

Porównanie wyników ugięć nawierzchni drogi gminnej w zmiennych warunkach wilgotności podłoża gruntowego i warstw niezwiązanych

Comparison of pavement deflection results for a municipal road under varying moisture conditions of the subgrade soil and unbound pavement layers



dr inż. Przemysław Rokitoski

Szerokiej Drogi – Projekty Drogowe
p.rokitowski@gmail.com
ORCID: 0000-0002-5912-0475

Streszczenie

W artykule przedstawiono wybrane wyniki badań w zakresie pomiarów ugięć nawierzchni drogowej wykonanych ugięciomierzem FWD z odniesieniem tych wyników do pomierzonego zwierciadła wód gruntowych w obrębie pasa drogowego. Ocena jakościowa wyników pozwoliła na narysowanie różnic w pracy nawierzchni drogowej w warunkach

wysokiego zawilgocenia w warstwach konstrukcji nawierzchni drogowej oraz w sytuacji, gdy zwierciadło wód gruntowych jest usytuowane znacząco poniżej jej spodu. Doświadczenia terenowe zostały zebrane na podstawie pomiarów przeprowadzonych na jednej z dróg gminnych w województwie śląskim.

Słowa kluczowe podwyższona wilgotność, trwałość zmęczeniowa nawierzchni, ugięciomierz FWD, ugięcia nawierzchni asfaltowej

Abstract

This article presents selected results of road pavement deflection measurements conducted using a falling weight deflectometer (FWD), with reference to the groundwater table measured within the right-of-way. A qualitative assessment of the results allowed for outlining the differences in road pavement

performance under high moisture conditions in the pavement structural layers compared to a situation where the groundwater table is located significantly below the subgrade. Field experiments were based on measurements carried out on a local (commune) road in the Śląskie Voivodeship.

Keywords high moisture content, pavement fatigue life, falling weight deflectometer, bituminous pavement deflection

WPROWADZENIE

Infrastruktura drogowa znajduje się pod wpływem wielu czynników. Oddziałują one mniej lub bardziej destrukcyjnie na nawierzchnię dróg w całym cyklu jej życia, prowadząc do stopniowego pojawiania się uszkodzeń oraz utraty początkowych właściwości i parametrów techniczno-

-eksploatacyjnych. Do najbardziej oczywistych czynników należą:

- obciążenie generowane przez poruszające się pojazdy,
- reakcje z substancjami i związkami chemicznymi,
- zmiany temperatury w rytmie dobowym oraz sezonowym,

- warunki środowiskowe i atmosferyczne,
- warunki wilgotności w podłożu i wewnątrz konstrukcji nawierzchni.

Rodzaj oraz intensywność występowania tych zjawisk mają znaczący wpływ na trwałość nawierzchni i formę powstających uszkodzeń. Najbardziej niebezpiecznym duetem – przedstawianym



w literaturze technicznej oraz obecnym w doświadczeniach praktycznych – jest wysokie zawilgocenie podłoża i warstw niezwiązanych nawierzchni drogowej poddanej znacznym obciążeniom od ruchu ciężkiego [1–3]. O ile samo obciążenie powodowane przez pojazdy ciężkie prowadzi do powstania oczekiwanej szkody zmęczeniowej w nawierzchni, o tyle zwiększone zawilgocenie w podłożu oraz spodnich warstwach konstrukcyjnych znacząco osłabia całą konstrukcję drogową i powiększa szkodę jednostkową przy pojedynczym przekroczeniu danego przekroju jezdni przez oś obciążeniową [4]. W konsekwencji wyczerpanie trwałości zmęczeniowej następuje szybciej, niż zakładano na etapie projektowania i budowy, a to prowadzi do przedwczesnej decyzji o remoncie lub przebudowie odcinka drogowego.

W tym kontekście niezwykle ważne wydaje się kontrolowanie wysokości zwierciadła wody gruntowej w pasie drogowym i skuteczne jego obniżanie oraz prowadzenie działań diagnostycznych pozwalających na okresową kontrolę stanu technicznego konstrukcji nawierzchni [5, 6]. Rozwiązania do badania

wysokości zwierciadła wód gruntowych (piezometry otwarte, zamknięte, elektro-niczne) oraz jego obniżania (m.in. drenaż, igłofiltry, studnie chłonne), a także do diagnostyki stanu nawierzchni (m.in. ugięciomierz FWD, georadar, LCMS) są szeroko stosowane w praktyce inżynierskiej w Polsce i na świecie. Umożliwiają one lepsze zarządzanie majątkiem drogowym oraz optymalizację kosztów związanych z bieżącym utrzymaniem i wieloletnim planowaniem inwestycji komunikacyjnych.

