

Załącznik E1

Procedura przedsezonowych badań porównawczych ugięciomierzy FWD

Warszawa, maj 2019

Niniejsze opracowanie stanowi załącznik do dokumentu głównego:

**DIAGNOSTYKA STANU NAWIERZCHNI
I WYBRANYCH ELEMENTÓW KORPUSU DROGI**
Wytyczne stosowania

W załącznikach zamieszczono m.in.: szczegółowe zasady realizacji pomiarów, instrukcje dotyczące oceny i klasyfikacji poszczególnych parametrów, zasady wizualizacji i analizy wyników diagnostycznych, instrukcje wykonywania pomiarów, procedury przedsezonowych badań porównawczych, procedury badań kontrolnych na własnym odcinku testowym, katalogi uszkodzeń nawierzchni oraz elementów korpusu drogi

Dokumenty systemu DSN zostały opracowane przez Zespół Autorski pracowników
Generalnej Dyrekcji Dróg Krajowych i Autostrad

Wszelkie prawa zastrzeżone

SPIS TREŚCI

1. Zasada i zastosowanie procedury	5
2. Przygotowanie do badań porównawczych	5
3. Wykonanie badań porównawczych	6
4. Analiza wyników badań porównawczych	8
4.1. Badanie odtwarzalności	8
4.2. Badanie powtarzalności	9
4.3. Symbole	10
4.4. Równania	11
5. Sprawozdanie	12

1. Zasada i zastosowanie procedury

Procedura została opracowana na podstawie [1] oraz [29], Załącznik nr 4 Procedury kalibracyjne laboratorium kontrolnego, Protokół LK4-2005 Procedura harmonizacji FWD in-situ.

W dokumencie szczegółowo opisano poszczególne etapy i zasady wykonania przedsezonowych, międzylaboratoryjnych badań porównawczych ugięć urządzeniem FWD.

Metodyka wykonania obliczeń jest następująca:

1. W procedurze tej wyniki badań grupy FWD są porównywane z wynikami uzyskanymi przez wzorcową grupę FWD, będącej częścią całej badanej grupy. Operacja ta będzie nosić nazwę testu odtwarzalności. W dniu wykonania testu określana jest także powtarzalność każdego FWD. Procedury gromadzenia danych są realizowane na różnych nawierzchniach, o różnych podłożach, różniących się między sobą nośnością. Wszystkie przyrządy FWD należy przed próbami sprawdzić pod kątem prawidłowości działania i wykalibrować wg wzorców.
2. W badaniach odtwarzalności na każdym stanowisku wykonuje się 5 zrzutów (z tego 4 są analizowane) przy użyciu wcześniej zadanego obciążenia w celu zebrania danych o ugięciach. Ugięcia są normalizowane do poziomu obciążenia zadanego, a następnie porównywane z danymi wzorcowymi. Współczynniki harmonizacji ugięć są obliczane metodą regresji liniowej, tak by ugięcia wzorcowe ustalić z możliwie największą dokładnością na podstawie danych z pomiarów wykonanych przez FWD. Jeżeli spełnione są wymagania co do rozproszenia danych, to współczynniki harmonizacji FWD in-situ są obliczane dla wszystkich FWD uczestniczących w badaniu.
3. Niniejsza procedura jest przeznaczona do stosowania dla ugięciomierzy generujących impuls obciążający o podobnej długości. Użycie impulsów o różnych długościach spowoduje powstanie ugięć, których różnice mogą być spowodowane różnicami struktury nawierzchni i podłoża. W takich warunkach ustalanie odpowiednich współczynników harmonizacji FWD in-situ dla wszystkich ugięciomierzy objętych testem wymaga użycia bardziej skomplikowanych technik konwersji.
4. Celem badania powtarzalności jest ustalenie, czy badany FWD jest w stanie generować spójne wyniki na kolejnych 3 stanowiskach badawczych. W procedurze tej powtarzalność FWD jest weryfikowana w serii 12 kolejnych zrzutów wykonywanych na jednym stanowisku bez podnoszenia płyty naciskowej. Pierwsze 2 zrzuty są w analizie pomijane. Wszystkie ugięcia są normalizowane do średniej wartości przekazanego obciążenia. Standardowe odchylenia obciążenia i znormalizowane ugięcia powinny być ze sobą zgodne w podanych granicach. Jeżeli wyniki nie spełniają wymagań, to próbę należy powtórzyć. FWD spełnia wymagania, jeżeli pełna zgodność zostanie osiągnięta na co najmniej 2 stanowiskach badawczych.
5. Badania prowadzi koordynator badań, który decyduje o zadanym poziomie obciążenia, wybiera grupę FWD zakwalifikowaną do badań odtwarzalności i sprawdza, czy realizowane procedury są zgodne z planem przedstawionym w tym protokole. Koordynator badań sprawdza wyniki analiz pod kątem ich dokładności.

