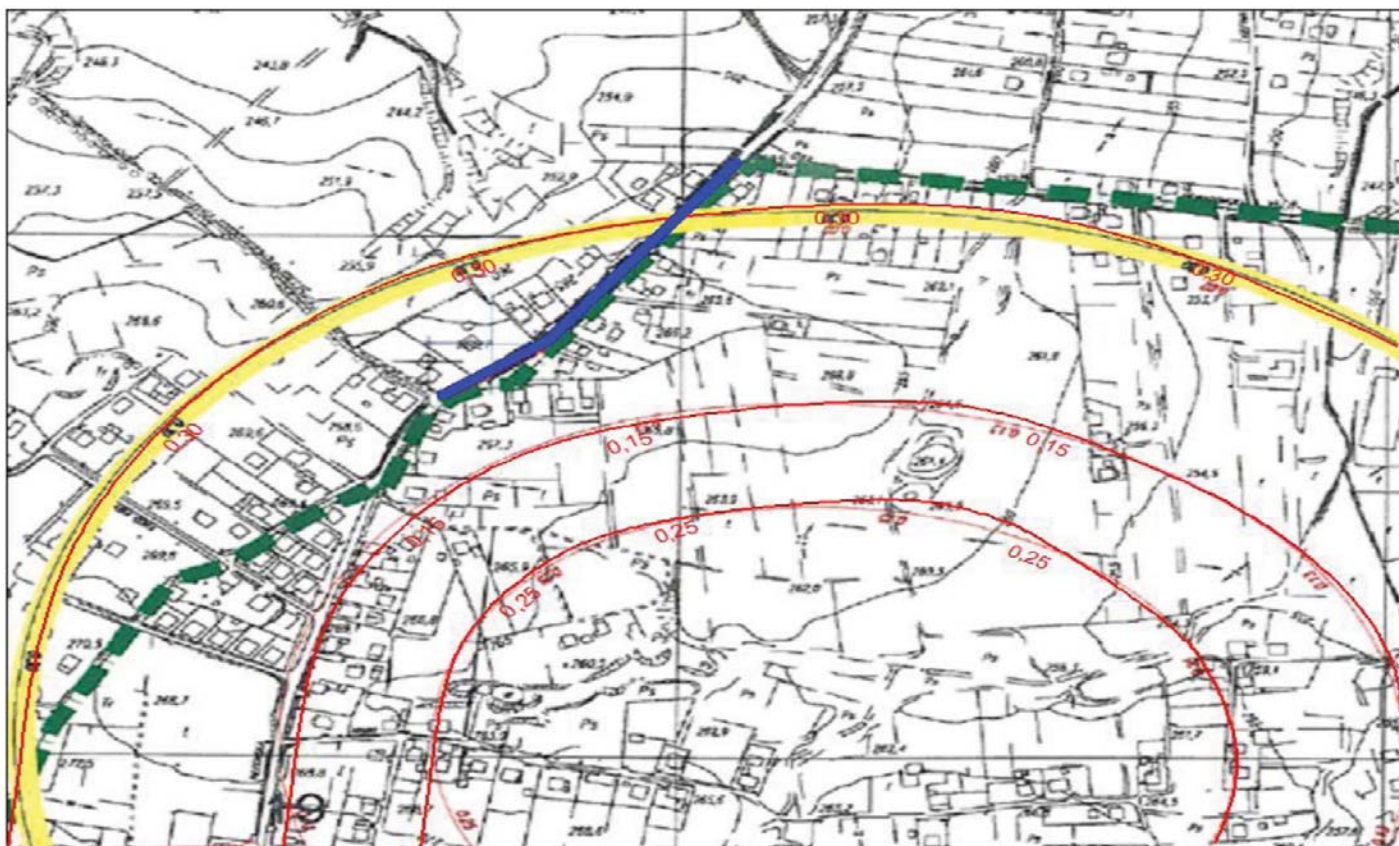
W celu rozpoznania podłoża oraz konstrukcji nawierzchni wykonano trzy odwierty do głębokości 4,0 m. Układ warstw nawierzchni analizowanej drogi przedstawia się następująco:

- 1) beton asfaltowy – 11÷12 cm,
- 2) podbudowa z kruszywa łamanego – 12÷15 cm,
- 3) grunt stabilizowany spoiwem hydraulicznym – 25 cm,
- 4) nasyp (piasek drobny, tłuczeń) – 60 cm.