W artykule przedstawiono studium przypadku drogi gminnej wybudowanej na gruntach o ograniczonej przepuszczalności, w warunkach permanentnego występowania wysokiego poziomu zwierciadła wód gruntowych. Na etapie projektowania, budowy oraz w początkowym okresie eksploatacji drogi warunki wodne były niekorzystne. Uległy one jednak poprawie w trakcie budowy obiektu produkcyjno-magazynowego w rejonie omawianego odcinka drogi gminnej.

Na podstawie danych pozyskanych z systemu piezometrów otwartych oraz z pomiarów ugięć nawierzchni prowadzo-

nych ugięciomierzem dynamicznym FWD opisano zmiany maksymalnych wartości ugięć w powiązaniu z wysokością zwierciadła wód gruntowych.

CHARAKTERYSTYKA ODCINKA DROGI GMINNEJ

Omawiana droga gminna jest położona w jednym z miast w południowej części województwa śląskiego. Jej lokalizacja i przebieg mają służyć dwóm zasadniczym celom:

- umożliwieniu dostępu do przyległych działek przeznaczonych na tereny inwestycyjne oraz strefę ekonomiczną;
- powstaniu zachodniej obwodnicy miasta i połączeniu kluczowych dróg gminnych, wojewódzkich oraz krajowych w okolicy miasta.

Droga gminna została zaprojektowana jako zbiorcza o prędkości do projektowania $v_p = 60$ km/h i przekroju jednojezdniowym dwupasowym ($Z1 \times 2$) z obustronnymi dodatkowymi pasami postojowymi dla samochodów ciężarowych. Droga ma przekrój uliczny jednostronny, w którym całkowita szerokość jezdni wynosi 13,00 m (jezdnia oraz obustronne pasy postojowe), a przy



Fot. 1. Omawiany odcinek drogi gminnej po oddaniu do użytkowania

wschodniej krawędzi znajdują się ciąg pieszy (1,50 m) oraz droga dla rowerów (2,50 m) (fot. 1). Obustronnie tereny przyległe oraz ciąg pieszy i rowerowy są wydzielone od drogi krawężnikiem drogowym o wyniesieniu 0,12 m z lokalnym obniżeniem na zjazdach na wysokość 0,04 m.

Wody deszczowe są odprowadzane przez właściwie poprowadzone spadki podłużne i poprzeczne, kierujące wodę opadową do wpustów deszczowych,

a dalej do kanalizacji deszczowej. Ulica ma przekrój daszkowy na odcinkach prostych oraz jednostronnie pochyłony na odcinkach prowadzonych w łuku poziomym. Półsztywna konstrukcja nawierzchni KR4 obejmuje:

- warstwę ścieralną, wiążącą i podbudowę zasadniczą z mieszanki mineralno-asfaltowej;
- podbudowę i warstwę wzmacniającą z kruszywa łamanego stabilizowanego mechanicznie;

- ulepszone podłoże z gruntu stabilizowanego cementem.

Sumaryczna grubość nawierzchni drogowej wynosi 1,05 m i spełnia warunków mrozoodporności. W obrębie pasa drogowego, poza linią krawężników zewnętrznych, usytuowano obustronnie drenaż, który ma trwale obniżać zwierciadło wód gruntowych, przejmować ich nadmiar i nie dopuszczać do nawodnienia konstrukcji nawierzchni.

Wybór odcinka do badań i analiz poprzedziło zebranie informacji o warunkach gruntowo-wodnych (na etapie projektowania) oraz obserwacji poczynionych w trakcie prac budowlanych (na etapie realizacji). Zgodnie z opinią geotechniczną podłoże gruntowe na całej długości odcinka stanowią gliny oraz gliny piaszczyste z rzadkimi przewarstwieniami piasków średnich i drobnych. Poziom zwierciadła wód gruntowych stabilizował się na głębokości od 1,20 do 2,40 m p.p.t., co przy całkowitej grubości wszystkich warstw konstrukcji nawierzchni i ulepszonego podłoża równej 1,05 m pozwalało stwierdzić, że wody gruntowe będą się znajdować od 0,15 do 1,35 m poniżej spodu warstwy ulepszonego podłoża. Niekorzystne warunki wodne potwierdzono w trakcie wykonywania robót budowlanych (fot. 2), a także eksploatacji, gdy w bezpośrednim sąsiedztwie jezdni tworzyły się zastoiska wodne (fot. 3).