2. Przygotowanie do badań porównawczych

Zasady wyboru odpowiednich stanowisk badawczych i podstawowych ustawień urządzeń pomiarowych, w celu prawidłowego wykonania badań, są następujące:

1. Przed badaniami należy wybrać co najmniej 12 stanowisk badawczych o nawierzchni asfaltowej, na których będzie można zbadać reakcję FWD na różne kombinacje struktury nawierzchni i podłoża drogi. Sztywność podłoża i grubość warstwy asfaltu i podbudowy powinna być różna. Do badań odtwarzalności trzeba wybrać co najmniej 9 stanowisk badawczych. Podczas badania stanowiska te muszą być wykorzystane dwukrotnie. Do badania powtarzalności trzeba wybrać co najmniej 3 stanowiska badawcze. Na każdym z nich badanie odbywa się tylko raz.

2. Przy wyborze stanowisk badawczych należy kierować się takimi czynnikami jak łatwość dostępu i bezpieczeństwo pracy. Stanowiska badawcze powinny być zlokalizowane na terenie zamkniętym lub na drogach o małym ruchu pojazdów. Każde ze stanowisk badawczych powinno mieć jednorodną nawierzchnię i nie powinno być na przemian zacieniane i nasłoneczniane, w sposób utrudniający dokładne ustalenie temperatury nawierzchni. Na odcinku 5 m w każdą stronę od stanowiska badawczego nie mogą być widoczne żadne pęknięcia. Ich obecność może sprawić, że czasza ugięć będzie nadmiernie zmienna pomiędzy urządzeniami. Pochylenie poprzeczne i gradient na każdym ze stanowisk badawczych nie powinny przekraczać 4%.
3. Głębokość koleiny na odcinku drogi gdzie zlokalizowano stanowisko badawcze nie powinna być większa niż 2 mm. Każde stanowisko badawcze należy zaznaczyć kołem o średnicy 0,4 m.
4. Na każdym stanowisku badawczym należy wywiercić wąskie otwory służące do pomiaru temperatury nawierzchni w dniu badań. Otwory muszą być wywiercone do połowy głębokości pakietu warstw asfaltowych, jednak nie głębiej niż 100 mm.
5. Płyta naciskowa FWD powinna być ustawiona na oznaczonym miejscu wykonanym na każdym ze stanowisk badawczych. Kolejność pomiarów na stanowiskach podczas próby odtwarzalności powinna być ustalana losowo dla każdego stanowiska. Kolejność badań w drugiej próbie powinna być inna niż w pierwszej.
6. We wszystkich FWD uczestniczących w badaniu muszą być użyte płyty naciskowe o średnicy 300 mm oraz powinny mieć standardowe wyposażenie. Należy użyć co najmniej 5 czujników ugięć. Jeżeli czujników ugięć jest więcej niż 7, to analizuje się tylko dane uzyskane z pierwszej serii (grupy) 7 czujników. Czujniki ugięć rozstawić co 300 mm od centrum obciążenia, niezależnie od ustawień powszechnie używanych w rutynowych badaniach. W przypadku 6 czujników ugięć pomija się odległość 1500 mm. Przy 5 czujnikach ugięć pomija się odległości 1200 mm i 1500 mm.
7. Przed badaniami koordynator badań wytypuje urządzenia do ustalenia wzorca porównawczego. Normalnie, tylko dane zebrane przez zakwalifikowane FWD, mogą służyć jako dane wejściowe do określenia wzorcowej czaszy ugięć. Wzorcowa czasza ugięć jest średnią ugięć zarejestrowanych przez zakwalifikowane FWD. Przy określeniu ugięcia wzorcowego uwzględnia się tylko ugięciomierze, które spełniają warunki w zakresie zmienności.

