



JACEK SUDYKA¹⁾
 PRZEMYSŁAW HARASIM²⁾
 MONIKA KOWALSKA-SUDYKA³⁾
 TOMASZ MECHOWSKI⁴⁾

QUALITY CONTROL OF TRAFFIC SPEED DEFLECTOMETER MEASUREMENTS ON ROAD NETWORK

KONTROLA JAKOŚCI POMIARÓW REALIZOWANYCH UGIĘCIOMIERZEM TSD NA SIECI DROGOWEJ

STRESZCZENIE. Nośność konstrukcji nawierzchni drogowych jest traktowana jako istotny element planowania utrzymania podczas procesu decyzyjnego na poziomie sieci. Biorąc pod uwagę ugięcia jako bezpośredni wskaźnik nośności nawierzchni, można precyzyjnie i skutecznie ocenić zarówno całą sieć drogową, jak i poszczególne jej odcinki. Do prawidłowej oceny tego parametru niezbędna jest efektywna metoda pomiarowa oraz zapewnienie możliwie najwyższej jakości danych. Wykonanie pomiaru ugięć na poziomie sieci jest możliwe dzięki zastosowaniu ugięciomierza Traffic Speed Deflectometer (TSD), który jest najnowocześniejszym urządzeniem diagnostycznym do badania nośności nawierzchni drogowych. Utrzymanie jakości danych uzyskiwanych na podstawie badań tym urządzeniem powinno następować poprzez wdrażanie odpowiednich procedur kontrolnych. W artykule przedstawiono jedną z najczęściej stosowanych metod kontroli jakości pomiarów ugięć z wykorzystaniem ugięciomierza TSD oraz związany z tą metodą problem oceny wyników kontroli w kontekście różnic rejestrowanych wartości temperatur nawierzchni asfaltowych i wskaźnika równości nawierzchni. W przeprowadzonej analizie danych wykazano, że średnia różnica temperatury między pomiarem rutynowym a kontrolnym większa niż 10°C może powodować istotną różnicę uzyskanego wyniku. Jednocześnie wykazano, że porównywanie wskaźników krzywizny powierzchni SCI_{300} na etapie kontroli własnej jest obciążone mniejszymi błędami niż porównania ugięć maksymalnych D_0 . Ocenie poddano również nierówności nawierzchni, które negatywnie wpływały na wynik kontroli własnej.

SŁOWA KLUCZOWE: kontrola jakości pomiarów, nawierzchnia asfaltowa, pomiar nośności, ugięciomierz TSD.

ABSTRACT. Bearing capacity of pavement structures is treated as an essential element of maintenance planning on the level of road network. Considering deflections as a direct indication of pavement bearing capacity enables precise and effective evaluation of the entire road network and its individual sections. In order to evaluate the parameter correctly, it is necessary to employ an effective measurement method and ensure the best possible quality of data. Means of deflection measurements on the level of road network include the use of Traffic Speed Deflectometer (TSD), which is the most modern diagnostic device for pavement bearing capacity testing. However, quality of data obtained from this device should be maintained by introducing adequate control procedures. The article presents one of the most commonly used methods of TSD measurement quality control and the related problem of evaluation of control results due to changes in asphalt pavement temperature and excessive pavement roughness. The performed data analysis has shown that the average temperature difference between routine measurement and control measurement greater than 10°C may cause significant differences in the results. The analysis also indicated that comparisons of surface curvature index SCI_{300} at the stage of measurement provider's own control entail lesser error than comparisons of maximum deflections D_0 . Pavement roughness that negatively affected the results of control was also evaluated.

KEYWORDS: asphalt pavement, bearing capacity measurements, measurement quality control, Traffic Speed Deflectometer.

¹⁾ Instytut Badawczy Dróg i Mostów, ul. Instytutowa 1, 03-302 Warszawa; jsudyka@ibdim.edu.pl (✉)

²⁾ Instytut Badawczy Dróg i Mostów, ul. Instytutowa 1, 03-302 Warszawa; pharasim@ibdim.edu.pl

³⁾ Instytut Badawczy Dróg i Mostów, ul. Instytutowa 1, 03-302 Warszawa; mkowalskasudyka@ibdim.edu.pl

⁴⁾ Instytut Badawczy Dróg i Mostów, ul. Instytutowa 1, 03-302 Warszawa; tmechowski@ibdim.edu.pl

1. WSTĘP

Dane o stanie technicznym nawierzchni są ważnym elementem systemu zarządzania siecią drogową. Zbierane z ustaloną częstotliwością, umożliwiają monitorowanie aktualnego stanu sieci oraz pozwalają na prognozowanie zmian jej stanu w przyszłości. Jest to istotny element tak zwanych proaktywnych [1] strategii zarządzania infrastrukturą drogową.

Ocena nośności na podstawie pomiaru ugięć to jedno z podstawowych działań prowadzonych w ramach nowoczesnej strategii zarządzania siecią drogową, a ugięciomierze laserowe [2, 3] reprezentują najbardziej nowoczesne rozwiązania w technice pomiarowej, o potwierdzonej przydatności do stosowania na sieciach drogowych. Dzięki wyeliminowaniu kontaktowego sposobu pomiaru możliwe jest prowadzenie badań bez zatrzymywania, z prędkością odpowiadającą normalnym warunkom ruchu drogowego, co przekłada się na wysoką efektywność pomiaru oraz bezpieczeństwo użytkowników ruchu drogowego. Najbardziej rozpowszechnionym urządzeniem opartym na technologii laserowej jest ugięciomierz TSD (ang. *Traffic Speed Deflectometer*) [4]. Od ponad dziesięciu lat urządzenie to jest wykorzystywane w ramach różnych programów badawczo-wdrożeniowych realizowanych przez Instytut Badawczy Dróg i Mostów (IBDiM) i inne jednostki badawcze na świecie. Ponadto w ostatnich latach administracje drogowe kilku krajów europejskich zrealizowały projekty, których charakter wskazuje na potraktowanie pomiarów TSD jako badań rutynowych, podobnie jak innych pomiarów wykonywanych regularnie na sieci drogowej. Projekty te zrealizowano przy współdziałaniu IBDiM między innymi w ramach programu PEHKO w Finlandii czy na zlecenie administracji drogowych Norwegii, Bawarii i Polski.