Fot. 2. Zastoisko wodne w rejonie prowadzonych robót ziemnych



Fot. 3. Zastoisko wodne w sąsiedztwie pasa drogowego na etapie eksploatacji

Fot. autora

Tab. 1. Działania obserwacyjne i diagnostyczne podjęte na odcinku drogi gminnej

Działanie	Typ działania	Ilość/częstotliwość	Metoda badawcza
Dokumentacja fotograficzna	obserwacyjne	przy każdym działaniu w terenie	fotografia cyfrowa
Pomiar zwierciadła wody gruntowej (ZWG)	obserwacyjne	- co tydzień w okresie marzec–kwiecień i wrzesień–listopad, - co 2 tygodnie w pozostałym czasie	piezometr otwarty z pomiarem ręcznym
Pomiar równości poprzecznej	diagnostyczne	raz w miesiącu	metoda łaty i klina, przekrój co 25 m
Pomiar ugięć nawierzchni	diagnostyczne	2 razy w okresie marzec–kwiecień i październik–grudzień, - raz w okresie lipiec–sierpień	pomiar ugięciomierzem dynamicznym FWD, punkt co 25 m
Pomiar ciągły układu warstw konstrukcji nawierzchni i wysokości ZWG z użyciem georadaru	diagnostyczne	- raz wiosną, - raz jesienią	georadar

ZASTOSOWANE METODY POMIAROWE

Po 3 miesiącach od zakończenia prac budowlanych i oddania drogi do użytkowania odcinek objęto obserwacją oraz badaniami diagnostycznymi. Było to związane z zastoiskami wodnymi, które pojawiały się w odległości od 1,0 do 4,5 m od krawędzi jezdni lub krawędzi ciągu rowerowego. Procedury badawczo-diagnostyczne były realizowane przez 3,5 roku. Rodzaj i zakres działań obserwacyjnych oraz diagnostycznych zestawiono w tab. 1.

W trakcie 3,5-letniego okresu obserwacji droga gminna była zamknięta dla ruchu pojazdów przez 2 lata i dostępna przez pozostały czas. Po 6 miesiącach od udostępnienia drogi kierowcom na jednej z działek sąsiadujących z omawianym odcinkiem rozpoczęła się budowa zakładu produkcyjno-magazynowego, która trwała przez 9 miesięcy. Obserwacje oraz badania zakończono po 3 miesiącach od wybudowania zakładu.

Przedstawione badania koncentrują się na porównaniu wyników:

- z początku obserwacji (15 października 2021 r.),
- okresu najbardziej niekorzystnych warunków wodnych (21 marca 2022 r.),
- z końca obserwacji, gdy zakład produkcyjno-magazynowy był już wybudowany (10 października 2024 r.).

Pomiar zwierciadła wody gruntowej

Jedną z obserwacji poczynionych na etapie budowy drogi gminnej, tj. przed rozpoczęciem badań diagnostycznych i pomiarów terenowych, było stwierdzenie wysokiego poziomu wody gruntowej, sięgającego od 0,15 do 1,35 m poniżej spodu warstwy ulepszonego podłoża. W celu regularnej weryfikacji poziomu zwierciadła wody gruntowej i jego okresowych wahań na poligonie terenowym wykonano system otwarty po-

miaru wody gruntowej bez pomiaru ciśnienia wody zgodnie z normami [7] i [8].

Na poligonie terenowym zrealizowano 18 orurowanych odwiertów obserwacyjnych z rur PVC o średnicy 0,05 m, z otworami na obwodzie o średnicy 0,008 m nawierconymi w odstępach co 0,05 m (fot. 4). W wierzchniej części każdej z tych rur zastosowano zaślepki, które zabezpieczały piezometr przed bezpośrednim napływem wód opadowych. Otwory badawcze usytuowano



Fot. 4. Przykładowa lokalizacja jednego z piezometrów otwartych w pasie drogowym



Rys. 1. Usytuowanie wszystkich punktów pomiaru wysokości zwierciadła wody gruntowej na badanym odcinku: żółte kropki – piezometry umieszczone w odległości do 1,50 m od krawędzi jezdni, strona prawa; granatowe kropki – piezometry umieszczone za ciągiem pieszko-rowerowym w odległości do 5,00 m od krawędzi jezdni, strona lewa

na terenach zielonych przylegających do drogi lub elementów jej wyposażenia, w odległości ok. 1,50 m (rys. 1 – punkty żółte) oraz ok. 5,00 m (rys. 1 – punkty granatowe) od krawędzi jezdni. Pomiar poziomu zwierciadła wody gruntowej prowadzono do głębokości 1,50 m poniżej niwelety drogi gminnej.