3. Wykonanie badań porównawczych

W celu uzyskania najbardziej miarodajnych wyników dla wszystkich uczestników badań, należy przestrzegać następujących zasad:

1. Wpisać do arkusza kalibracji (tabela 3.1), dla każdego FWD, następujące dane:
 - a) użytkownika FWD,
 - b) producenta FWD,
 - c) typ / numer seryjny / numer identyfikacyjny FWD,
 - d) numery seryjne czujników ugięć FWD,
 - e) aktualne współczynniki kalibracji czujników ugięć FWD,
 - f) odległości czujników ugięć FWD,
 - g) średnicę płyty naciskowej FWD,
 - h) datę ostatniej harmonizacji FWD in-situ,
 - i) datę ostatniej weryfikacji powtarzalności FWD.
 - j) dane koordynatora badań,
 - k) miejsce badań,
 - l) datę i godzinę badań.
2. Sprawdzić, czy czujniki ugięć są zamontowane w podanych odległościach. W przypadku niezgodności, czujniki ugięć należy ustawić w prawidłowych lokalizacjach. Dopuszcza się przesunięcie czujników do 5 mm względem zalecanych odległości.

3. Na pierwszym stanowisku badawczym wybrać zadane obciążenie. Jeżeli przy normalnych badaniach stosowane są funkcje osiągania zadanego obciążenia i wygładzania wartości szczytowych, to powinny być one użyte także w badaniach odtwarzalności i powtarzalności.
4. W badaniu odtwarzalności wykonać 1 zrzut przygotowujący, bez rejestrowania danych, a następnie 4 identyczne zrzuty z rejestracją wartości maksymalnych obciążenia i ugięcia (oraz, o ile to możliwe, całego przebiegu czasowego ostatniego zrzutu). W analizie zostaną wykorzystane tylko ostatnie 4 zrzuty. Podczas badania nie wolno unosić płyty naciskowej FWD.
5. Każdy FWD uczestniczący w badaniu odtwarzalności, musi mierzyć temperaturę nawierzchni w otworach wywierconych na wszystkich stanowiskach roboczych. Koordynator badań musi przeprowadzić niezależną kontrolę temperatury co najmniej trzykrotnie pomiędzy badaniem pierwszego i ostatniego FWD. Temperaturę zawsze notuje się w stopniach Celsjusza z dokładnością do jednego miejsca po przecinku. Dokładność urządzenia do pomiaru temperatury powinna wynosić $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$. Czas pomiaru temperatury musi być zanotowany z podaniem godziny (w systemie 24-godzinny) i minut (np. 12:15).
6. W badaniu powtarzalności wykonać jeden zrzut przygotowujący, bez rejestrowania danych, a następnie 10 identycznych zrzutów z rejestracją wartości maksymalnych obciążenia i ugięcia. W analizie zostanie wykorzystanych tylko ostatnich 10 zrzutów. Podczas badania nie wolno unosić płyty naciskowej FWD.
7. Dane obciążenia i ugięcia, zapisane wcześniej uzgodnionym formacie, należy przekazać Nadzorowi Badań na zakończenie dnia badań. Przekazać należy także kopię danych o temperaturze.

Tabela 3.1. Arkusz kalibracji wg protokołu LK4

Użytkownik		Producent	
Typ	Numer seryjny	Numer identyfikacyjny	
Numery seryjne czujników ugięć	Aktualne współczynniki kalibracji czujników ugięć	Odległości czujników ugięć	
Średnica płyty naciskowej	Data ostatniej harmonizacji FWD in-situ	Data ostatniej weryfikacji powtarzalności FWD	
Dane koordynatora badań	Miejsce badań	Data i godzina badań	

4. Analiza wyników badań porównawczych

Koordynator badań oblicza przebieg zmian temperatury nawierzchni w każdym z wywierconych otworów, wykorzystując do tego metodę interpolacji liniowej i niezależne odczyty temperatury. Obliczenia te służą do oszacowania temperatury nawierzchni przy każdym pomiarze FWD na stanowisku. Temperatury te zastępują wartości zanotowane przez poszczególne FWD.

Dane ugięcia bada się pod kątem obecności wartości izolowanych. Analityk zgłasza wartości izolowane wraz z zaleceniami co do sposobu potraktowania tych danych przez koordynatora badań, który bierze pod uwagę te zalecenia i podejmuje stosowną decyzję, przedstawiając ją w raporcie.