W ramach realizacji rutynowych pomiarów ugięć na sieci drogowej konieczne jest zadbanie o utrzymanie odpowiedniej jakości danych. Aby rozwiązać tę kwestię, skorzystać można z metod wypracowanych dla innych nieniszczących urządzeń pomiarowych stosowanych na sieci drogowej, które przedstawiono między innymi w [5, 6]. Przeniesienie niektórych procedur wprost jest uzasadnione, ponieważ wiele z czynników mających potencjalny wpływ na jakość danych jest wspólnych dla większości typów pomiarów automatycznych i pół-automatycznych. W pomiarach ugięć na wynik badania mogą mieć natomiast wpływ następujące warunki: temperatura warstw asfaltowych w chwili pomiaru (w tym temperatura powierzchni drogi), wiatr, czynniki geometryczne nawierzchni, szorstkość nawierzchni, struktura warstw i materiałów oraz prędkość pomiaru [7, 8]. Celem niniejszego artykułu jest przedstawienie procesu kontroli jakości danych uzyskiwanych urządzeniem TSD ze szczególnym uwzględnieniem

1. INTRODUCTION

Data on technical condition of pavement is an important element of pavement management. Collected at a set frequency, it enables monitoring of the current condition of the network and predicting its future changes. It is an essential element of the so-called proactive road infrastructure management strategies [1].

Evaluation of bearing capacity based on deflections is one of the fundamental actions in modern pavement management systems. Laser deflectometers [2, 3] represent the state-of-the-art solutions in measurement technology with proven usability on road networks. Owing to elimination of contact measurement, it is possible to perform measurements without stoppage, at speeds reflecting normal traffic conditions, which results in high measurement effectiveness and safety of road users. The most popular device based on laser technology is the Traffic Speed Deflectometer (TSD) [4]. For over ten years the device has been used in various research and implementation projects realized by the Road and Bridge Research Institute (IBDiM) and other research centers worldwide. Moreover, in recent years road administrations in several European countries performed projects whose character implies that TSD measurements are treated as routine procedures, similar to other measurements conducted regularly on road networks. The projects were realized in cooperation with IBDiM and included the PEHKO project in Finland and projects commissioned by road administration of Norway, Bavaria and Poland.

During routine measurements of deflections on road network it is necessary to provide and maintain adequate quality of the obtained data. In order to address this issue, some of the methods developed for other non-destructive measurement devices may be used, as shown in publications [5, 6]. Direct transfer of some procedures is well-founded, since many factors that may potentially affect data quality are common for most types of automatic and semi-automatic measurements. However, in deflection measurements the following conditions may also affect the results: temperature of the asphalt courses (including pavement surface temperature), wind, geometrical features of the road, pavement surface texture, arrangement and materials of pavement layers and measurement speed [7, 8]. The aim of this article is to present the process of data quality control for TSD measurements with particular focus on the impact of temperature and pavement roughness on the results of control tests conducted during routine measurements.

aspektu wpływu temperatury i równości nawierzchni na rezultaty badań kontrolnych prowadzonych w trakcie pomiarów rutynowych.

2. METODYKA KONTROLI POMIARÓW URZĄDZENIEM TSD

Jakość danych można zdefiniować jako zbiór cech określających przydatność danych do realizacji założonego celu. Celem wdrożenia metod kontroli jakości danych jest zapewnienie, że serie pomiarowe zostaną przeprowadzone według ustalonych procedur pomiarowych, a zgromadzone podczas pomiarów dane będą spełniać postawione im wymagania i będą zgodne z ustalonymi standardami. Procedury są ustalane na etapie przygotowania projektu serii pomiarowej i obowiązują aż do jej zamknięcia. Odpowiedzialność za realizację procesów kontroli jakości danych spoczywa zarówno na zlecającym, jak i na wykonawcy pomiarów. Coraz częściej praktykowane jest też włączanie do procesu strony trzeciej, odpowiedzialnej za monitorowanie i egzekwowanie postawionych założeń [9].

W praktyce oznacza to, że już na bardzo wczesnych etapach – na przykład na etapie opracowania modelu sieci drogowej – administrator drogi powinien określić, jaki rodzaj modelu sieci zastosuje, z jaką dokładnością zostanie on odwzorowany, czy przygotowany zostanie model cyfrowy oraz czy – i w jaki sposób – zostanie on odwzorowany w terenie. Decyzje te mają konsekwencje długofalowe, ponieważ będą wpływały na wysokość budżetu w kolejnych latach oraz mogą stanowić ograniczenia we wprowadzeniu w przyszłości nowych technik pomiarowych. Ponadto administrator drogi definiuje rodzaj danych niezbędnych do zarządzania majątkiem, normuje zasady ich gromadzenia, ustala wymagania odnośnie technik pomiarowych, a także reguły nadzorowania jakości. W rezultacie zostają opracowane standardy dotyczące częstości serii pomiarowych, wymaganych technik pomiarowych, ustalenia precyzji mierzonych wielkości fizycznych i częstości próbkowania oraz metod powiązania uzyskanych informacji z modelem sieci drogowej.

Jakość w procesie rejestrowania ugięć nawierzchni oznacza zdolność jednostki pomiarowej do uzyskiwania obiektywnych i powtarzalnych danych w ramach ustalonych kryteriów. Proces utrzymania jakości rozpoczyna się od wyboru właściwej techniki pomiarowej z uwzględnieniem zakresu pomiarowego urządzenia, istotnego dla badania nośności kroku pomiarowego oraz precyzji instrumentów pomiarowych. Przy tak zaawansowanym urządzeniu jak TSD ważną rolę odgrywa przeszkolenie pracowników w zakresie obsługi oraz ich doświadczenie zdobyte podczas eksploatacji ugięciomierza. Na szczególną uwagę zasługuje proces kalibracji, który w TSD

2. METHODOLOGY OF TSD MEASUREMENT CONTROL

Quality of data may be defined as a set of properties that determines its usability for a given purpose. Data quality control is introduced in order to ensure that all measurement series will be performed in accordance with predetermined procedures and the collected data will meet set requirements and standards. Such procedures are determined at the stage of measurement series design and are in effect until the end of the series. Both the commissioning party and the provider of measurement services are responsible for realization of data quality control procedures. Therefore, engagement of a third party into the process to monitor and enforce the assumed principles becomes increasingly common [9].