Podłoże gruntowe pod nasypem wykazuje zróżnicowanie, od piasków drobnych zaglinionych (Pd+G) w stanie średniozagęszczonym poprzez gliny pylaste szaro-brązowe (G π) w stanie twaroplastycznym oraz pyły piaszczyste przewarstwione piaskiem drobnym (π p/Pd) w stanie średniozagęszczonym. Na potrzeby analiz podłoże gruntowe poniżej nasypu ujednociono w jednorodną warstwę. Wartości wtórnych modułów odkształcenia E_2 dla warstw podłoża wynoszą od 43÷70 MPa. Wykorzystano wyniki pomiarów przemieszczeń pionowych za pomocą ugięciomierza FWD.



Fot. 1. Zdjęcie odwiertu kontrolnego w pasie wzmocnionym ukazujące siatkę z włókna szklanego (materiały własne)



Rys. 1. Izolinie osiadań terenu, niebieskim kolorem wskazano analizowany odcinek drogi (materiały własne)

Badanie polegało na pomiarze ugięcia nawierzchni pod przyłożonym obciążeniem dynamicznym o wartości siły 50 kN, geofonami rozmieszczonymi w odległościach: $d_1 = 0,00$ m, $d_2 = 0,20$ m, $d_3 = 0,30$ m, $d_4 = 0,60$ m, $d_5 = 0,90$ m, $d_6 = 1,20$ m, $d_7 = 1,50$ m, $d_8 = 1,80$ m, $d_9 = 2,10$ m [1, 2]. Pomiar ugięć wykonano w śladzie prawego koła co 25 m na każdym pasie ruchu. Pomiar przeprowadzono w drugiej połowie sierpnia 2019 r. oraz we wrześniu 2021 r. Nie wyznaczano odcinków jednorodnych metodą sum skumulowanych. Pomiar wykonano na trzech odcinkach 100-metrowych, odrębnie dla pasa ruchu wzmocnionego i niewzmocnionego siatką z włókna szklanego. Badania były prowadzone w godzinach najmniejszego ruchu użytkowego, co pozwoliło na pomiar w wa-

runkach bez przeciążenia. W ramach analiz wyznaczono pomocnicze wskaźniki służące ocenie stanu nawierzchni, takie jak:

- **BLI** (ang. *Base Layer Index* nazywany również *Surface Curvature Index* SCI – wskaźnik krzywizny linii ugięć na powierzchni warstwy)

$$BLI = D_0 - D_{300} \quad (1)$$

gdzie:

D_0 – ugięcie maksymalne [μm],
 D_{300} – wartość ugięcia sprężystego w odległości 300 mm od przyłożonego obciążenia [μm].

- **MLI** (ang. *Middle Layer Index* nazywany również *Base Curvature Index* BCI – wskaźnik krzywizny ugięć na podbudowie)

$$MLI = D_{300} - D_{600} \quad (2)$$

gdzie:

D_{300} – wartość ugięcia sprężystego w odległości 300 mm od przyłożonego obciążenia [μm],
 D_{600} – wartość ugięcia sprężystego w odległości 600 mm od przyłożonego obciążenia [μm].

- **LLI** (ang. *Lower Layer Index* nazywany również *Base Damage Index* BDI – wskaźnik uszkodzenia podbudowy)

$$LLI = D_{600} - D_{900} \quad (3)$$



Fot. 2. Zdjęcie aparatu FWD na badanym odcinku drogi (materiały własne)

gdzie:

D_{600} – wartość ugięcia sprężystego w odległości 600 mm od przyłożonego obciążenia [μm],

D_{900} – wartość ugięcia sprężystego w odległości 900 mm od przyłożonego obciążenia [μm].

Tabela 1. Wartości porównawcze wskaźników czasy ugięć [9]

	Stan techniczny warstwy	D_0 [μm]	RoC [μm]	BLI [μm]	MLI [μm]	LLI [μm]
Podbudowa tłuczniowa	Dobry	< 500	> 100	< 200	< 100	< 50
	Ostrzegawczy	500–750	50–100	200–400	100–200	50–100
	Krytyczny	> 750	< 50	> 400	> 200	> 100
Podbudowa stabilizowana cementem	Dobry	< 200	> 150	< 100	< 50	< 40
	Ostrzegawczy	200–400	80–150	100–300	50–100	40–80
	Krytyczny	> 400	< 80	> 300	> 100	> 80
Podbudowa z betonu asfaltowego	Dobry	< 400	> 250	< 200	< 100	< 50
	Ostrzegawczy	400–600	100–250	200–400	100–150	50–80
	Krytyczny	> 600	< 100	> 400	> 150	> 80