4.1. Badanie odtwarzalności

Zasady oraz kolejność wykonania obliczeń, w celu otrzymania wyników odtwarzalności dla poszczególnych urządzeń FWD, są następujące:

1. Wszystkie ugięcia, dla każdego FWD i dla każdego stanowiska badawczego, należy znormalizować metodą interpolacji liniowej do poziomu zadanego obciążenia (równanie 4.1). Obliczyć wartość średnią znormalizowanego ugięcia dla każdego czujnika ugięć, w każdym FWD i dla każdego stanowiska badawczego korzystając z grupy czterech zrzutów (równanie 4.2).
2. W przypadku stanowisk badawczych, w sytuacji gdy temperatura nawierzchni pomiędzy pomiarami kolejnych zestawów FWD zmieniła się o ponad 3°C, ugięcie pod płytą naciskową nie powinno być uwzględniane w analizie.
3. Zakwalifikowane FWD uszeregować, dla każdego stanowiska badawczego i czujnika ugięć, według wartości średniego znormalizowanego ugięcia. Jeżeli zakwalifikowanych jest co najmniej pięć FWD, to tymczasowo ze zbioru należy usunąć, dla każdego stanowiska badawczego i czujnika ugięć, FWD zajmujące najwyższe i najniższe miejsce (równania 4.3 i 4.4). Korzystając z pozostałych danych obliczyć ugięcie średnie ważone dla każdego stanowiska badawczego i czujnika ugięć (równanie 4.5).
4. Dla każdego zakwalifikowanego FWD (także dla tymczasowo usuniętych w poprzednim punkcie), dla każdego stanowiska badawczego i czujnika ugięć, obliczyć różnicę między średnią wartością ugięcia zarejestrowanego przez poszczególne FWD a ugięciem średnim ważonym. Obliczyć stosunek tej różnicy do ugięcia średniego ważonego — współczynnik odchylenia.
5. Dla każdego zakwalifikowanego FWD, dla każdego czujnika ugięć i dla wszystkich stanowisk badawczych, obliczyć odchylenie standardowe współczynnika odchylenia (równanie 4.7). Jeżeli odchylenie standardowe badanego FWD przekracza wartość 0,090 w przypadku co najmniej jednego czujnika ugięć, to ten ugięciomierz należy wycofać z listy zakwalifikowanych FWD.
6. W wypadku czterech lub mniej zakwalifikowanych FWD (po punkcie 5) należy obliczyć średnie ugięcie dla każdego stanowiska badawczego i czujnika ugięć we wszystkich zakwalifikowanych FWD (równanie 4.8). Ugięcia wyrażane w μm należy zaokrąglić do najbliższej liczby całkowitej. Uzyskane w ten sposób czasy ugięć są wzorcowymi czasami ugięć.
7. W wypadku zakwalifikowania co najmniej pięciu FWD (po punkcie 5) odczyty z poszczególnych stanowisk badawczych i czujników ugięć należy uszeregować według wartości średniego znormalizowanego ugięcia. Usunąć z zbioru danych każdego stanowiska badawczego i czujnika ugięć największy i najmniejszy odczyt (równania 4.3 i 4.4). Korzystając z pozostałych danych obliczyć średnie ugięcie dla każdego stanowiska badawczego i każdego czujnika ugięć (równanie 4.8). Ugięcia wyrażane w μm należy zaokrąglić do najbliższej liczby całkowitej. Uzyskane w ten sposób czasy ugięć są wzorcowymi czasami ugięć.

8. Dla wszystkich FWD (zakwalifikowanych i niezakwalifikowanych), dla każdego stanowiska badawczego i dla każdego czujnika ugięć obliczyć stosunek ugięcia wzorcowego do ugięcia średniego zarejestrowanego w FWD (równanie 4.9). Obliczyć średnią (równanie 4.10) i odchylenie standardowe (równanie 4.11) tych stosunków dla każdego FWD i czujnika ugięć. Obliczone średnie są „współczynnikiem harmonizacji in-situ czujnika ugięć”. Współczynniki ugięcia mniejsze niż 0,80 i większe od 1,20 wskazują na nieprawidłowe wykalibrowanie wzorcowe czujnika ugięć FWD lub na jego uszkodzenie — oznacza to, że czujnik należy wymienić lub naprawić, i nie może być on zaakceptowany. Czasy trwania impulsu obciążającego odbiegające od występujących w grupie wzorcowej również mogą prowadzić do uzyskania współczynników harmonizacji in-situ czujników ugięć o wartościach wykraczających poza zakres tolerancji.
9. Wystąpienie odchylenia standardowego współczynnika harmonizacji in-situ czujnika ugięć o wartości większej niż 0,090 dyskwalifikuje wyniki testu badanego FWD i czujnika ugięć. Przyczynę problemu należy znaleźć, usunąć i (o ile jest to możliwe) ponownie obliczyć współczynnik harmonizacji in-situ czujnika ugięć. Utrzymywanie się nieprawidłowości dyskwalifikuje dane zebrane przez badany FWD i skutkuje stwierdzeniem niezgodności ze specyfikacjami całej procedury opisanej w tym Protokole LK4-2005.
10. Obliczyć średnią współczynników harmonizacji in-situ czujników ugięć dla całego zestawu czujników ugięć używanych przez poszczególne FWD (równanie 4.12). Średnia ta jest zdefiniowana jako „współczynnik harmonizacji FWD in-situ”. Współczynniki o obliczonych wartościach 0,995–1,005 uważa się za równoważne współczynniki 1,000 — nie jest potrzebna żadna regulacja.

