

Zmiana sztywności nawierzchni drogowej w obszarze deformacji nieciągłej

Altering of the pavement stiffness in the area of discontinuous deformation



Dr inż. Marcin Grygierek^{*)}



Mgr inż. Agata Waszak^{*)}

Treść: Na skutek prowadzonej eksploatacji górniczej na powierzchni terenu powstają deformacje ogólnie klasyfikowane jako deformacje ciągłe lub nie ciągłe. W przypadku obiektów liniowych, do których zaliczamy nawierzchnię drogową, najbardziej niekorzystną formą deformacji są deformacje nieciągłe, zasadniczo zmieniające parametry drogi zarówno pod względem jej parametrów geometrycznych, jak również wytrzymałościowych. Oczywiście tego typu deformacją towarzyszy radykalne obniżenie bezpieczeństwa użytkowników drogi. W artykule przedstawiono wybrane wyniki z terenowych badań nawierzchni drogowej, ilustrujące wpływ nieciągłości na redukcję sztywności warstw nawierzchni drogowej.

Abstract: On the soil surface some kind of deformation may occur as a result of mining exploitation. In general it is classified as continuous and discontinuous deformation. In case of linear buildings, including road pavement, discontinuous deformation is the most negative form of deformation which basically deteriorates its geometrical parameters as well as its durability parameters. Obviously this kind of deformation is accompanied by drastic worsening of road user's safety. This paper presents selected findings of fieldwork research of road pavement. It illustrates the influence of discontinuity on the reduction of layers' stiffness of a pavement construction.

Słowa kluczowe:

eksploatacja górnicza, odkształcenia poziome, pomiar ugięć nawierzchni, FWD (Falling Weight Deflectometer), analiza wsteczna, pomiary geodezyjne

Key words:

mining exploitation, horizontal strains, measurement of pavement deflection, FWD (Falling Weight Deflectometer), back-analysis, land-surveying measurement

1. Wprowadzenie

Problematyka występowania deformacji nieciągłych na terenach górniczych jest wciąż aktualna [3], a nawet nabiera jeszcze większego znaczenia. Składają się na to, nie tylko potrzeby wykorzystania pod zabudowę terenów po dokonanej płytkiej eksploatacji górniczej, ale również wpływy aktualnie prowadzonej eksploatacji głębokiej, tj. nakładanie się krawędzi eksploatacyjnych w kolejnych (co najmniej w kilku) pokładach. Odrębnym i zarazem oczywistym problemem jest eksploatacja w strefach uskoków. Deformacje nieciągłe coraz częściej towarzyszą przy budowie lub/i utrzymaniu infrastruktury drogowej [6, 3, 2, 1]. Najlepszy przykład może stanowić budowa autostrady A1, która częściowo przebiega przez tereny dokonanej płytkiej eksploatacji górniczej [5, 7] oraz problemy z utrzymaniem odpowiednich parametrów

użytkownych nawierzchni już istniejącej autostrady A4 w rejonie MOP-ów Halemba-Wirek [5, 6]. Oprócz przytoczonych przykładów istnieje wiele innych, dotyczących dróg niższego szczebla zarządów [4] niż GDDKiA.

Deformacje nieciągłe są kłopotliwe zarówno w przypadku prognozowania ich jako zjawiska, jak również w przypadku przyjęcia optymalnych i skutecznych metod zabezpieczenia konstrukcji nawierzchni drogowej.

W artykule przedstawiono 3 przypadki nawierzchni drogowych, na których wystąpiły deformacje nieciągłe, w 2. z nich zastosowane były wzmocnienia geosyntetyczne. W artykule zwrócono uwagę głównie na rozkład ugięć nawierzchni, w strefach deformacji nieciągłych. Pomimo występowania w konstrukcji nawierzchni zbrojenia geosyntetycznego, nie analizowano na tym etapie prac badawczych wpływu rodzaju zbrojenia na rozkład pomierzonych ugięć nawierzchni. Opisując i analizując każdy z przypadków nie przedstawiano genezy powstania deformacji nieciągłych, ograniczając się

^{*)} Politechnika Śląska, Wydział Budownictwa w Gliwicach

tylko do charakterystyki skutków, tj. formy i rodzaju uszkodzeń występujących na nawierzchni.

Przedstawione w artykule wyniki badań, pochodzą z pomiarów terenowych, zrealizowanych przez M. Grygiereka.

2. Omówienie i charakterystyka odcinków badawczych

Odcinki badawcze określane są w dalszej części przyładkiem A, B lub C. Na każdym z nich wykonano pomiar ugięć nawierzchni ugięciomierzem FWD (*Falling Weight Deflectometer*) [1].