- **RoC** (ang. *Radius of Curvature* – promień krzywizny opisujący stan podbudowy i warstwy ścieralnej)

$$RoC = \frac{L_2}{2D_0 \left(1 - \frac{D_{200}}{D_0}\right)} \quad (4)$$

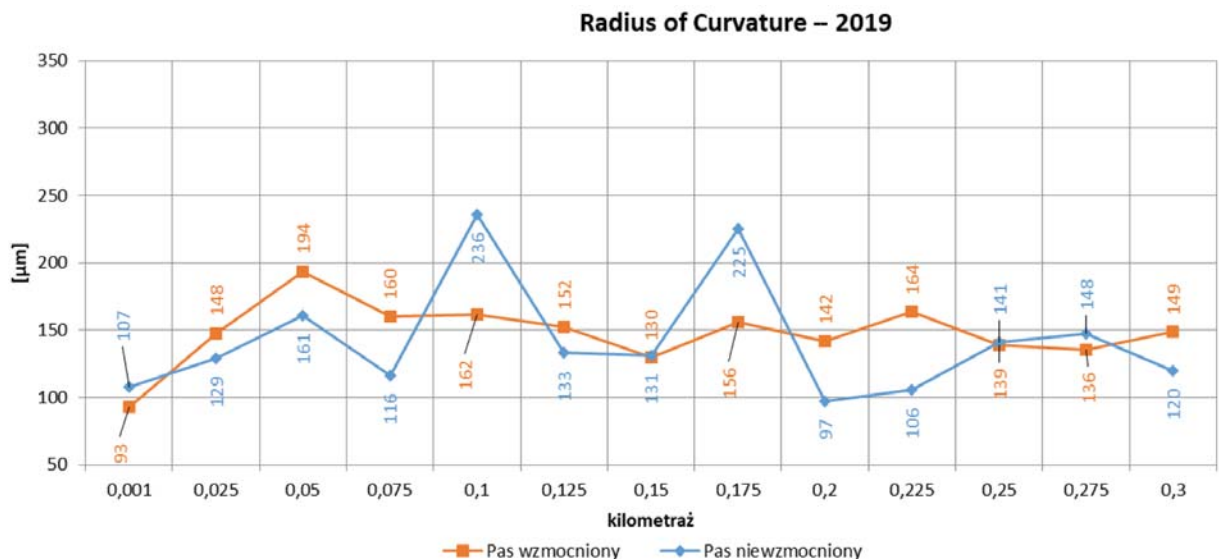
gdzie:

$L = 200$ mm,

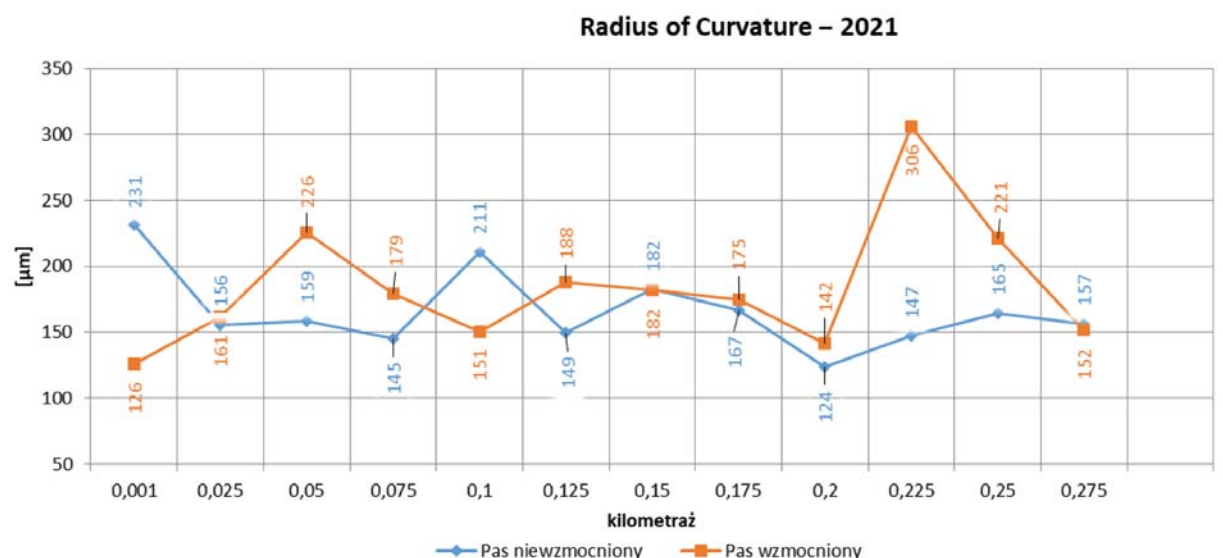
D_{200} – wartość ugięcia sprężystego w odległości 200 mm od przyłożonego obciążenia [μm],