Badanie ugięć nawierzchni z wykorzystaniem ugięciomierza dynamicznego FWD

Ugięciomierz dynamiczny FWD (ang. falling weight deflectometer) służy

do pomiarów przemieszczeń pionowych układu warstwowego konstrukcji nawierzchni pod obciążeniem generowanym przez obciążnik o ustalonej masie (fot. 5). Badanie polega na wykonaniu zrzutu obciążnika na stalową płytę, której zadaniem jest rozłożenie punktowego impulsu siłowego na powierzchnię kołową o średnicy ok. 0,30 m, imitującą powierzchnię kontaktową opony pojazdu. W wyniku działania obciążenia w zakresie od 7 do 300 kN konstrukcja nawierzchni oraz podłoże ulegają odkształceniu sprężystemu na pewnym obszarze,

a przemieszczenia pionowe są rejestrowane przez zestaw specjalnie usytuowanych przetworników, zwanych geofonami (fot. 6). Geofon centralny znajduje się w osi obciążenia, a pozostałe geofony są odsunięte od osi obciążenia najczęściej o: 0,20, 0,30, 0,60, 0,90, 1,20, 1,50, 1,80 i 2,10 m. Do badań na nawierzchniach drogowych stosuje się obciążenia o wartości od 50 do 65 kN, co odpowiada naciskowi osi pojazdu o wartości od 100 do 130 kN. Pomiar przeprowadza się punktowo przy zatrzymanym pojeździe holującym.

W efekcie pomiarów wykonanych ugięciomierzem dynamicznym FWD powstaje czasza ugięć obrazująca przemieszczenia pionowe powierzchni zarejestrowane przez geofony w konkretnych odległościach od punktu obciążenia symulującego obciążenie od koła pojazdu ciężkiego. Dane pozyskane z takich badań terenowych mogą również posłużyć do oceny stanu technicznego nawierzchni zgodnie z [9] lub do wykonania analizy wstecznej pozwalającej na ocenę pozostałej trwałości zmęczeniowej nawierzchni drogowej [10].

WYBRANE WYNIKI BADAŃ TERENOWYCH

W ramach obserwacji, badań i pomiarów terenowych przeprowadzono 18 sesji pomiarowych z wykorzystaniem ugięciomierza dynamicznego FWD. W dalszej części artykułu przedstawiono