Pierwszy **przypadek A**, nawierzchni drogowej, na której ujawniły się deformacje nieciągłe, dotyczy drogi obciążonej ruchem KR6. Nawierzchnia i jej podłoże budowały warstwy:

- 5 cm, warstw ścierna SMA 0/12,8,
- 10 cm, warstwa wiążąca z betonu asfaltowego o zwiększonej odporności na odkształcenia trwałe BAWMS 0/25,
- 10 cm, górna warstwa podbudowy z betonu asfaltowego o zwiększonej odporności na odkształcenia trwałe BAWMS 0/31,5
- 22 cm, dolna warstwa podbudowy z kruszywa łamanego stabilizowanego mechanicznie,
- geosyntetyk,
- warstwa mrozochronna z kruszywa stabilizowanego mechanicznie.

Na analizowanym odcinku drogi powstała liniowa deformacja nieciągła w formie uskoku przebiegającego w kierunku zbliżonym do poprzecznego w stosunku do osi drogi (rys. 1). Konsekwencją powstałej nieciągłości był próg (rys. 2) o wysokości nie przekraczającej kilku centymetrów. Pomimo zaistniałej sytuacji na nawierzchni nadal odbywał się ruch, przy istotnym ograniczeniu prędkości ruchu. Poza liniową deformacją nieciągłą, której geneza miała związek z działalnością górniczą, występowały inne uszkodzenia nawierzchni wynikające z procesów starzeniowych warstw mineralno-

-asfaltowych, czy też zmęczeniowych. Zaliczyć do nich należy spękania, przebiegające głównie w kierunku podłużnych do osi jezdni i często zlokalizowane w śladzie kół (rys. 3).

Pomiar ugięć nawierzchni wykonano w lewym śladzie koła, w odległościach od 2 m do 25 m. Temperatura warstw mineralno-asfaltowych w trakcie badań wynosiła ok. 35 °C. Siła testowa wynosiła 90 kN.

Rozkład ugięć przedstawiono na rysunku 4, na którym kolorem czerwonym zaznaczono ugięcia odpowiadające temperaturze pomiaru (+35 °C), a kolorem niebieskim ugięcia odpowiadające temperaturze +20 °C, po przeliczeniu według zależności 1 [4].

$$U_{s,+20^{\circ}\text{C}} = U_{s,T} \times [1 + 0,02 (20 - T)] \quad (1)$$

gdzie:

$U_{s,+20^{\circ}\text{C}}$ – Ugięcie nawierzchni, jak przy w temperaturze warstw MMA +20 °C

$U_{s,T}$ – Ugięcie nawierzchni pomierzone w temperaturze T warstw MMA,

T – temperatura warstw mineralno-asfaltowych w trakcie pomiaru ugięć

Rozkład ugięć (rys. 4) można uznać za zmienny, mimo to, w strefie uskoku obserwuje się charakterystyczny przyrost ugięć, do maksymalnej wartości 337 μm.

Na podstawie pomierzonych ugięć nawierzchni obliczono moduły podłoża nawierzchni (rys. 5).

Rozkład wartości modułów jest zmienny i świadczy o niejednorodności podłoża nawierzchni. Na uwagę zasługują wysokie wartości modułów, z reguły przekraczające wartość 150 MPa. Porównując rozkład ugięć i wartości modułów, należy stwierdzić, iż ugięcia pełnej nawierzchni cechują się mniejszą zmiennością, aniżeli moduły podłoża, co powinno być konsekwencją zastosowania zbrojenia geosyntetycznego lub/i występującej zmiennej grubości warstw nawierzchni powyżej podłoża nawierzchni.



Rys. 1. Deformacja nawierzchni w obszarze uskoku (fot. Grygierek M.)

Fig. 1. Pavement deformation in the area of fault (photo Grygierek M.)



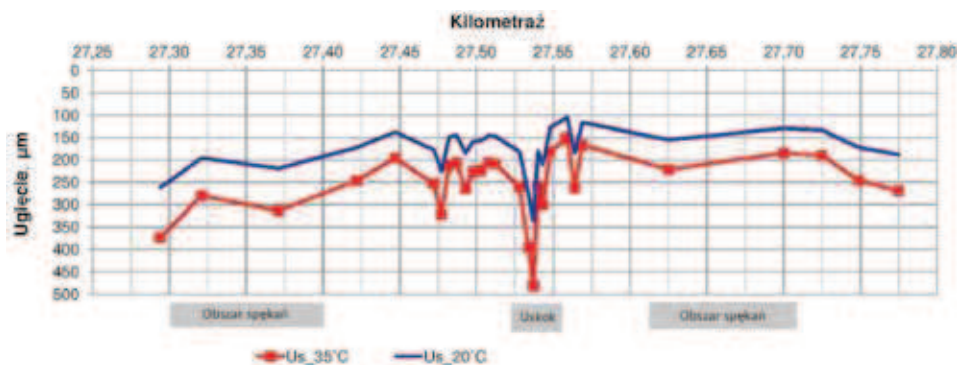
Rys. 2. Próg wzdłuż linii krawędziowej (Grygierek M.)