In practice it implies that already at very early stages – e.g. at the stage of development of the network model – road administration should determine the type of network model to be used, the accuracy of its mapping, whether a digital model will be developed and if – or how – it will be referenced in the field. Such decisions have long-term consequences, as they will affect the budget in the following years and may possibly limit introduction of new measurement technologies in the future. Moreover, road administration defines the type of data required for asset management, standardizes the principles of data collection, sets requirements regarding measurement technologies and the rules for quality control. Consequently, standards are developed regarding the frequency of measurement series, required technologies, precision of the measured physical quantities, sampling frequency and methods for relating the obtained information to the network model.

Data quality in the process of pavement deflection registration represents the capability of the measuring unit to produce objective and repeatable data within the determined criteria. The process of quality control begins with selection of appropriate measurement technology, taking into account the range and precision of the instrument, as well as the sampling interval – which is significant in bearing capacity tests. With such an advanced device as TSD, adequate training and practical experience of personnel is very important. Particular attention should be given to the TSD calibration process, which should be performed with due diligence and at the required intervals. Calibration – which, in simplified terms, consists in determination of correction coefficients for measurement angles of all sensors vs. the reference sensor – shall be

musi być prowadzony z należytą starannością i w wymaganych odstępach czasu. Kalibrację, która w uproszczeniu polega na wyznaczeniu współczynników korygujących kąty pomiaru wszystkich czujników do czujnika referencyjnego, należy wykonać przed rozpoczęciem sezonu pomiarowego na stałym odcinku referencyjnym. Z dotychczasowych doświadczeń wynika, że w trakcie intensywne pomiarów rutynowych prowadzonych w sezonie kalibrację należy powielać co około 2000 km. Podczas pomiarów realizowanych z wykorzystaniem ugięciomierza TSD monitorowane są parametry pracy urządzenia oraz warunki środowiskowe, co pozwala na precyzyjne wskazanie wadliwie działającego elementu systemu pomiarowego.

W ramach monitoringu jakości danych dotyczących nośności nawierzchni stosuje się ustalone schematy badań powtórnych realizowanych przez wykonawcę oraz badania kontrolne prowadzone przez jednostki zewnętrzne. W procesie kontroli zrealizowanej serii pomiarowej weryfikowana jest zgodność zrealizowanego zakresu pomiarowego z przedmiotem zamówienia, przy jednoczesnym uwzględnieniu odstępstw i sytuacji nadzwyczajnych, np. braku dostępności drogi spowodowanego remontem lub ograniczeniami w ruchu. Pomocne przy tym są zdjęcia z rejestracji korytarza drogi, dostępne w większości systemów pomiarowych [10]. Poprzez analizę parametrów pomiarowych – np. prędkości urządzenia TSD i warunków środowiskowych, takich jak temperatura lub opady – weryfikowana jest także jakość samych danych.

Narzędziami systemowymi w zarządzaniu jakością są programy badań porównawczych. Uczestnictwo w takich badaniach może być obligatoryjne ze względu na wymagania administratora drogi. Mogą to być również dobrowolne inicjatywy użytkowników urządzeń, organizowane w celu podniesienia jakości usług pomiarowych lub będące platformą wymiany doświadczeń. Innym rozwiązaniem systemowym jest przynależność laboratoriów badawczych do struktur podmiotów akredytowanych, na przykład w Polskim Centrum Akredytacji.

Ważną cechą systemu zapewnienia jakości jest standaryzacja wszystkich istotnych procesów i danych. Serie pomiarowe muszą być realizowane rutynowo i niezawodnie. W celu zapewnienia niezakłóconego przepływu danych pomiędzy podmiotami zaangażowanymi w proces pozyskiwania i analizy danych, standardami objęte są formaty danych na wszystkich etapach przetwarzania i kontroli. Standaryzacja jest niezwykle istotna również w kontekście gromadzenia danych drogowych. Jeżeli dane są gromadzone w jednolity sposób, na przestrzeni lat można je porównywać między sobą i obserwować dynamikę zmian. Zarządcy mogą w ten sposób

performed on a permanent reference section before the start of the season. Previous practical experience indicates that in the case of intensive routine measurements, repeated calibration is required approx. every 2,000 km. As the environmental conditions and the operational parameters of the device are monitored during the TSD measurements, precise identification of potentially faulty elements of the measurement system is possible.

Data quality monitoring in the case of bearing capacity measurements encompasses predetermined schemes of double measurements undertaken by the measurement service provider and inspection measurements performed by third parties. Supervision of a measurement series consists in verification of conformity of the realized measurements with the commissioned scope, potentially taking into account exceptional situations, such as road closure due to repairs or traffic restrictions. Right-of-way imaging, available in most systems, is useful in such situations [10]. Through analysis of operational parameters – e.g. TSD speed and environmental factors, such as temperature and precipitation – the quality of the data itself may also be verified.

Systemic tools in quality management include comparative test programs. Participation of measurement providers in such programs may be obligatory due to requirements of road administration. Comparative tests may be also voluntarily initiated by the owners of the devices in order to improve the quality of measurement services or create a platform for exchange of experience. Another systemic solution is the membership of road test laboratories in the groups of accredited entities, such as those managed by the Polish Centre for Accreditation.

An important property of a quality assurance system is standardization of all the significant processes and data. Measurement series must be realized routinely and reliably. In order to ensure uninterrupted flow of data between the entities engaged in the process of data collection and analysis, the standards encompass data formats used at all stages of processing and control. Standardization is also very important in the context of road data storage. If the data is stored in a uniform manner, it may be compared over the years to observe the dynamics of changes. Based on the collected data, road administrators may also assess the effectiveness of technologies used, evaluate the quality of the performed works and predict repair needs [11].

During deflection measurements provided by the Road and Bridge Research Institute, the basic quality assurance measures consist in service provider's own control performed

oceniać skuteczność technologii i jakość wykonanych prac drogowych, jak również przewidywać potrzeby remontowe [11].