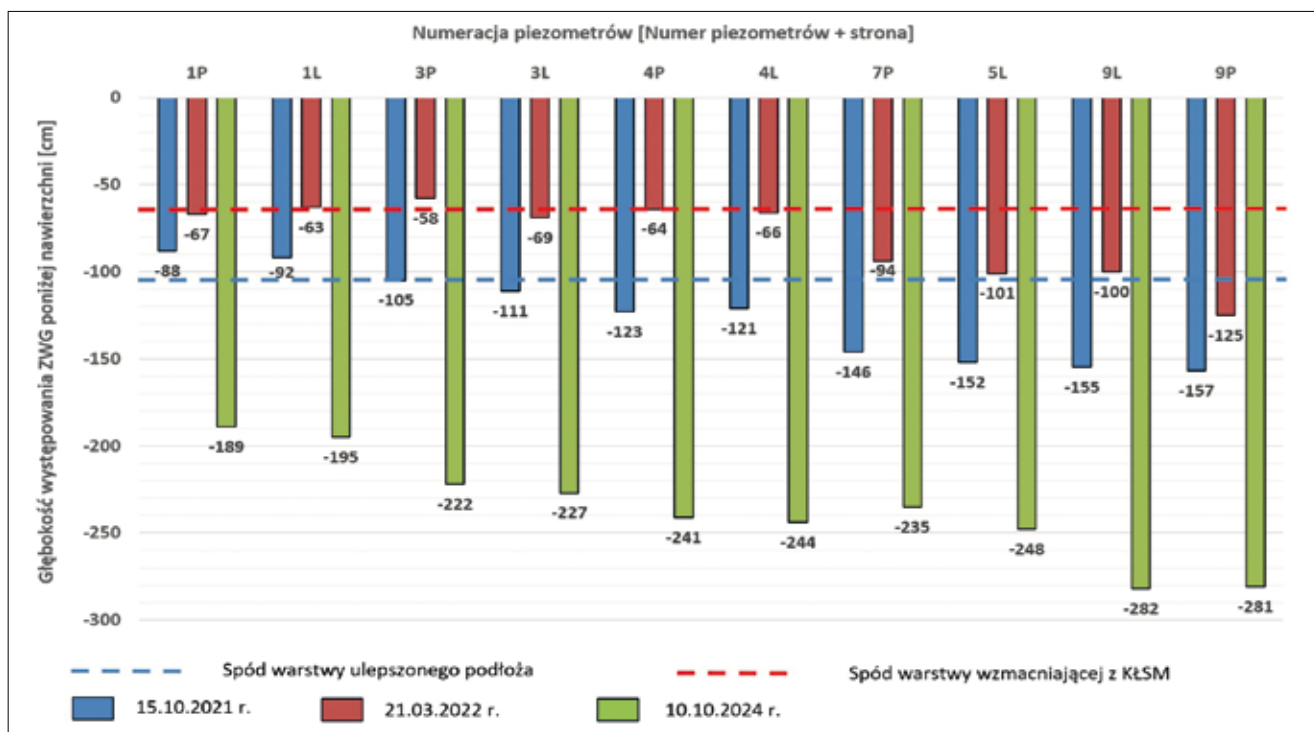


Fot. 5. Ugięciomierz dynamiczny FWD w formie przyczepy holowanej przez pojazd



Fot. 6. Płyta obciążeniowa wraz z belką i zamocowanymi geofonami

Fot. i rys. autora



Rys. 2. Wysokość zwierciadła wody gruntowej w stosunku do powierzchni nawierzchni drogi gminnej na podstawie pomiarów z piezometrów otwartych

wybrane wyniki badań wykonanych w dniach:

- 15 października 2021 r. – początek okresu obserwacji,
- 21 marca 2022 r. – data stwierdzenia najbardziej niekorzystnych warunków wodnych w trakcie całego okresu obserwacji,
- 10 października 2024 r. – koniec okresu obserwacji oraz zakończenie budowy zakładu produkcyjno-magazynowego.

Uzyskane dane zestawiono i porównano z wysokością zwierciadła wód gruntowych w obrębie pasa drogowego, odczytaną z konkretnych piezometrów usytuowanych po obu stronach drogi gminnej. Piezometry oznaczone na rys. 1 kolorem żółtym znajdują się po prawej stronie (P), a te w kolorze granatowym – po lewej (L). Numerowanie piezometrów rozpoczęto od skrzyżowania typu rondo, nadając kolejne numery i literę oznaczającą stronę, po której usytuowany jest dany punkt pomiaru wysokości zwierciadła wód gruntowych. Po stronie prawej występują piezometry od 1P do 9P, a po stronie lewej – od 1L do 9L.

Wyniki z wybranych otworów pomiarowych w wymienionych trzech terminach badań przedstawiono na rys. 2.

Na wykresie (rys. 2) widać, że 21 marca 2022 r. warunki wodne na obserwowanym terenie były bardzo niekorzystne. W punktach 1P, 1L, 3P, 3L, 4P i 4L zwierciadło wody gruntowej w bezpośrednim sąsiedztwie jezdni drogi gminnej