Fig. 2. Bump along the edge line (photo Grygierek M.)



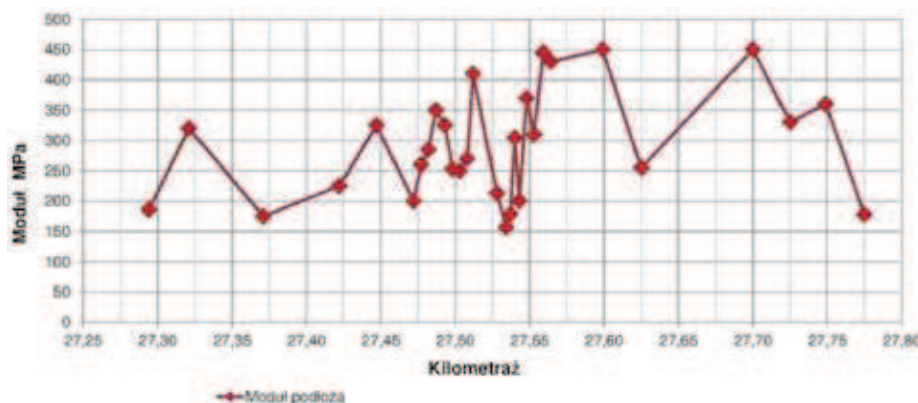
Rys. 3. Spękania zmęczeniowe poza obszarem uskoku (fot. M. Grygierek)

Fig. 3. Fatigue cracks outside the fault area (photo Grygierek M.)



Rys. 4. Pomierzone ugięcia nawierzchni wraz z lokalizacją uszkodzeń, temp. MMA 34st.C.
Fig. 4. Measured pavement deflections and their localization, temperature MMA 34 C degree

Źródło: opracowanie własne



Rys. 5. Obliczone moduły podłoża – przypadek A
Fig. 5. Calculated base modulus – case A

Źródło: opracowanie własne

Analizowany **przypadek-B** dotyczy konstrukcji nawierzchni o obciążeniu ruchem KR 6. Konstrukcja nawierzchni na analizowanym odcinku składa się z kilku sekcji, w których układ warstw nawierzchni różnił pod względem rodzaju i lokalizacji zastosowanych wzmocnień geosyntetycznych oraz grubości warstw z kruszywa stabilizowanego mechanicznie. W zestawieniu w tabeli 1 nie charakteryzowano w sposób szczegółowy geosyntetyków, co będzie przedmiotem późniejszych analiz.

Na odcinku drogi w omawianym przypadku B pojawiły się na wskutek prowadzonej eksploatacji górniczej deformacje nieciągłe. Wystąpiły sfalowania nawierzchni (rys. 7), charakterystyczne

zagiębnia w formie lokalnych niecek (zagiębnia) (rys. 7). Uszkodzenia tej grupy spowodowały radykalne pogorszenie równości nawierzchni – zarówno podłużnej, jak i poprzecznej. Na powierzchni nawierzchni pojawiły się również spękania (rys. 6÷8), głównie przebiegające w kierunku podłużnym. Wśród pęknięć można wydzielić grupę tych pęknięć, których geneza była związana z wykonanym szwem technologicznym w osi jezdni. Rozwartość tego pęknięcia była bardzo znaczna, kwalifikująca je do dużego stopnia szkodliwości. Występowały również liczne pęknięcia, nie związane z lokalizacją szwu technologicznego, które również cechowały się bardzo zaawansowaną formą degradacji warstw pakietu mineralno-asfaltowego.

Tablica 1. Zestawienie układu i grubości warstw nawierzchni na analizowanym odcinku drogi
Table 1. Summary of the system and thickness of surface layers on the analyzed road section

Lp. warstwy	Sekcja A	Sekcja B	Sekcja C
	Grubość / rodzaj warstwy	Grubość / rodzaj warstwy	Grubość / rodzaj warstwy
1	5cm / SMA 0/12,8	5cm / SMA 0/12,8	5cm / SMA 0/12,8
2	8cm / BA 0/25	8cm / BA 0/25	8cm / BA 0/25
3	-	Geosyntetyk	Geosyntetyk
4	15cm / BA 0/25	15cm / BA 0/25	15cm / BA 0/25
5	Geosyntetyk	Geosyntetyk	Geosyntetyk
6	3cm / BA 0/8	3cm / BA 0/8	3cm / BA 0/8
7	10cm / KŁSM 4/31,5	10cm / KŁSM 4/31,5	20cm / KŁSM 4/31,5
8	Geosyntetyk	Geosyntetyk	Geosyntetyk
9	10cm / KNSM 8/31,5	10cm / KNSM 8/31,5	15cm / KNSM 8/31,5
10	Geosyntetyk	Geosyntetyk	Geosyntetyk
11	-	-	Geosyntetyk