D_0 – ugięcie maksymalne [μm].

Rys. 2. Wykres wartości wskaźnika promienia krzywizny (RoC) dla pomiaru z 2019 r.



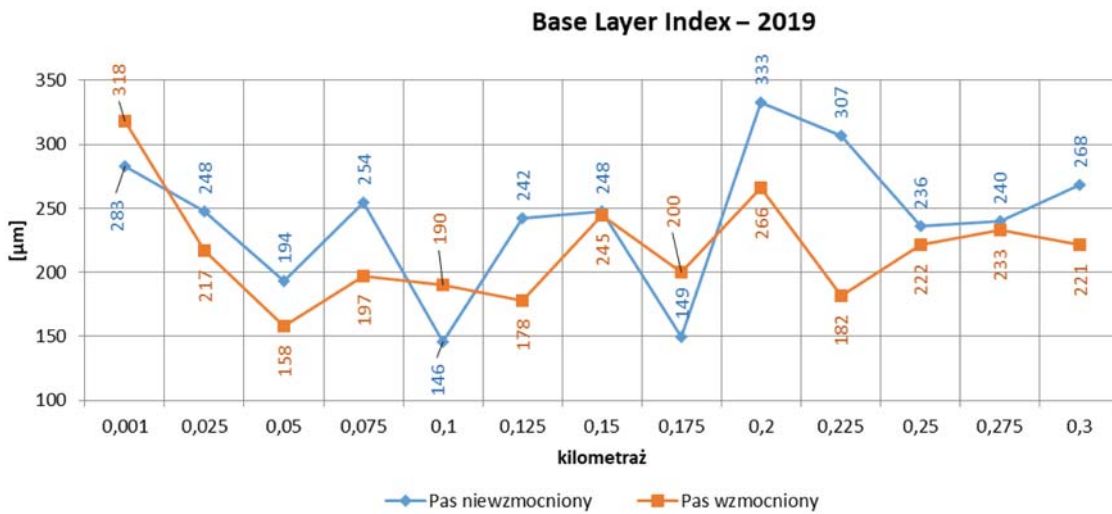
Rys. 3. Wykres wartości wskaźnika promienia krzywizny (RoC) dla pomiaru z 2021 r.



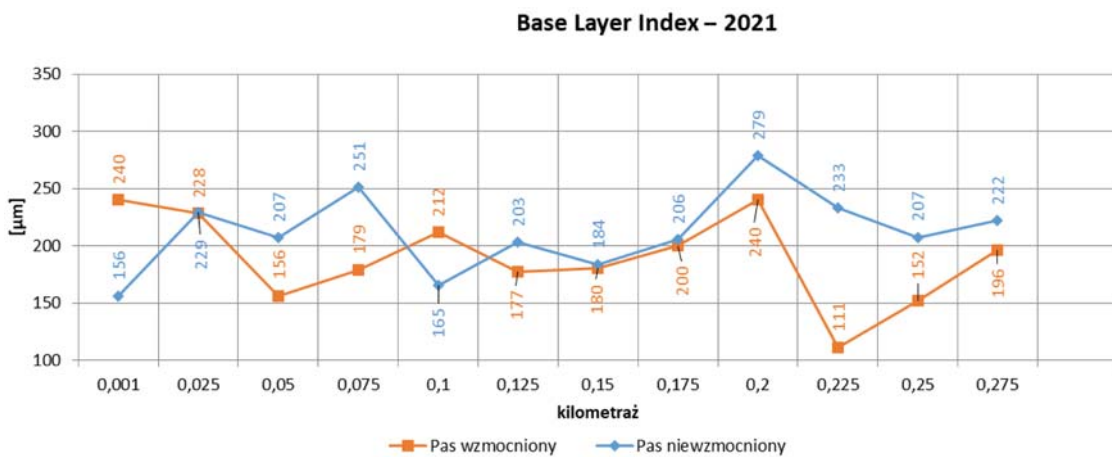
Analizy i badania wskazują, że przywołane wskaźniki krzywizny właściwie korelują z występującymi w spodzie warstw bitumicznych odkształceniami [6, 7, 8]. Są one istotne

z punktu widzenia kryteriów zmęczenia, a tym samym trwałości nawierzchni, dzięki czemu pozwalają wiarygodnie ocenić nośność nawierzchni drogi. Są również interesującym