W pomiarach ugięć wykonywanych przez Instytut Badawczy Dróg i Mostów podstawowym sposobem zapewnienia jakości jest kontrola własna wykonawcy realizowana zgodnie z wymaganiami standardów zagranicznych i krajowych. Ponieważ standardy te opierają się na zbliżonych zasadach, w dalszej części artykułu odniesiono się wyłącznie do Wytycznych Diagnostyki Stanu Nawierzchni (WDSN) [9]. Wymagania jakościowe pomiarów ugięć we wspomnianych wytycznych przedstawiają się następująco: gęstość pomiaru 1 m, dokładność pomiaru ugięcia 1 μm przy obciążeniu osi 100 kN. Pomiar należy prowadzić przy temperaturze 5-25°C, obliczonej z wykorzystaniem modelu BELLS3 w połowie grubości warstw asfaltowych. W przyjętej metodyce zapewnienia jakości pomiar referencyjny jest wykonywany w ramach prowadzonej serii pomiarowej. Pomiar powtórny kontroli własnej powinien zostać wykonany nie wcześniej niż po sześciu godzinach i nie później niż po sześćdziesięciu godzinach od pomiaru referencyjnego. Wartości ugięć na odcinku wybranym do przeprowadzenia pomiarów w ramach kontroli mają zawierać się w przedziale ugięć maksymalnych od 350 μm do 650 μm . W analizie danych z odcinka o długości 1 km z obu pomiarów wyznacza się rozrzut ugięcia maksymalnego D_0 mierzonego w μm i rozrzut wskaźnika krzywizny powierzchni SCI_{300} (różnicy pomiędzy ugięciem maksymalnym D_0 i ugięciem zarejestrowanym w odległości 300 mm od osi obciążenia, mierzonej w μm). Rozrzut dla obu parametrów obliczany jest następująco: każdy kilometrowy odcinek kontrolny dzielony jest na dziesięć odcinków diagnostycznych o długości 100 m, a następnie dla każdego odcinka diagnostycznego od średniej pomiarów danego parametru z przejazdu rutynowego odejmuje się średnią pomiarów z przejazdu kontrolnego na tym odcinku. Na podstawie tak uzyskanych dziesięciu wartości wylicza się dla odcinka kilometrowego wartość średnią rozrzutu r i odchylenie standardowe średniej rozrzutu σ_r każdego z rozpatrywanych parametrów. Pomiar kontrolny zostaje zaakceptowany, jeżeli wartości średniej rozrzutu i jej odchylenia standardowego mieszczą się w granicach tolerancji (Tabl. 1).

in accordance with national and international standards. Since the standards are based on similar principles, the following part of the article will refer only to the Guidelines for Pavement Condition Diagnostics (WDSN) published in Poland [9]. The quality requirements given in the aforementioned document for deflection measurements are as follows: measurement sampling density of 1 m; precision of deflection measurement: 1 μm ; axle load of 100 kN. Measurements shall be conducted at pavement temperature in the range of 5-25°C, calculated using BELLS3 model in the middle of the thickness of asphalt layers. In the adopted methodology of quality assurance, the reference measurement is made routinely within the measurement series being performed. The second (control) measurement shall be made no earlier than six hours and no later than sixty hours after the reference measurement. The values of maximum deflection on the section chosen for control measurements shall be within the range of 350 μm to 650 μm . In analysis of data obtained for 1-km-long sections from both measurements, spreads are calculated (in μm) for both the maximum deflection D_0 and the surface curvature index SCI_{300} (the latter being the difference between maximum deflection D_0 and deflection registered at the distance of 300 mm from the load axis). For both parameters, spread is determined as follows: the 1-km-long section is divided into ten diagnostic segments of 100 m in length. Subsequently, for each diagnostic segment, the spread of the given parameter is calculated as the difference: average value registered in the routine measurement minus the average value registered in the control measurement on this segment. Based on the obtained ten values, the mean value of spread r and the standard deviation of spread σ_r of the analyzed parameters are calculated for the 1-km-long section. The control measurement is accepted if the calculated values of mean spread and its standard deviation are within the limits of tolerance (Table 1).

Table 1. Values of variability tolerances used in WDSN [9]
Tablica 1. Wartości tolerancji powtarzalności pomiarów ugięć stosowane w WDSN [9]

Parameter / Parametr		Mean value of spread Wartość średnia rozrzutu r	Standard deviation of spread Odchylenie standardowe średniej rozrzutu σ_r
Maximum deflection Ugięcie maksymalne	D_0 [μm]	10	70
Surface curvature index Wskaźnik krzywizny powierzchni	SCI_{300} [μm]	10	70

3. WYNIKI BADAŃ I ICH OCENA

Instytut Badawczy Dróg i Mostów archiwizuje wyniki badań odcinków kontrolnych prowadzonych przez siebie w ramach różnych projektów. Jest to uporządkowana baza danych z ponad 30 tysiącami rekordów, w których zapisano wszystkie dane rejestrowane w trakcie pomiarów. Zgromadzone dane posłużą do dalszych analiz.

Przeprowadzone analizy wartości temperatury oraz wartości wskaźnika równości *IRI* (ang. *International Roughness Index*) polegały na porównaniu ich wartości średnich rejestrowanych podczas przejazdu rutynowego i kontrolnego. W toku analizy wykluczono odcinki niepewne (poniżej 2% z ogólnej liczby odcinków), na których współczynnik determinacji R^2 wyniósł poniżej 0,90. Następnie określono graniczne wartości różnic każdego z tych parametrów, tj. takie, powyżej których negatywny wynik kontroli uzyskały wszystkie odcinki.

W analizie danych uzyskanych w procesie kontroli własnej uwzględniono 314 odcinków kontrolnych o długości 1 km każdy. Spośród tego zbioru 112 odcinków spełniło kryteria rozrzutów D_0 i SCI_{300} , co daje niemal 36%. Na kolejnych 100 odcinkach (około 32%) zostało spełnione jedynie wymaganie dotyczące rozrzutu wskaźnika SCI_{300} . Rozkład uzyskanych wartości rozrzutów r , jako istotnie wpływających na rezultat kontroli, przedstawiono na Rys. 1. Kryterium odchylenia standardowego średniej rozrzutu σ_r obu tych wartości zostało spełnione na wszystkich odcinkach.

3. TEST RESULTS AND THEIR ASSESSMENT

The Road and Bridge Research Institute archives test results obtained on control sections in various projects it is involved in. The archive is an ordered database of over 30 thousand records containing all the data gathered during measurements. The stored data will be used in further analyses.

The performed analyses of temperature and International Roughness Index (*IRI*) consisted in comparisons of their average values registered during routine and control passes of the device along the given section. Unreliable sections, defined as those where the coefficient of determination R^2 was less than 0.90, were excluded from the analysis. Later, the limit values of differences in each parameter were identified, i.e. differences that always resulted in negative outcome of the control.