Legenda:

SMA 0/12,8 – mieszanka grysowo-mastyksowa o uziarnieniu 0/12,8 mm,

BA 0/25 – beton asfaltowy o uziarnieniu 0/25 mm,

KŁSM 4/31,5 – kruszywo łamane stabilizowane mechanicznie o uziarnieniu 4/31,5 mm

KNSM 8/31,5 – kruszywo naturalne stabilizowane mechanicznie o uziarnieniu 8/31,5



Rys. 6. Spękania i sfalowania nawierzchni – przypadek B (fot. Chlipalski K.)

Fig. 6. Cracks and pavement deformation – case B (photo Chlipalski K.)

Po wystąpieniu deformacji, na nawierzchni wykonano pomiar ugięć aparatem FWD. Pomiar wykonano w śladzie prawego koła co 25 m, stosując obciążenie testowe 80 kN. Temperatura warstw MMA w trakcie badań wynosiła około $+3\text{ }^{\circ}\text{C}$ (kolor czarny). Wartości pomierzonych ugięć zestawiono na rysunku 9 w dwóch temperaturach, tj. $+3\text{ }^{\circ}\text{C}$ (kolor czarny) – temperatura warstw MMA, w trakcie badań terenowych oraz $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$ (kolor niebieski), po skorygowaniu ugięć według zależności (1).

Prezentowane na wykresie ugięcia nawierzchni są stosunkowo jednorodne, aczkolwiek lokalnie występują ugięcia o wartościach istotnie różniących się od pozostałych, osiągających wartość około $425\text{ }\mu\text{m}$. Niestety na tym odcinku, pomiary ugięć wykonano o standardowym kroku pomiarowym, co 25 m, nie dogęszczając badań w pobliżu uszkodzeń, jak w omawianych wcześniej przypadkach. Analizując przebieg wykresu uwagę zwraca fakt, iż początkowy i końcowy odcinek drogi charakteryzuje się nieco wyższymi wartościami na odcinku około 50 m, potem ugięcia ulegają wzrostowi.

Wyniki z pomiaru ugięć pozwoliły na obliczenie wartości modułów podłoża nawierzchni za pomocą programu ELMOD, które przedstawiono na rysunku 10. Wartości modułów podłoża nawierzchni należy określić jako wysokie, bowiem rzadko osiągają wartości mniejsze niż 100 MPa , przy czym najwyższe wartości modułów zidentyfikowano dla początkowego odcinka, następnie maleją one w kierunku narastającego kilometra. Na podstawie obliczonych modułów można stwierdzić, iż podłoże jest stosunkowo jednorodne. Porównując przebieg wykresu ugięć i zidentyfikowanych modułów podłoża, można stwierdzić, iż niewielka zmienność ugięć na nawierzchni de-

terminowana jest niewielką zmiennością sztywności podłoża. Warto również zauważyć, iż na odcinku od km 12,950 do km 13+200 moduły podłoża wykazują większy rozrzut od pomierzonych ugięć na powierzchni nawierzchni, za co prawdopodobnie odpowiada zastosowane zbrojenie geosyntetyczne oraz większa grubość warstw kruszywowych. Spostrzeżenie te wymaga jednak dalszej, bardziej szczegółowej analizy. Lokalizacja poszczególnych sekcji na rys. 11.



Rys. 8. Spękania, rozwarstwienie szwu technologicznego (fot. Chlipalski K.)

Fig. 8. Cracks, disconnection along the technological seam (photo Chlipalski K.)

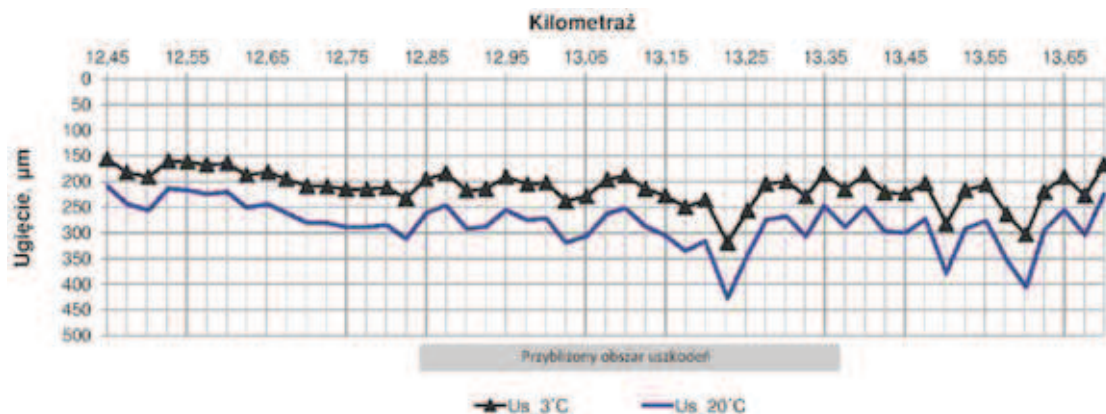
Odcinek drogi analizowany w **przypadku-C** dotyczy konstrukcji nawierzchni o obciążeniu ruchem KR4. Z otworów badawczych wykonanych w sąsiedztwie analizowanego odcinka wynika, iż nawierzchnia składa się z następujących warstw:

- 20 cm, pakiet warstw mineralno-asfaltowych,
- 35 cm, pakiet warstw z kruszywa stabilizowanego mechanicznie,
- podłoże nawierzchni



Rys. 7. Sfalowania, lokalne zagłębienia nawierzchni (fot. Chlipalski K.)

Fig. 7. Deformation, local pavement displacement (photo Chlipalski K.)



Rys. 9. Ugięcia sprężyste nawierzchni – przypadek B

Fig. 9. Elastic pavement deflection – case B

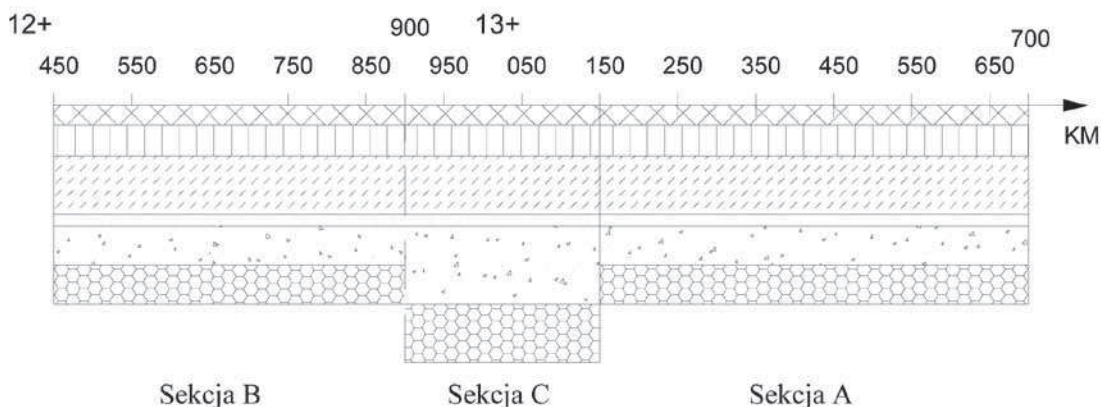
Źródło: opracowanie własne



Rys. 10. Moduły podłoża – przypadek B

Fig. 10. Calculated base modulus – case B

Źródło: opracowanie własne



Rys. 11. Lokalizacja poszczególnych sekcji – przypadek B

Fig. 11. Localization of sections – case B

Źródło: opracowanie własne

W odróżnieniu do dwóch poprzednich omawianych przypadków, w nawierzchni nie zastosowano zbrojenia geosyntetycznego.

Charakterystyczną cechą tego odcinka, jest permanentne tworzenie się deformacji nieciągłych, zarówno w pasie drogowym, jak i w przyległym terenie. Deformacje te powstają przy każdej eksploatacji górniczej prowadzonej w tym rejonie w postaci progów (uskok) terenowego. Charakter tych deformacji dobrze ilustrują rysunki 12÷14.

Warto zauważyć, iż pomimo odtwarzających się rozległych uszkodzeń nawierzchni, w tym powstających progów o wysokości około 3 cm, cały czas utrzymywany jest na tym odcinku ruch drogowy, przy ograniczeniu prędkości do 40 km/h. Deformacje nieciągłe po ujawnieniu są usuwane poprzez frezowanie, a następnie wbudowanie nowych warstw mineralno-asfaltowych, zazwyczaj warstwy wyrównawczej i ścieralnej.

Pomiar ugięć nawierzchni wykonano w prawym śladzie koła, z krokiem pomiarowym od 5 m do 50 m, zagęszczając



Rys. 12. Deformacja nieciągłe – przypadek C (fot. Grygierek M.)
 Fig. 12. Discontinuous deformation – case C (photo Grygierek M.)

częstotliwość pomiarów w bezpośrednim sąsiedztwie nieciągłości.

Wyniki pomierzonych ugięć przedstawia rysunek 15, na którym przedstawiono rozkład ugięć dla temperatury pomiaru tj. +27 °C (kolor czarny) oraz +20 °C (kolor niebieski) po korekcie ugięć według zależności (1).