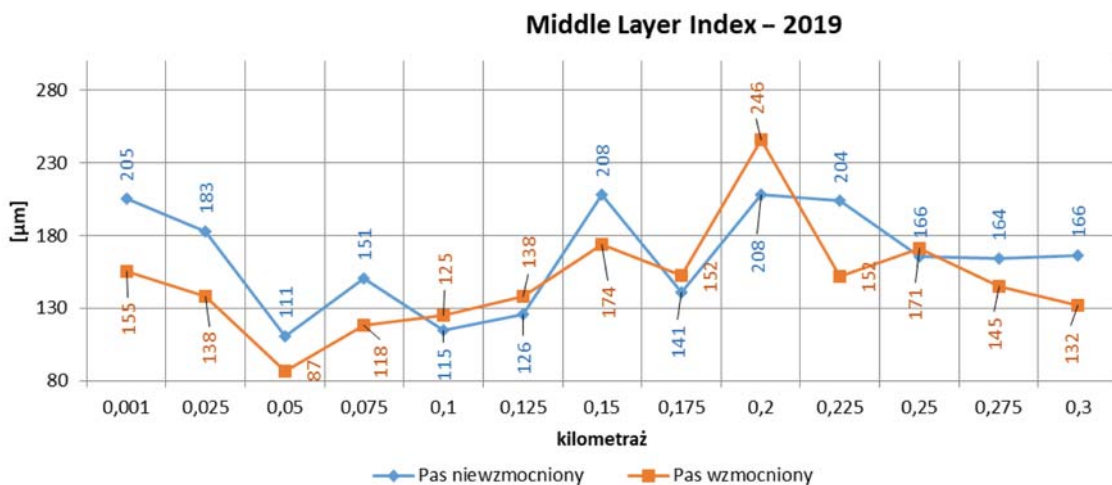
interesującym materiałem do analizy w przypadku poszukiwania wpływu zastosowanego na poligonie badawczym wzmocnienia geosyntetycznego. Porównano wyniki wskaźników czasy ugięć w przypadku pomiarów z 2019 oraz z 2021 r. w celu m.in. określenia wpływu zabudowania na ich wartości.



Rys. 4. Wykres wartości wskaźnika krzywizny linii ugięć na powierzchni warstwy (BLI) dla pomiaru z 2019 r.



Rys. 5. Wykres wartości wskaźnika krzywizny linii ugięć na powierzchni warstwy (BLI) dla pomiaru z 2021 r.



Rys. 6. Wykres wartości wskaźnika krzywizny ugięć na podbudowie (MLI) dla pomiaru z 2019 r.

Wyniki

W przypadku pomiarów z 2019 r. wartości promienia krzywizny (**RoC**), opisującego stan podbudowy i warstwy ścieralnej widoczne na rysunku 2, są wyższe dla odcinków wzmocnionych nr 1 oraz nr 3. Na odcinku nr 2 obserwujemy zmianę trendu, jednak jest to jednocześnie najbardziej zniszczony odcinek drogi. Zgodnie z przedstawionymi wartościami, każdy odcinek kwalifikuje się do dobrego stanu technicznego. Pomiar z 2021 r., pokazany na rysunku 3, potwierdził wcześniejsze obserwacje, jednak w przypadku odcinka nr 3 widzimy wyraźnie wyższe wartości w porównaniu do 2019 r.