Analysis of data collected in the process of provider's own control encompassed 314 control sections, each of 1 km in length. Out of this set, 112 sections (nearly 36%) met both the D_0 spread and SCI_{300} spread criteria. Further 100 sections (approx. 32%) fulfilled only the criterion related to the spread of SCI_{300} index. Distribution of the obtained values of mean spread r , which significantly affects the result of the control, is shown in Fig. 1. The criterion of standard deviation of spread σ_r was met on all sections for both the analyzed values.

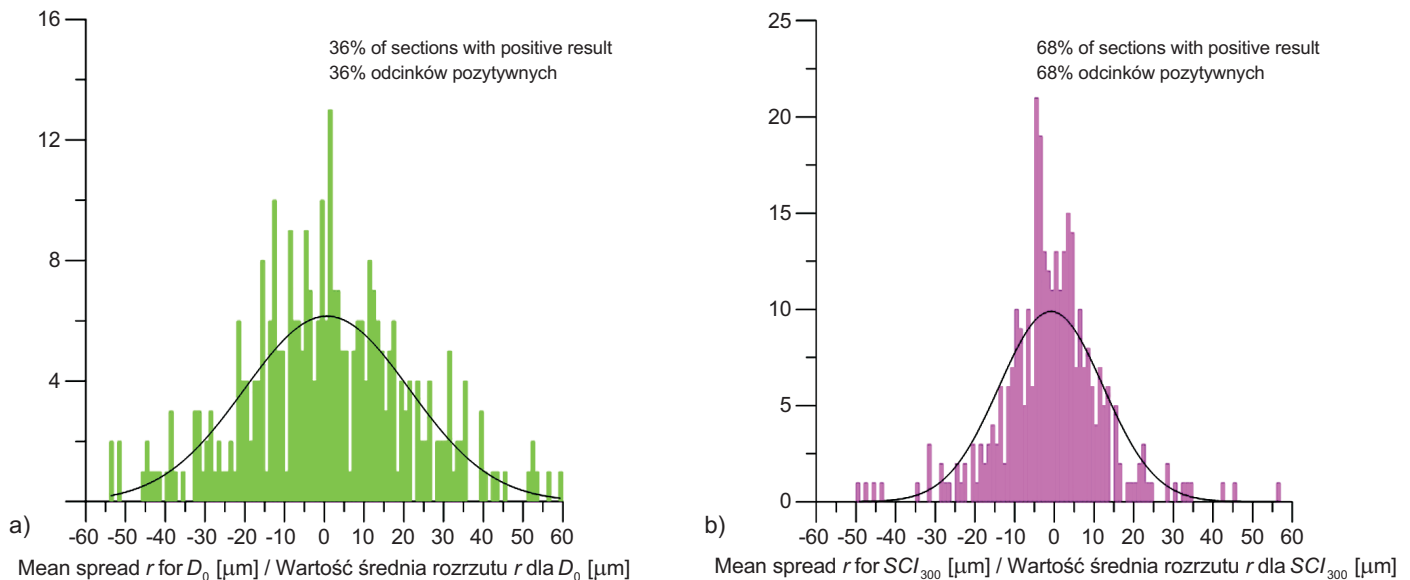


Fig. 1. Histograms of mean spreads r for the values of maximum deflection D_0 (a) and SCI_{300} index (b) on 1-km-long control sections. Approx. 36% of sections met both the D_0 spread criterion and the SCI_{300} spread criterion

Rys. 1. Histogramy średnich rozrzutów r ugięć maksymalnych D_0 (a) i wskaźnika SCI_{300} (b) na jednokilometrowych odcinkach kontrolnych. Około 36% odcinków spełniło jednocześnie kryteria rozrzutu D_0 i rozrzutu wskaźnika SCI_{300}

Gdyby pominąć kwestię temperatury nawierzchni, to tak mały odsetek odcinków, które pozytywnie przeszły kontrolę własną, byłby zaskakujący – tym bardziej, że współczynnik determinacji R^2 dla D_0 oraz SCI_{300} obliczanych jako średnie z każdych 100 m wyniósł 0,92. Dane te potwierdzają, że zmiany ugięć rejestrowane są przez urządzenie w taki sam sposób, ale ich wartości zmieniają się wraz z temperaturą. Jako przykład można podać tu odcinki nr 2 i 4 (Rys. 2), na których średnia różnica wartości temperatury wyniosła odpowiednio 10°C i 3°C. Wartości r na tych odcinkach wyniosły odpowiednio 50 μm (nie spełnia kryterium kontroli) i 0,5 μm (spełnia kryterium kontroli).

If the problem of pavement temperature were not taken into account, such a small proportion of sections passing the control would seem surprising – especially in the light of the fact that coefficient of determination R^2 for the values of D_0 and SCI_{300} calculated as means over the 100-m-long segments equaled 0.92. The data confirms that the changes in deflections are registered by the instrument in the same manner, but their values change with temperature. Sections no. 2 and no. 4, on which average difference in temperature equaled 10°C and 3°C, respectively, may serve as an example (Fig. 2). The r values on the two sections equaled 50 μm (control criterion is not met) and 0.5 μm (control criterion is met), respectively.