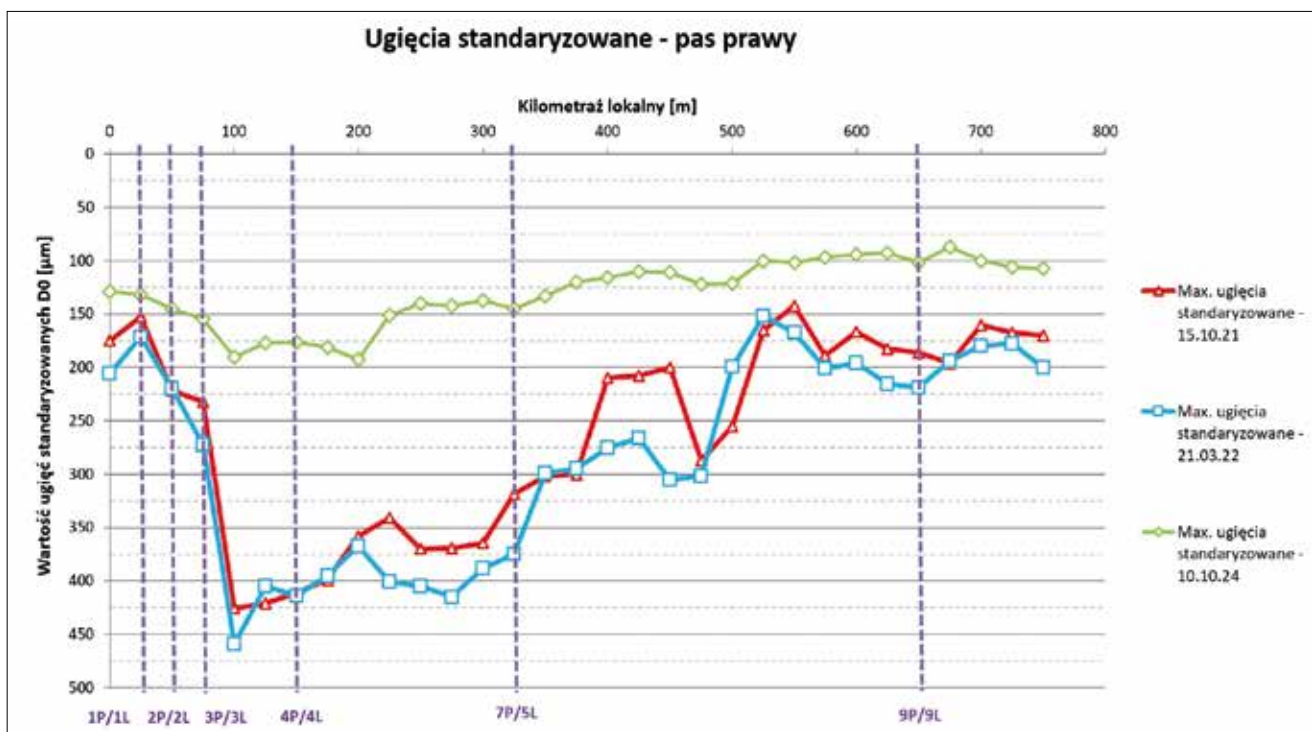
w otworach 1P i 1L zwierciadło wód gruntowych stabilizowało się w obszarze ulepszonego podłoża.

W obu przypadkach wysoki poziom wody gruntowej miał bezpośredni wpływ na pracę całego układu warstwowego nawierzchni drogowej. Nadmierne zawilgocenie w warstwie wzmacniającej z mieszanki niezwiązanej wpłynęło

Wysoki poziom wody gruntowej miał bezpośredni wpływ na pracę całego układu warstwowego nawierzchni drogowej.

stabilizowało się na poziomie około 0,60–0,70 m poniżej powierzchni warstwy ścieralnej, tj. w obrębie warstwy wzmacniającej z mieszanki niezwiązanej. W pozostałych otworach poziom wód gruntowych znajdował się na wysokości warstwy ulepszonego podłoża lub kilkadziesiąt centymetrów pod nią. W początkowej fazie okresu obserwacji (15 października 2021 r.) warunki wodne również były niekorzystne, jednak tylko

na upośledzenie mechanizmu dystrybucji obciążenia na podłoże gruntowe, a wysoka wilgotność podłoża nie pozwoliła na zapewnienie solidnego podparcia dla całej konstrukcji drogowej. W efekcie nawierzchnia drogowa pracująca w sposób permanentny w tak niekorzystnych warunkach doznawała nadmiernych ugięć pod obciążeniem jednostkowym, a co za tym idzie – szybciej postępował proces jej degradacji.



Rys. 3. Wyniki pomiarów ugięć nawierzchni drogi gminnej w prawym śladzie koła pojazdu na prawym pasie ruchu w wybranych terminach pomiarów

Na przeciwnym biegunie znajdowały się wyniki z pomiarów końcowych, gdy w żadnym z otworów nie zaobserwowano poziomu wód gruntowych bliżej niż w odległości ok. 0,85 m od spodu warstwy ulepszanego podłoża. Zdecydowana większość otworów charakteryzowała się brakiem wysokiego zawilgocenia do głębokości co najmniej 2,20 m poniżej powierzchni warstwy ściernalnej. Stwarzało to dużo korzystniejsze warunki do pracy nawierzchni pod obciążeniem od ruchu kołowego.

Wadliwy mechanizm dystrybucji obciążeń w warunkach wysokiego nawodnienia w spodniej części konstrukcji nawierzchni drogi gminnej potwierdziły wyniki badań ugięć ugięciomierzem dynamicznym FWD. W niniejszym artykule przedstawiono wyniki uzyskane dla prawego koła pojazdu na prawym pasie ruchu, tj. bliżej piezometrów oznaczonych kolorem żółtym (rys. 1). Punkty te wybrano do analizy z uwagi na ich bliższe usytuowanie w stosunku do krawędzi jezdni oraz otworów badawczych, w których notowano bardziej niekorzystne

wyniki pomiarów wysokości zwierciadła wód gruntowych.