Z rozkładu wartości ugięć wynika, iż nawierzchnia w analizowanym przypadku C cechuje się bardzo niejednorodną sztywnością na długości 600 m. Pomimo dużej zmienności ugięć, widoczny jest wpływ deformacji nieciągłej na wzrost ugięć. Maksymalne ugięcie w tym obszarze, przy temperaturze +20 °C wynosi 415 µm.

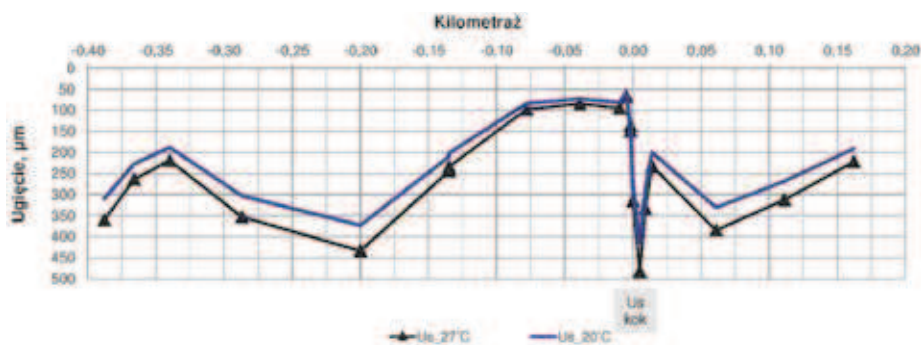
Na zróżnicowany rozkład ugięć nawierzchni wpłynęła zmienna sztywność podłoża nawierzchni (rys. 16).



Rys. 13. Deformacja nieciągłe – przypadek C (fot. Grygierek M.)
 Fig. 13. Discontinuous deformation – case C (photo Grygierek M.)

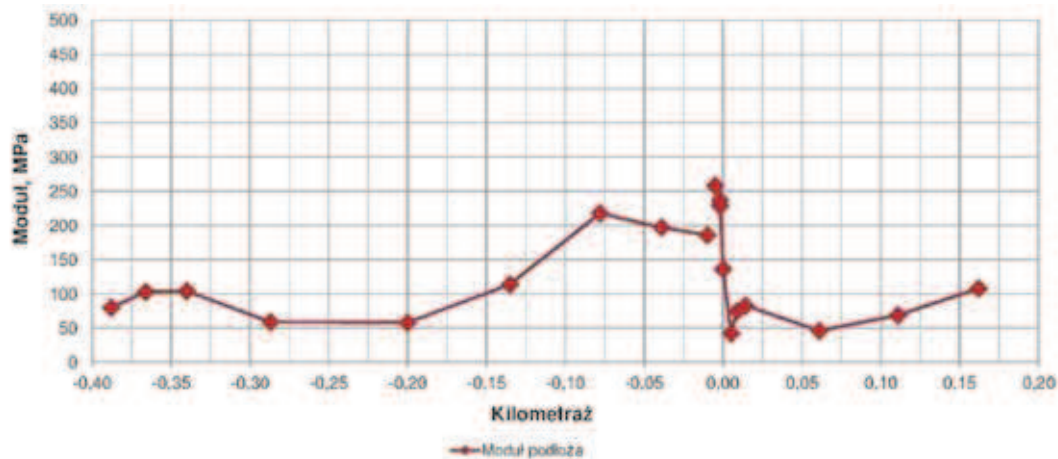


Rys. 14. Deformacja krawężnika jezdni – przypadek C (fot. Grygierek M.)
 Fig. 14. Kerb deformation – case C (photo Grygierek M.)



Rys. 15. Ugięcia nawierzchni – przypadek C
 Fig. 15. Pavement deflection – case C