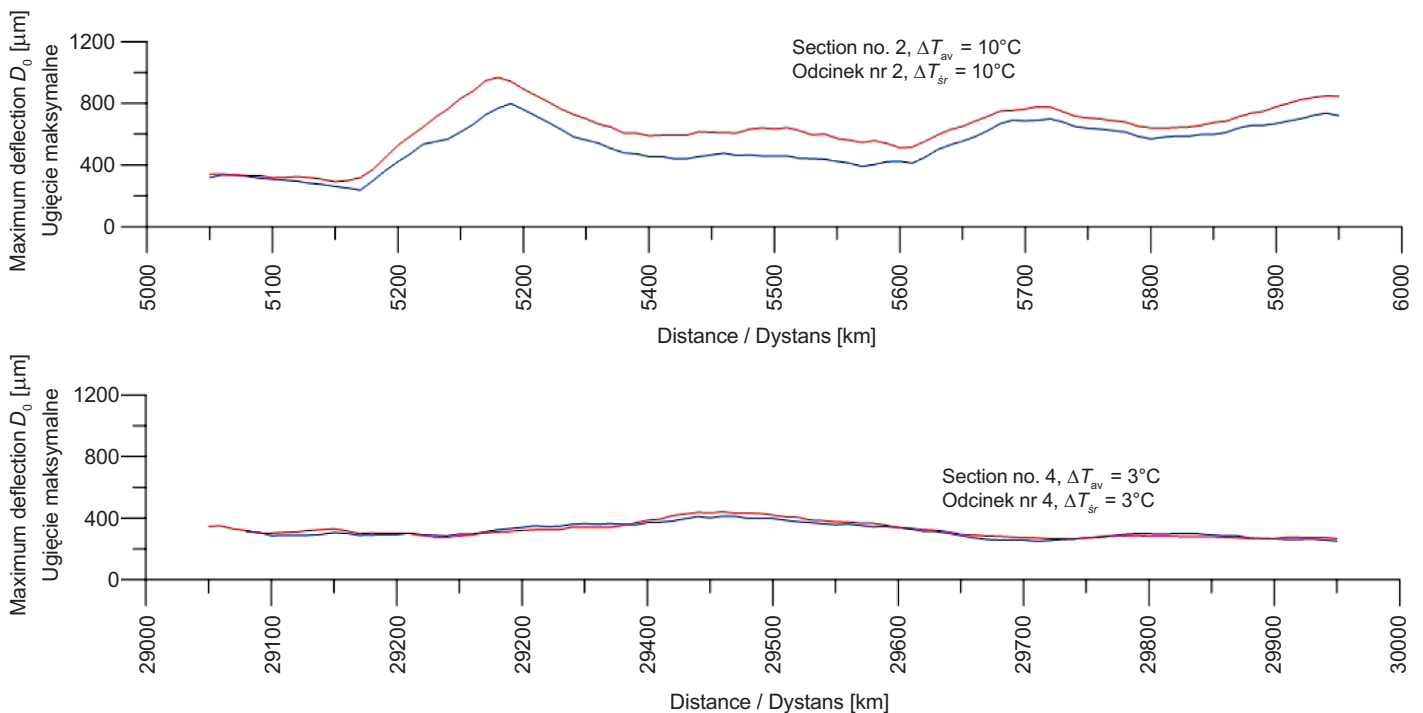


Fig. 2. Comparison of maximum deflections D_0 registered in the routine measurement and the control measurement on sections no. 2 and no. 4. The given temperatures represent the average temperature difference between both measurements

Rys. 2. Porównanie ugięć maksymalnych D_0 zarejestrowanych w pomiarze rutynowym i kontrolnym na odcinkach nr 2 i 4. Podane wartości temperatury reprezentują średnią różnicę między pomiarem rutynowym a kontrolnym

Z kolei różnicę w liczbie odcinków pozytywnie zakwalifikowanych ze względu na rozrzut D_0 i rozrzut SCI_{300} można wytłumaczyć, przyjmując założenie, że cała czasza ugięć zmienia się proporcjonalnie wraz ze zmianą temperatury nawierzchni. Wskaźnik SCI_{300} jest w istocie różnicą ugięć D_0 i D_{300} , a to sprawia, że jest on mniej wrażliwy na wpływ temperatury nawierzchni. Zatem porównywanie wskaźników SCI_{300} na etapie kontroli własnej jest obarczone mniejszym błędem.

The difference in the number of sections with positive results due to D_0 spread and SCI_{300} spread may be explained by the assumption that the entire deflection basin changes proportionally to the change in temperature. Since the SCI_{300} index is actually the difference between the D_0 and D_{300} deflections, its value is less sensitive to changes in pavement temperature. Therefore, comparisons of SCI_{300} at the stage of measurement provider's own control entail smaller error.

Analiza średnich różnic wartości temperatury pomiaru wykazała, że 67% odcinków pomierzono przy różnicy mniejszej niż 6°C, 19% przy różnicy w przedziale 6-10°C, zaś 14% z różnicą powyżej 10°C (Rys. 3). Żaden z odcinków, na których zarejestrowana średnia różnica wartości temperatury wyniosła powyżej 10°C, nie spełnił wymagań kontroli własnej dotyczących rozrzutu D_0 .

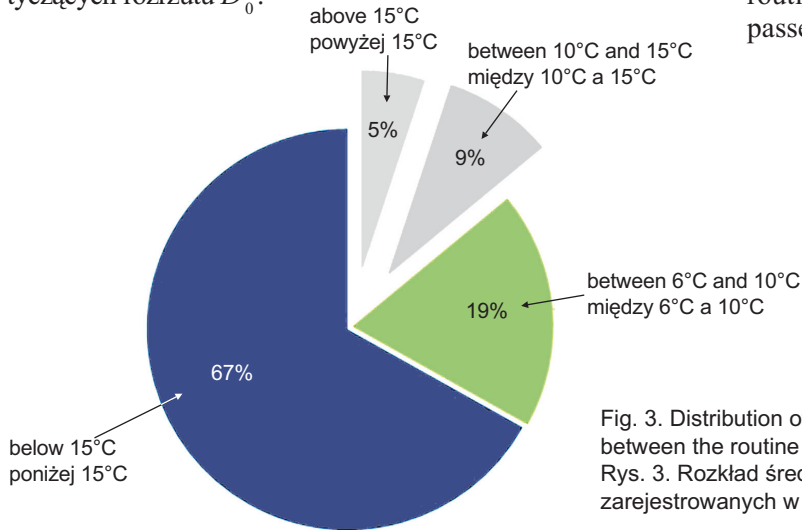


Fig. 3. Distribution of average differences of pavement temperature between the routine and control measurement
Rys. 3. Rozkład średnich różnic wartości temperatury nawierzchni zarejestrowanych w pomiarze rutynowym i kontrolnym

Na odcinkach kontrolnych o dużej nierówności zachodzi wysokie prawdopodobieństwo, że tory pomiaru rutynowego i kontrolnego nie będą się pokrywać. To może powodować lokalnie różną dynamikę oddziaływania osi pomiarowej TSD na nawierzchnię, a w konsekwencji – prowadzić do istotnych różnic w danych z obu pomiarów. Jak wskazano między innymi w [12], relatywnie niewielkie pogorszenie równości nawierzchni może powodować spadek trwałości nawierzchni nawet o 30%.

Analiza wszystkich 314 odcinków kontrolnych wykazała, że różnica średniej wartości IRI z obu przejazdów większa niż 4% daje negatywny wynik kontroli własnej. Jednym z przykładów jest odcinek nr 33 (Rys. 4), gdzie tor pomiaru kontrolnego nie pokrył się z pomiarem rutynowym na trzech relatywnie krótkich odcinkach (o długości ok. 50 m każdy). W efekcie uzyskano negatywny wynik kontroli własnej na tym odcinku.