W każdym punkcie pomiarowym wykonano po dwa zrzuty obciążenia: pierwszy kalibracyjny oraz drugi z obciążeniem ok. 50 kN. Do dalszych analiz przyjęto wartości ugięć uzyskane przy drugim zrzucie.

Wartości przemieszczeń pionowych (ugięć) nawierzchni zostały wyznaczone dzięki układowi dziewięciu geofonów znajdujących się w osi obciążenia (geofon centralny) oraz w odległościach odpowiednio: 0,20, 0,30, 0,45, 0,60, 0,90, 1,20, 1,50 i 1,80 m od osi obciążenia. Przed każdą serią pomiarową i po niej mierzono temperaturę powietrza atmosferycznego, powierzchni nawierzchni oraz warstw asfaltowych na głębokości równej połowie ich sumarycznej grubości. Rezultaty zostały zapisane w programie komputerowym do analizy i obróbki pomiarów ugięć oraz podlegały standaryzacji z uwagi na siłę uderzenia testowego, temperaturę warstw asfaltowych, rodzaj podbudowy, a także termin wykonywania pomiarów. Wyniki zestawiono na rys. 3.

Ukształtowanie wykresów ugięć standaryzowanych na długości obserwowanego odcinka w okresach charakteryzujących się wysokim nawodnieniem gruntu podłoża oraz spodnich części nawierzchni (15 października 2021 r. i 21 marca 2022 r.) wyglądało zdecydowanie odmiennie niż podczas badania prowadzonego przy znacznie obniżonym poziomie zwierciadła wód gruntowych (10 października 2024 r.). Analizując cały odcinek, należy zauważyć, że najwyższe wartości ugięć odnotowywano na początkowych 300 m, a dalsza część drogi gminnej uzyskiwała korzystniejsze wyniki pomiarów (niższe wartości ugięć).

Ugięcia standaryzowane na odcinku 0–300 m mieściły się w granicach: od 153 do 426 μm (15 października 2021 r.), od 172 do 459 μm (21 marca 2022 r.) i od 129 do 192 μm (10 października 2024 r.), a wartości średnie ugięć standaryzowanych na poszczególnych odcinkach wyniosły odpowiednio: 326, 348 i 157 μm . Można więc stwierdzić, iż ugięcia standaryzowane na najbardziej newralgicznym odcinku były ponaddwukrotnie

wyższe w warunkach wysokiego nawodnienia niż w momencie, gdy zwierciadło wód gruntowych wyraźnie obniżyło się poniżej spodu konstrukcji nawierzchni drogi gminnej. Na pozostałej części odcinka zaobserwowano tendencję do redukcji wartości rejestrowanych ugięć, co również ma związek z korzystniejszymi warunkami wodnymi, nawet w przypadku krytycznego dnia pomiarowego (21 marca 2022 r.). Na długości odcinka od kilometrażu lokalnego 325 do końca trasy średnie ugięcia standaryzowane wyniosły: 211 (15 października 2021 r.), 234 (21 marca 2022 r.) i 109 μm (10 października 2024 r.), czyli były o ok. 33% niższe niż na początku trasy.

W analizie całego odcinka skupiono się na wartościach ekstremalnych w zakresie średnich ugięć standaryzowanych oraz średniej wysokości zwierciadła wody gruntowej w stosunku do powierzchni nawierzchni. Najwyższa średnia wartość ugięcia standaryzowanego w osi obciążenia wynosząca 282 μm została odnotowana w pomiarach z 21 marca 2022 r. przy średnim poziomie zwierciadła wody gruntowej na głębokości ok. 0,81 m poniżej powierzchni nawierzchni. Konstrukcja drogowa pracowała więc w stanie permanentnego

Warto podkreślić, że trzykrotne zwiększenie średniej odległości zwierciadła wód gruntowych od powierzchni nawierzchni drogowej z 0,81 (21 marca 2022 r.) do 2,36 m (10 października 2024 r.) doprowadziło do uzyskania dwukrotnie niższych wartości ugięć w osi obciążenia.

PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Wyniki badań terenowych przeprowadzonych na wybranej drodze gminnej pokazują, że nadmierne zawilgocenie w warstwach konstrukcyjnych nawierzchni drogowej lub w przypowierzchniowej części podłoża gruntowego może mieć znaczący wpływ na pracę całej konstrukcji drogowej. W skrajnych warunkach omawianego studium przypadku zwierciadło wód gruntowych zostało zmierzone na głębokości 0,60 m poniżej powierzchni warstwy ścieralnej, co odniesiono do jego występowania w warstwach wzmacniającej i ulepszonego podłoża. Oddziaływanie wody na materiały tworzące poszczególne warstwy konstrukcyjne pozwoliło zauważyć znaczący, nawet trzykrotny wzrost ugięć nawierzchni drogowej podczas badania ugięciomierzem FWD w stosunku do sytuacji bardziej korzystnych warunków wodnych.

Oddziaływanie wody na materiały tworzące warstwy konstrukcyjne pozwoliło zauważyć znaczący wzrost ugięć nawierzchni drogowej.

nawodnienia w bardzo istotnych warstwach: ulepszonego podłoża oraz wzmacniającej, których zadaniem jest m.in. zapewnienie właściwych warunków przekazywania obciążenia na podłoże gruntowe oraz wymaganej sztywności układu warstw drogowych. Brak optymalnych właściwości i parametrów tych warstw doprowadził do zwiększenia średniej wartości ugięć na całym odcinku o 105% w stosunku do pomiaru końcowego (10 października 2024 r., ugięcia średnie równe 129 μm).

Mimo tak wyraźnych różnic w zachowaniu nawierzchni pod wpływem przyłożonego obciążenia opracowanie jednoznacznej i rzetelnej korelacji pomiędzy poziomem zwierciadła wód gruntowych a przewidywanymi ugięciami nawierzchni nie jest możliwe wyłącznie na podstawie danych z przedstawionych pomiarów terenowych. W tym celu konieczne jest przeprowadzenie szerszego zakresu badań terenowych z uwzględnieniem m.in. różnorodności warstw tworzących podłoże grun-

towe oraz ich cech fizycznych, materiałów stosowanych do poszczególnych warstw nawierzchni drogowych czy rzeczywistego obciążenia ruchem kołowym. Niemniej uzyskanie wzorów empirycznych pozwalających na szacowanie kondycji nawierzchni w odniesieniu do warunków wodnych panujących w bezpośrednim sąsiedztwie pasa drogowego mogłoby być przydatnym narzędziem pozwalającym zarządcom dróg na wzbogacenie środków do oceny stanu technicznego oraz planowania działań utrzymaniowych. ■

Literatura

- [1] Cekerevac C. i in., „Water influence on mechanical behaviour of pavements: experimental investigation” w: *Water in road structures. Movement, drainage and effects*, Nottingham: Springer, 2009, s. 217–242.
- [2] Ekblad J., Isacsson U., „Influence of water on resilient properties of coarse granular materials” w: *Road Materials and Pavement Design*, t. 7, nr 3, 2006, s. 369–404.
- [3] Rokitoski P., Grygierek M., „Wpływ niesprawnego odwodnienia na trwałość nawierzchni drogowej” w: Bzówka J., Łupieżowicz M. (red.), *Analizy i doświadczenia w geoinżynierii*, Gliwice: Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, 2017, s. 455–462.
- [4] Rokitoski P., „Analiza uszkodzeń nawierzchni drogowej poddanej intensywnemu spływowi wód opadowych – studium przypadku” w: *Drogi Samorządowe*, nr 3 (74), 2024, s. 42–47.
- [5] Rokitoski P., „Diagnostyka stanu nawierzchni drogowych – co warto wiedzieć?” w: *Inżynier Budownictwa*, nr 10, 2022, s. 18–22.
- [6] Rokitoski P., „Podstawowe narzędzia DSN: Identyfikacja warstw konstrukcji nawierzchni i sprawdzenie warunków wodnych (część 3)” w: *Drogi Gminne i Powiatowe*, nr 6, 2023, s. 10–15.
- [7] PN-B-04452:2002 Geotechnika – Badania polowe.
- [8] PN-EN 1997-2:2009 Eurokod 7 – Projektowanie geotechniczne – Część 2: Rozpoznanie i badanie podłoża gruntowego.
- [9] Zarządzenie nr 21 Generalnego Dyrektora Dróg Krajowych i Autostrad z dnia 17 czerwca 2019 r. w sprawie diagnostyki stanu nawierzchni i wybranych elementów korpusu drogi, Warszawa: GDDKiA, 2019.
- [10] Grygierek M., Sternik K., „Identification of pavement model parameters in the area of discontinuous surface deformation based on FWD tests” w: *International Journal of Civil Engineering*, t. 19, nr 3, 2021, s. 265–282.