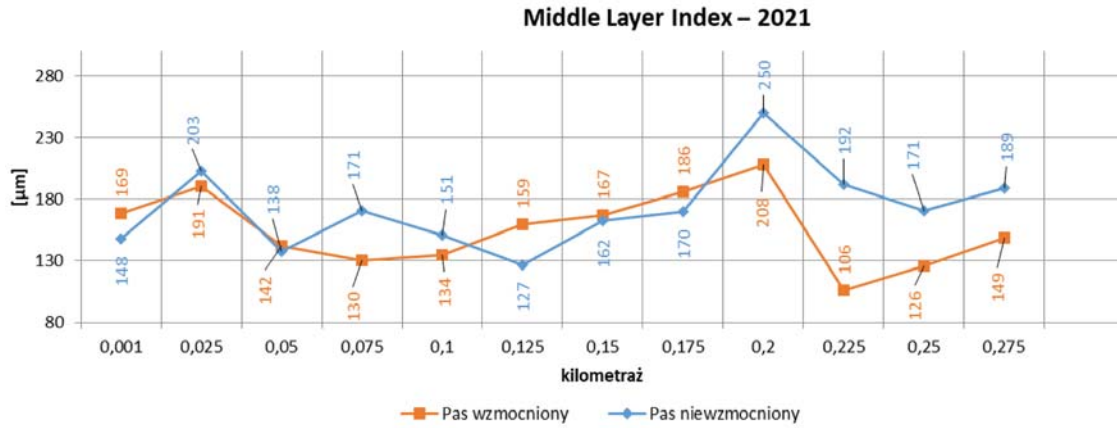
W przypadku wskaźnika krzywizny powierzchni (**BLI**) dla 2019 r., widocznym na rysunku 4, wszyst-

kie odcinki, zarówno wzmocnione, jak i niewzmocnione, wykazują ostrzegawczy stan techniczny. Należy zaznaczyć, że pas niewzmocniony generuje wyższe wartości, wskazujące na gorszy stan techniczny, co jest szczególnie widoczne na odcinku nr 3. Pomiar oraz obliczenia z 2021 r., pokazane na rysunku 5, potwierdzają wcześniejsze obserwacje.

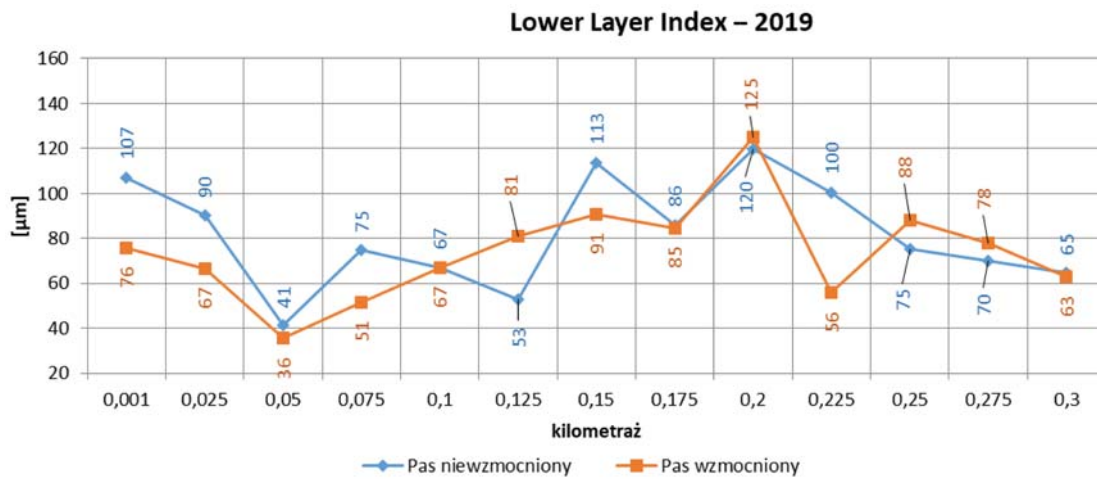
W przypadku **MLI** dla pomiaru z 2019 r., pokazanego na rysunku 6, jedynie odcinek 1 pasa wzmocnionego wykazuje dobry stan techniczny, pozostałe odcinki wskazują na stan ostrzegawczy. Ponownie, na odcinku nr 1 i nr 3 obserwujemy lepszy stan techniczny pasa wzmocnionego. Odcinek nr 2, kwalifikujący się do krytycznego stanu technicznego, nie

wykazuje znacznych różnic pomiędzy pasem wzmocnionym a niewzmocnionym. Pomiar z 2021 r., widoczny na rysunku 7, potwierdza wcześniejsze trendy, delikatne przesunięcia wartości wynikają z przesunięcia względem siebie punktów pomiarowych. Różnica wyników w stosunku do badań z 2019 r. polega na tym, że obecnie żaden odcinek nie wykazuje dobrego stanu technicznego, natomiast pozostałe ustalenia pozostają aktualne – odcinki nr 1 i nr 3 wykazują lepszy stan techniczny dla pasa wzmocnionego, a odcinek nr 2 dla pasa niewzmocnionego. Stan krytyczny pojawił się również na odcinku nr 3 pasa niewzmocnionego.