Powyższy przykład wskazuje na potrzebę uściślenia wymagań dotyczących wyboru odcinka kontrolnego. Na odcinkach o wysokiej równości (klasa A i B zgodnie z WDSN, na których wskaźnik $IRI < 5,9$ mm/m) niewielkie zmiany toru pomiarowego nie mają wpływu na generowane obciążenie [13], a więc i na rejestrowane ugięcia, natomiast na odcinkach o niższej równości (klasa C i D) każda różnica w torze pomiarowym będzie zwiększać różnicę w rejestrowanych ugięciach. Dlatego wprowadzenie dodatkowego kryterium, ograniczającego możliwość wykonywania pomiarów kontrolnych

Analysis of the average temperature differences between routine and control measurements has shown that 67% sections were tested at temperature difference less than 6°C, 19% at difference in the range of 6-10°C, and 14% at difference greater than 10°C (Fig. 3). None of the sections at which the registered difference in temperature between routine and control measurements exceeded 10°C have passed the D_0 spread requirement in the control.

On control sections characterized by high roughness there is considerable probability that the paths of the routine and control passes will not be identical. The resulting local differences in the dynamics of TSD axle-pavement interaction may lead to significant differences in data obtained from both measurements. As noted in [12], a relatively small increase in pavement roughness may lead to a decrease in pavement life by as much as 30%.

Analysis of all 314 control sections has shown that difference in average IRI between the two passes greater than 4% leads to negative outcome of the control. Examples include section no. 33 (Fig. 4), on which the path of the control measurement differed from the path of the routine measurement on three relatively short portions of the section (approx. 50 m each). In consequence, the result of the control on this section was negative.

The above example indicates the need for more precise requirements regarding the choice of control section. On sections with low roughness (class A and B according to WDSN, that is $IRI < 5.9$ mm/m), slight changes in measurement path do not affect the generated loads [13] and the resulting deflections. On sections with greater roughness (classes C and D) every change in the measurement path will increase the difference in the registered deflections. Therefore, potential introduction of an additional criterion limiting the possibility for performance of control

na odcinkach o równości w klasie C i D, pozwoliłyby na uniknięcie błędów na etapie kontroli własnej.

measurements on sections in roughness classes C and D would make it possible to avoid errors at the stage of measurement provider's own control.

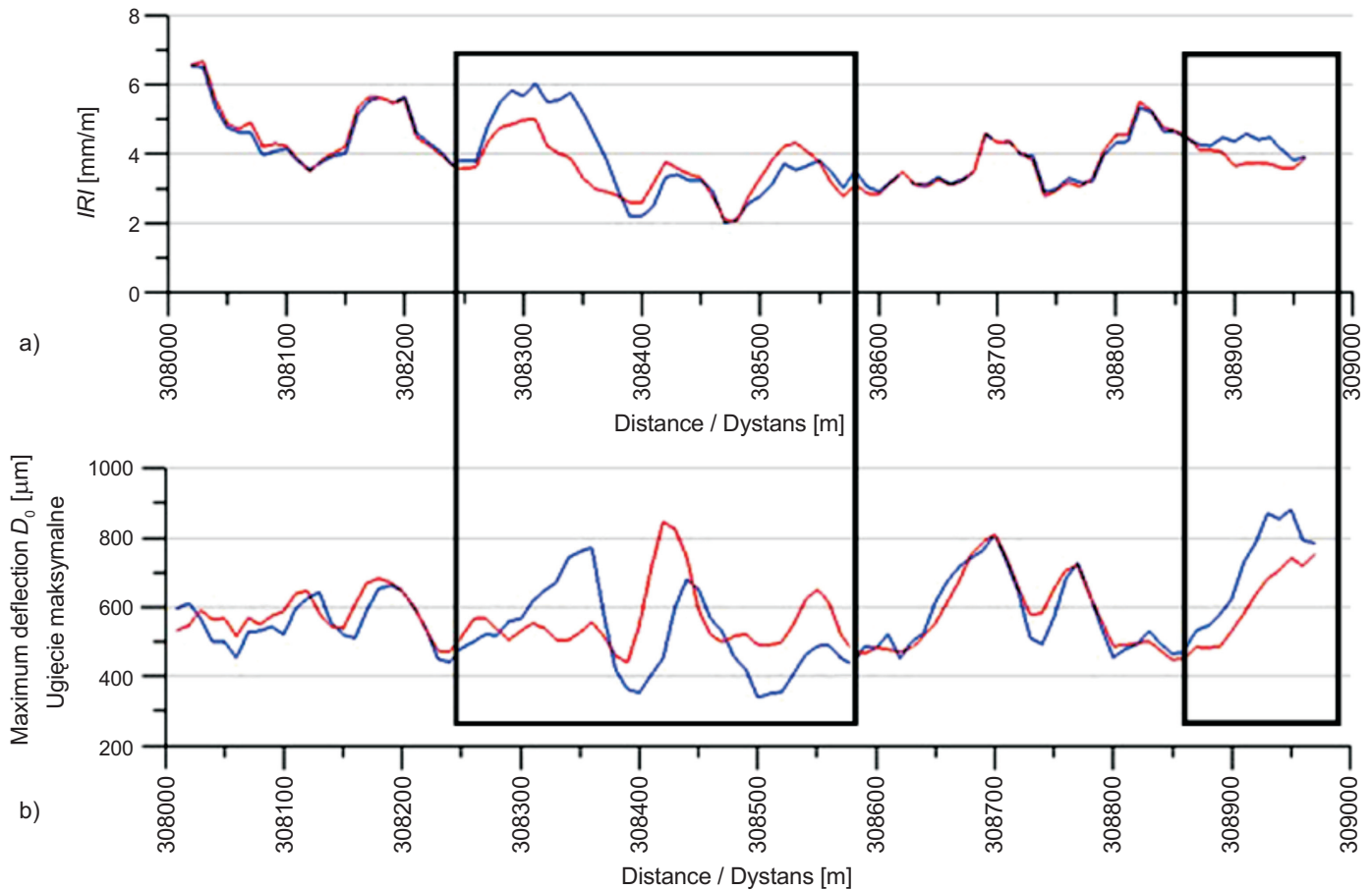


Fig. 4. Values of IRI (a) and maximum deflection D_0 (b) registered on section no. 33 in the routine and control measurement
Rys. 4. Wskaźnik IRI (a) i ugięcie maksymalne D_0 (b) na odcinku nr 33 z pomiaru rutynowego i kontrolnego

4. WNIOSKI

Analiza danych z 314 odcinków kontrolnych wskazuje, że średnia różnica temperatury między pomiarem rutynowym a kontrolnym większa niż 10°C może powodować istotną różnicę uzyskanego wyniku, niespełniającą wymagań podanych w WDSN [9]. Wykazano również, że porównywanie na etapie kontroli własnej wskaźników SCI_{300} jest obciążone mniejszymi błędami niż porównywanie wartości D_0 . Przeprowadzone obserwacje sugerują zatem, że ponad 30% badanych odcinków nie uzyskało pozytywnego wyniku przez brak dodatkowych wymagań ograniczających możliwość wykonania pomiaru kontrolnego przy zbyt dużej różnicy wartości temperatury nawierzchni.