Źródło: opracowanie własne



Rys. 16. Moduły podłoża nawierzchni – przypadek C

Fig. 16. Base modulus – case C

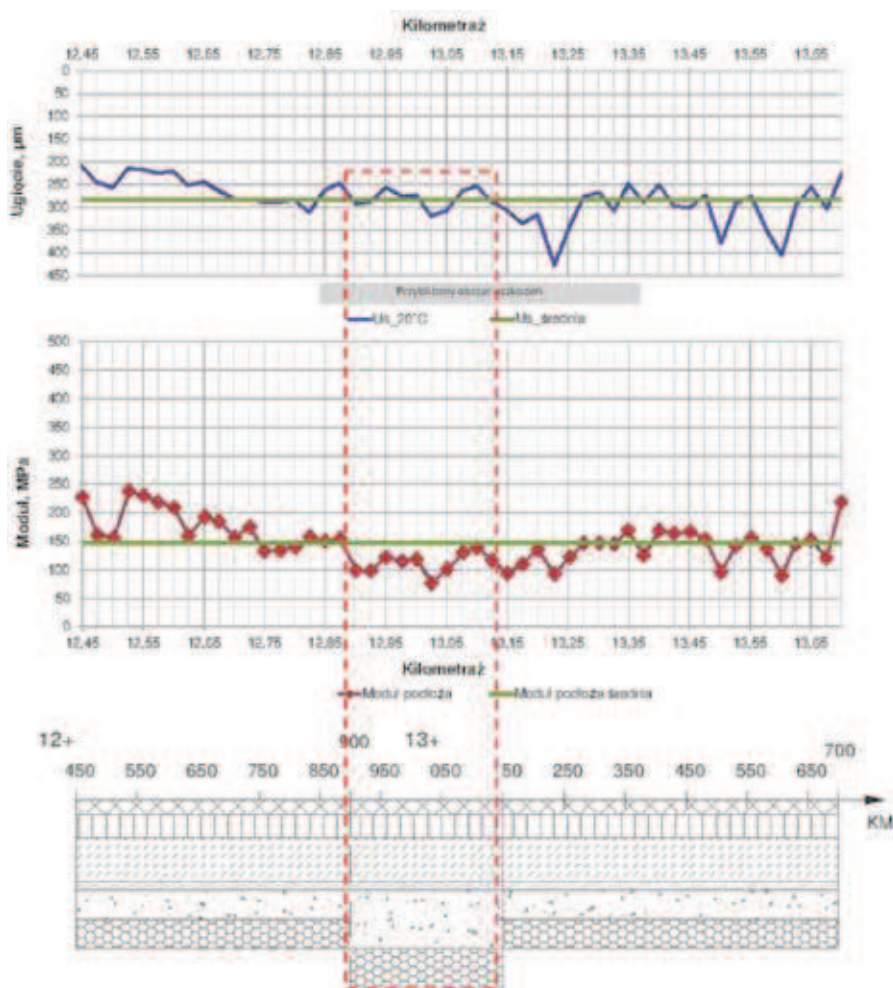
Źródło: opracowanie własne

3. Wyniki i analiza badań

Opisane 3 przypadki nawierzchni drogowych, na których ujawniły się deformacje nieciągłe, różnią się pod względem charakteru deformacji nieciągłych, grubości i układu warstw nawierzchni, sił testowych stosowanych podczas pomiaru ugięć. Wspólną cechą omawianych przypadków jest powstanie uszkodzeń znacząco pogarszających parametry użytkowe nawierzchni, w tym równość podłużną, od której zależy bezpieczeństwo użytkowników drogi, aczkolwiek pomimo

powstałych uszkodzeń, na odcinkach tych nadal odbywał się ruch pojazdów przy ograniczonej prędkości.

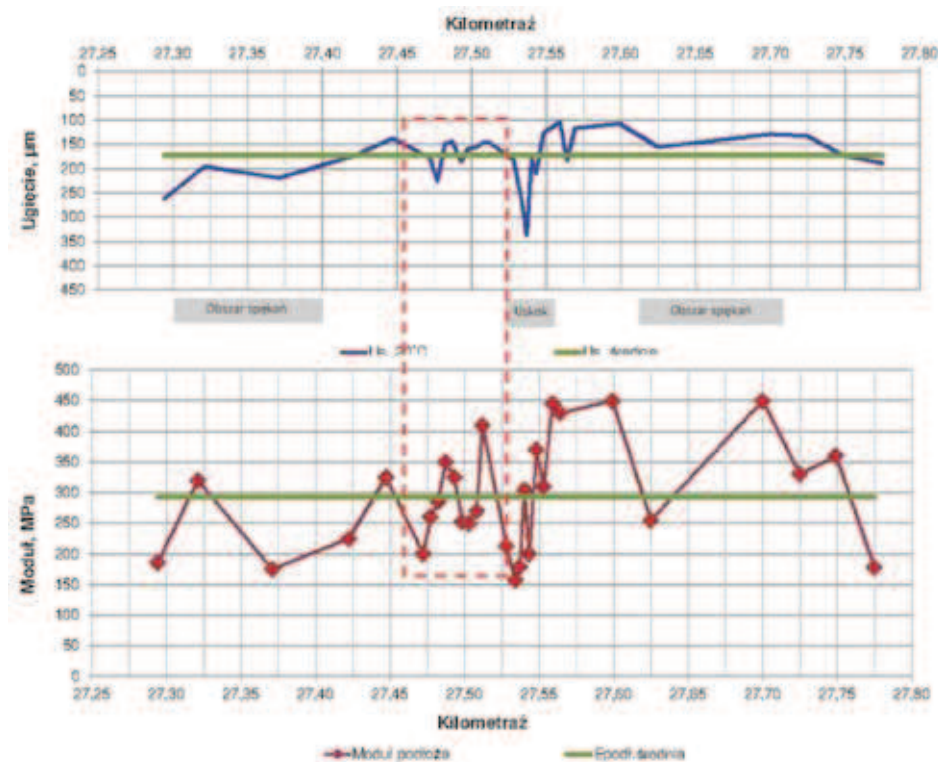
Analizując prezentowane wyniki, można stwierdzić, iż rozkład ugięć nawierzchni determinowany jest głównie przez sztywność podłoża nawierzchni, tzn. charakter rozkładu modułów podłoża jest odzwierciedlony w rozkładzie ugięć nawierzchni. Należy jednak zauważyć, iż na odcinkach z zastosowanym zbrojeniem geosyntetycznym obserwuje się pewne różnice pomiędzy rozkładem modułów podłoża, a rozkładem ugięć nawierzchni. Różnice dotyczą mniejszego przyrostu ugięć (przypadek B – rys. 17).