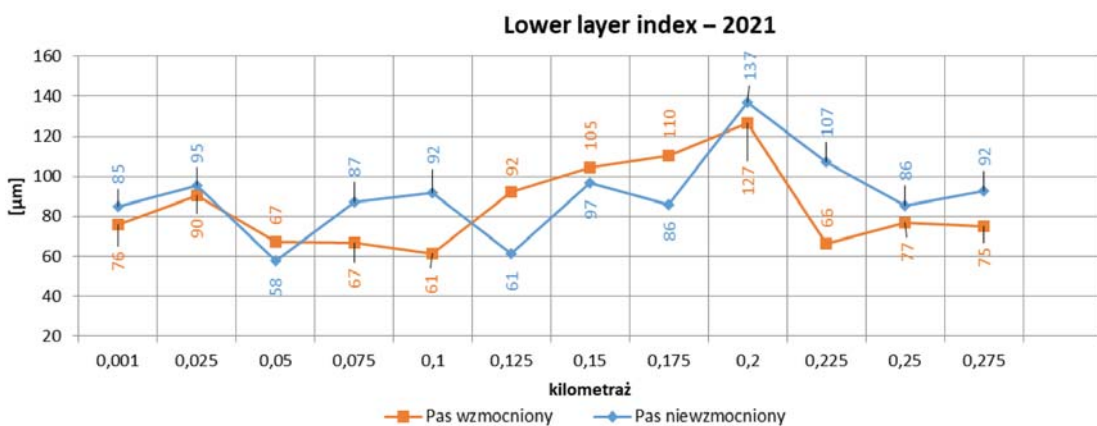
Wartości wskaźnika uszkodzenia podbudowy (**LLI**), widoczne na rysunku 8, pokazują, że odcinek nr 1 pasa wzmocnionego wykazuje dobry stan techniczny. Pozostałe odcinki kwalifikują się do stanu ostrzegawczego z drobnym obszarem pomiędzy odcinkiem nr 2 i nr 3, wykazującym stan krytyczny. Podobnie jak w przypadku pozostałych wskaźników, obserwujemy niższe ich wartości, a więc lep-



Rys. 7. Wykres wartości wskaźnika krzywizny ugięć na podbudowie (MLI) dla pomiaru z 2021 r.



Rys. 8. Wykres wartości wskaźnika uszkodzenia podbudowy (LLI) dla pomiaru z 2019 r.



Rys. 9. Wykres wartości wskaźnika uszkodzenia podbudowy (LLI) dla pomiaru z 2021 r.

szy stan techniczny dla odcinków nr 1 i nr 3 pasa wzmocnionego oraz niewielkie różnice pomiędzy pasami na odcinku nr 2. Pomiar z 2021 r. przedstawiony na rysunku 9 potwierdza wcześniejsze ustalenia, z tą różnicą, że odcinek nr 2 pasa wzmocnionego wykazuje krytyczny stan techniczny i żaden z pozostałych odcinków nie kwalifikuje się już do dobrego stanu technicznego.

Podsumowanie

Przedstawione analizy stanowią kontynuację prowadzonych od 2018 r. obserwacji odcinka badawczego. W pierwszej kolejności przeprowadzono nieniszczące badania stanu nawierzchni, bazujące na inwentaryzacji nieciągłości powierzchni, co umożliwiło wyznaczenie wskaźników spękań. Wówczas zaobserwowano ok. 20% niższe wartości tego wskaźnika dla pasa niewzmocnionego, co wstępnie wskazywało na korzystny wpływ zabudowanego wzmocnienia z siatki z włókna szklanego w spodzie warstw z betonu asfaltowego na stan techniczny tych warstw [10]. Następnie przeprowadzone pomiary FWD umożliwiły obliczenie ugięcia miarodajnego i porównanie tych wartości z wartościami referencyjnymi. Ustalono, że stan techniczny drogi jest krytyczny i wymaga natychmiastowego remontu na każdym odcinku pasa wzmocnionego i niewzmocnionego.