Zebrane dane pozwoliły również ocenić wyniki kontroli własnej pod względem równości nawierzchni. Analiza tych

4. CONCLUSIONS

Analysis of data from 314 control sections indicates that average difference in temperature between routine measurement and control measurement greater than 10°C may cause a significant difference in the obtained results and, consequently, failure to comply with the requirements established in WDSN [9]. The analysis also shows that comparisons of SCI_{300} at the stage of measurement provider's own control entail lesser error than comparisons of D_0 , which may suggest that over 30% of the tested sections did not meet the criteria due to lack of additional restrictions regarding the maximum allowable pavement temperature difference between the two measurements.

danych wykazała, że różnica średniej wartości *IRI* z obu przejazdów większa niż 4% daje negatywny wynik kontroli własnej.

Uzyskane wyniki analizy wskazują na potrzebę zmiany podejścia w metodyce kontroli własnej opisanej w WDSN [9]. Zmniejszenie odstępu czasowego między oboma pomiarami do maksymalnie dwóch godzin – zamiast, jak dotychczas, minimalnie sześciu – byłoby jednym z najprostszych rozwiązań. Dodatkowo należy wprowadzić kryterium ograniczające możliwość wykonywania pomiarów kontrolnych na odcinkach charakteryzujących się wskaźnikiem $IRI \geq 5,9$ mm/m, to jest będących w klasie C i D.

BIBLIOGRAFIA / REFERENCES

- [1] Zofka A.: Proaktywna strategia zarządzania elementami infrastruktury drogowej. IBDiM, Studia i materiały, zeszyt nr 82, Warszawa, 2019
- [2] Deep P., Andersen M.B., Rasmussen S., Marradi A., Thom N.H., Presti D.L.: Simulating Deflection of a Jointed Rigid Pavement Under Rolling Wheel Deflectometer (RAPTOR) Loading. Proceedings of the 9th International Conference on Maintenance and Rehabilitation of Pavements - Mairepav9, Lecture Notes in Civil Engineering, **76**, 2020, 859-870, DOI: 10.1007/978-3-030-48679-2_80
- [3] Zofka A., Sudyka J., Maliszewski M., Harasim P., Sybilski D.: Alternative Approach for Interpreting Traffic Speed Deflectometer Results. Transportation Research Record, **2457**, 1, 2014, 12-18, DOI: 10.3141/2457-02
- [4] Shrestha S., Katicha S.W., Flintsch G.W.: Field demonstration of the traffic speed deflectometer. Pavement and Asset Management: Proceedings of the World Conference on Pavement and Asset Management (WCPAM 2017), CRC Press, London, 2017, 846p, DOI: 10.1201/9780429264702
- [5] National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine: Quality Management of Pavement Condition Data Collection. The National Academies Press, Washington, 2009, DOI: 10.17226/14325
- [6] Diagnostyka stanu nawierzchni i wybranych elementów korpusu drogi – wytyczne stosowania. Załącznik do Zarządzenia Nr 21 Generalnego Dyrektora Dróg Krajowych i Autostrad z dnia 17.06.2019 roku
- [7] Zofka A., Graczyk M., Rafa J.: Qualitative Evaluation Of Stochastic Factors Affecting The Traffic Speed Deflectometer Results. Transportation Research Board 94th Annual Meeting Compendium of Papers, Transportation Research Board, Washington, 2015, paper no. 15-3650
- [8] Graczyk M., Zofka A., Rafa J., Sudyka J.: Analytical solution of pavement deflections and its application to the TSD measurements. 26th Australian Road Research Board (ARRB) Conference – Research driving efficiency, Sydney, 2014, Issue No. 2.1, 13p
- [9] Wytyczne Diagnostyki Stanu Technicznego Nawierzchni WDSN, Olsztyn, 2018, <https://www.zdw.olsztyn.pl/stro-na-glowna/dokumenty-techniczne.html#> (20.11.2021)
- [10] Sudyka J., Tabor Z., Poteraj-Oleksiak A., Brzezińska P., Mechowski T.: Ocena nośności sieci drogowych z wykorzystaniem ugięciomierza laserowego TSD. Magazyn Autostrady, 4, 2017, 44-54
- [11] Wojsz T., Skakuj M.: Standaryzacja w procesie zarządzania drogami. Magazyn Autostrady, 4, 2016, 37-40
- [12] Rys D., Judycki J., Jaskuła P.: Wpływ równości nawierzchni i dynamicznego oddziaływania pojazdów ciężkich na trwałość zmęczeniową nawierzchni podatnych. Czasopismo Inżynierii Lądowej, Środowiska i Architektury, JCEEA, **XXXIII**, 63 (1/II/16), 2016, 291-298
- [13] Harasim P., Gajewski M.: Research on the influence of pavement unevenness on heavy vehicles' axle loads variations with the use of TSD deflectometer. Roads and Bridges - Drogi i Mosty, **20**, 4, 2021, 425-439, DOI: 10.7409/rabdim.021.025

The collected data also enabled verification of the control results in terms of the influence of pavement roughness. The analysis shows that difference in *IRI* between the two passes greater than 4% leads to negative outcome of the control.

The observations indicate the need for a change in the methodological approach described in WDSN [9]. Reduction in the period between the two measurements to a maximum of two hours – instead of the current minimum of six hours – may be one of the simplest solutions. Additionally, a new requirement should be introduced, limiting the possibility for performance of control measurements on sections with $IRI \geq 5.9$ mm/m (in roughness classes C and D).