Rys. 17. Zestawienie wyników dla przypadku B.

Fig. 17. Collection of outcomes – case B

Źródło: opracowanie własne



Rys. 18. Zestawienie wyników dla przypadku – C

Fig. 18. Collection of outcomes – case C

Źródło: opracowanie własne

W przypadku A obserwuje się mniejsze rozrzuty ugięć w porównaniu do modułów podłoża na odcinku poprzedzającym strefę dyslokacji.

Przypadek C charakteryzuje się największą zmiennością ugięć nawierzchni i modułów. Należy jednak zauważyć, iż jest to nawierzchnia pobawiona jakichkolwiek rozwiązań z zakresu profilaktyki budowlanej, ponadto analizowana nawierzchnia była już poddawana wielokrotnie oddziaływaniom eksploatacji górniczej.

5. Podsumowanie

Przeprowadzone badania i analizy pozwalają na sformułowanie wniosków:

Wykonując pomiar ugięć nawierzchni o odpowiednim kroku pomiarowym co $2\text{ m} \div 5\text{ m}$, można na podstawie rozkładu ugięć wytypować pas nawierzchni na którym uwidoczniły się wpływy deformacji liniowej.

Na podstawie przypadków A i C, można stwierdzić, iż obszar osłabienia nawierzchni w tych konkretnych liniowych deformacjach nieciągłych wynosi około 12 m – na nim następuje znaczący wzrost ugięć nawierzchni, spowodowany redukcją sztywności głównie podłoża.

Rozkład ugięć nawierzchni jest bardzo silnie zależny od zmian sztywności podłoża (moduł podłoża).

Zastosowanie zbrojenia geosyntetycznego nie zapobiega utrzymaniu ciągłości warstw nawierzchni w przypadku liniowych deformacji nieciągłych, minimalizuje za to negatywny wpływ rozluźnienia podłoża na warstwy nawierzchni

Literatura

1. *Burak Goktepe A., Emine Agar, Hilmi Lav A.*: Advances in backcalculating the mechanical properties of flexible pavements, *Advances in Engineering Software*, nr 37
2. *Donnelly L., Culshaw M., Bell F., Tragheim D.*: Ground deformation caused by fault reactivation: some examples. The 10h IAEG International Congress, Nottingham, United Kingdom, 6-10 September 2006,
3. *Grygierek M.*: Uszkodzenia nawierzchni drogowej spowodowane nieciągłymi deformacjami górnymi. Materiały III Konferencji Naukowej – Szkoleniowej. Bezpieczeństwo obiektów budowlanych na terenach górniczych – szkody górnicze 2010
4. Katalog Typowych Konstrukcji Nawierzchni Podatnych i Półsztywnych wersja 11.03.2013, GDDKiA – Politechnika Gdańska, marzec 2013,
5. *Kotyrbka A.*: Analiza metod kartowania nieciągłości tektonicznych w kontekście wyników badań uskoku III w podłożu autostrady A4 w rejonie Kochłowic (O.G. Halemba), Konferencja Bezpieczeństwo obiektów budowlanych na terenach górniczych – szkody górnicze, Ustroń 20-21 listopada 2006,
6. *Kotyrbka A., Kowalski A.*: Liniowa deformacja nieciągła autostrady A4 na obszarze górniczym „Halemba”, Warsztaty Górnicze 2009
7. *Kowalski A.*: O liniowych nieciągłościach powierzchni. Bezpieczeństwo Pracy i Ochrona Środowiska w Górnictwie. Miesięcznik Wyższego Urzędu Górniczego nr12, Katowice 2005,
8. *Miłkowski A., Pilecki Z., Kłosek K., Tondera M.*: Autostrada A1 za projektowana na „dziurawym” podłożu – cz. 1. *Magazyn Autostrady*, nr 3/2010
9. *Stętko R.*: Konstrukcja autostrady A1 na obszarze szkód górniczych. *Magazyn Autostrady* nr 12/2011,