Dodatkowe wyznaczenie wartości wskaźników krzywizn czaszy ugięć pozwoliło na doprecyzowanie stanu technicznego warstw konstrukcji nawierzchni, tj. warstw wierzchnich, podbudowy zasadniczej i podbudowy pomocniczej z podłożem gruntowym. Wartości RoC wskazują na dobry stan techniczny górnych warstw nawierzchni, co potwierdza stan drogi oceniony na podstawie analizy stanu spękań. Pozostałe wartości wskaźników krzywizn (LLI, MLI, BLI) wskazują na zły stan techniczny dolnych warstw konstrukcji nawierzchni. Odcinek nr 2 zarówno w przypadku ugięcia obliczeniowego, jak i wskaźników krzywizny, kwalifikuje się jako najbardziej zdegradowany. Zastosowane wzmocnienie w spodzie warstw z betonu asfaltowego wskazuje na korzystny wpływ

na stan techniczny pakietu bitumicznego, bez wyraźnego wpływu na stan pozostałych warstw nawierzchni. W kontekście stwierdzonych oddziaływań górniczych zastosowane rozwiązanie można ocenić jako umiarkowanie trafne, ze wskazaniem na niestosowanie go w przyszłych pracach remontowych.

Bibliografia

- [1] Chlipalski Krzysztof, Grygierek Marcin, Kawalec Jacek, *Komunikacyjne obiekty liniowe na terenach górniczych*. „Magazyn Autostrady” 2015, vol. 3, 24-31.
- [2] Grygierek Marcin, Kawalec Jacek, Koda Eugeniusz, Osiński Piotr, Lessons learned on geosynthetic applications in road structures in Silesia mining region in Poland. *Applied Sciences*, 2019, vol. 9. DOI 10.3390/app9061122
- [3] Rosikoń Antoni, *Budownictwo komunikacyjne na terenach objętych szkodami górniczymi*. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 1979.
- [4] Kłosek Kazimierz, Prevention of damage to highways and railroads in mining area. In: International land reclamation and mine drainage conference Pittsburgh, US Department of the Interior, 1994. 101-110.
- [5] Kłosek Kazimierz, Ajdukiewicz Jacek, *Efektywność stosowania geosyntetyków w budownictwie komunikacyjnym*. W: *Szkola metod projektowania obiektów inżynierskich z zastosowaniem geotekstyliów*. Ustroń 2004.
- [6] Baltzer Susanne, Hilderbrand Gregers, HSD Measurements at the BASt Test Track. – COST 354: Short Term Scientific Mission, 2006
- [7] Eijbersen Jacomien, Van Zwieten Joost, Application of FWD Measurements at the Network Level, 1, 438-450, 4th International Conference on Managing Pavements, Pretoria, South Africa, 1998.
- [8] Pożarycki Andrzej, Górnaś Przemysław, Biłski Marcin, Turkot Adam, *Parametryzacja krzywej ugięć nawierzchni podatnych*. „Drogownictwo” 2019, vol. 3, 67-73.
- [9] Horak Emile, Emery Stephen, Evaluation of Airport Pavements with FWD Deflection Bowl Parameter Benchmarking Methodology. *Proceedings, 2nd European Airport Pavement Workshop, 13–14 May 2009*. Amsterdam, The Netherlands.
- [10] Kałuża Mateusz, Kotasiński Mirosław, Effectiveness of glass fiber mesh reinforcement applied to road construction located in a mining subsidence area. *Transactions of the VSB – Technical University of Ostrava, Civil Engineering Series*. 2019, vol. 19, issue 1, 64-69.

Zapraszamy do prenumerowania DROGOWNICTWA w 2022 roku

prenumerata roczna normalna 259 zł } (w tym 8% VAT)
cena 1 egzemplarza 21,60 zł }

prenumerata roczna studencka 129 zł } (w tym 8% VAT)
cena 1 egzemplarza 10,80 zł }

Uprzejmie informujemy Szanownych Prenumeratorów, że egzemplarze „Drogownictwa” oraz faktury będą wysyłane po przesłaniu zamówienia na adres prenumerata.drogownictwo@sitkrp.org.pl oraz po wpłaceniu należnej kwoty na nasze konto:

07 1240 6973 1111 0011 0889 5231

Wydawnictwa SITK RP sp. z o.o., ul. Świętokrzyska 14A lok. 150, 00-050 Warszawa

Redakcja