4.2. Badanie powtarzalności

Zasady oraz kolejność wykonania obliczeń, w celu otrzymania wyników powtarzalności dla poszczególnych urządzeń FWD, są następujące:

1. Wszystkie ugięcia znormalizować metodą interpolacji liniowej do poziomu obciążenia zadanego (równanie 4.2). Dla grupy 10 rzutów obliczyć wartość średnią ugięcia każdego z czujników ugięć.
2. Obliczyć odchylenie standardowe wszystkich obciążeń (równanie 4.13) i odchylenie standardowe wszystkich znormalizowanych ugięć dla wszystkich czujników ugięć (równanie 4.14).
3. Na każdym stanowisku badawczym odchylenie standardowe obciążenia zanotowanego w serii 10 rzutów nie powinno być większe niż 2% średniej zanotowanych wartości. Jeżeli rzeczywiste odchylenie standardowe nie spełnia tego wymagania, to kryterium weryfikacji powtarzalności na stanowisku badawczym nie jest spełnione.
4. Na każdym stanowisku badawczym odchylenie standardowe znormalizowanych ugięć zarejestrowanych w serii 10 rzutów nie powinno być większe niż 2 μm , gdy średnia znormalizowanych ugięć nie jest większa niż 40 μm . Odchylenie standardowe znormalizowanych ugięć, zarejestrowanych w serii 10 rzutów, nie powinno być większe niż suma 1,5 μm i 1,25% średniej zarejestrowanych wartości znormalizowanych, gdy ta średnia jest większa niż 40 μm . Jeżeli rzeczywiste odchylenie standardowe przynajmniej jednego czujnika ugięć jest większe od podanych wartości, to kryterium weryfikacji powtarzalności nie jest spełnione przez odnośne badane stanowisko badawcze i badany czujnik (czujniki).
5. FWD spełnia kryteria akceptacji wariacji obciążenia i ugięcia jeżeli na co najmniej dwóch stanowiskach badawczych uzyskana zostanie pełna zgodność z wymaganiami dotyczącymi zarówno obciążenia jak i wszystkich czujników obciążenia.

4.3. Symbole

Objaśnienia symboli i indeksów wykorzystywanych w niniejszej procedurze:

- i — etykieta zrzutu,
- j — etykieta czujnika ugięć,
- k — etykieta stanowiska badawczego,
- m — etykieta FWD,
- n — etykieta wzorcowego FWD,
- NK — liczba zrzutów (4 w badaniu odtwarzalności, 10 w badaniu powtarzalności),
- NG — liczba czujników ugięć,
- NM — liczba stanowisk badawczych
- NN — liczba zakwalifikowanych FWD,
- NR — liczba wzorcowych FWD,
- F_{ikm} — wielkość obciążenia w zrzucie i , na FWD m , na stanowisku badawczym k , w kN,
- F_{ref} — wstępnie wybrane obciążenie zadane, w kN,
- u_{ijkm} — ugięcie nieznormalizowane, zmierzone w zrzucie i przez czujnik ugięć j na FWD m , na stanowisku badawczym k , w μm ,
- d_{ijkm} — ugięcie znormalizowane, zmierzone w zrzucie i przez czujnik ugięć j na FWD m , na stanowisku badawczym k , w μm ,
- d_{jkm} — ugięcie znormalizowane, zmierzone przez czujnik ugięć j na FWD m , uśrednione dla NK zrzutów na stanowisku badawczym k , w μm ,
- d_{jkn} — ugięcie znormalizowane, zmierzone przez czujnik ugięć j na FWD n , uśrednione dla NK zrzutów na stanowisku badawczym k , w μm ,
- $d_{jk,max}$ — maksymalne ugięcie czujnika ugięć j w zakwalifikowanej grupie FWD, na stanowisku badawczym k , w μm ,
- $d_{jk,min}$ — minimalne ugięcie czujnika ugięć j w zakwalifikowanej grupie FWD, na stanowisku badawczym k , w μm ,
- $d_{jk,wmean}$ — średnia ważona ugięcia czujnika ugięć j na stanowisku badawczym k , w μm ,
- $d_{jk,ref}$ — wzorcowe ugięcie czujnika ugięć j na stanowisku badawczym k , w μm ,
- D_{jkm} — odchylenie ugięcia znormalizowanego dla średniego ugięcia ważonego, w μm ,
- s_{Djm} — odchylenie standardowe odchyleń od średniego ugięcia ważonego w poszczególnych czujnikach ugięć i FWD, w μm ,
- R_{jkm} — stosunek ugięcia wzorcowego do ugięcia zmierzonego przez FWD m , dla czujnika ugięć j i stanowiska badawczego k ,
- R_{jm} — współczynnik harmonizacji in-situ czujnika ugięć w FWD m ,
- R_m — współczynnik harmonizacji in-situ FWD dla FWD m ,
- sd_{jkm} — odchylenie standardowe znormalizowanych ugięć, zmierzonych przez czujnik ugięć j w FWD m w NK zrzutach na stanowisku badawczym k , w μm ,
- sF_{km} — odchylenie standardowe obciążenia w FWD m w NK zrzutach na stanowisku badawczym k , w μm ,
- sR_{jm} — odchylenie standardowe odchyleń stosunku ugięcia wzorcowego do ugięcia zmierzonego na stanowisku m , dla czujnika ugięć j na wszystkich stanowiskach badawczych w badaniu odtwarzalności, w μm .

Zakwalifikowane FWD należy ponumerować od 1 do NN włącznie. Pozostałe FWD ponumerować od $NN+1$ do NF włącznie.

4.4. Równania

Normalizacja ugięć do wstępnie wybranego poziomu obciążenia zadanego:

$$d_{ijkm} = \frac{50}{F_{ikm}} u_{ijkm} . \quad (4.1)$$

Obliczenie średniego ugięcia dla danego stanowiska badawczego, danego czujnika ugięć i danego FWD:

$$d_{jkm} = \frac{\sum_{i=1}^{NK} d_{ijkm}}{NK} . \quad (4.2)$$

Znalezienie maksymalnej wartości wyniku ze wzoru (4.2) dla danego stanowiska badawczego i danego czujnika ugięć, w grupie zakwalifikowanych FWD:

$$d_{jk,max} = \max(d_{jk1}, d_{jk2}, K, d_{jkNN}) . \quad (4.3)$$

Znalezienie minimalnej wartości wyniku ze wzoru (4.2) dla danego stanowiska badawczego i danego czujnika ugięć, w grupie zakwalifikowanych FWD:

$$d_{jk,min} = \min(d_{jk1}, d_{jk2}, K, d_{jkNN}) . \quad (4.4)$$

Obliczenie średniego ugięcia dla danego czujnika ugięć i danego stanowiska badawczego, z wyłączeniem wartości maksymalnych i minimalnych znalezionych w poprzednim punkcie. Uzyskany wynik jest średnim ugięciem ważonym:

$$d_{jk,wmean} = \frac{\sum_{m=1}^{NN} d_{jkm} - d_{jk,max} - d_{jk,min}}{NN - 2} . \quad (4.5)$$

Obliczenie, dla wszystkich zakwalifikowanych FWD, dla danego FWD i stanowiska badawczego, odchylenia ugięcia od średniego ugięcia ważonego:

$$D_{jkm} = \frac{d_{jkm} - d_{jk,wmean}}{d_{jk,wmean}} . \quad (4.6)$$

Obliczenie, dla wszystkich zakwalifikowanych FWD, odchylenia standardowego zbioru wyników dla danego czujnika ugięć:

$$sD_{jm} = \sqrt{\frac{NM \sum_{k=1}^{NM} D_{jkm}^2 - \left(\sum_{k=1}^{NM} D_{jkm} \right)^2}{NM (NM - 1)}} . \quad (4.7)$$

Zmiana numeracji zakwalifikowanych FWD od $n = 1$ do NR . Obliczenie odchyłeń wzorcowych i zaokrąglenie wyników do najbliższej liczby całkowitej (w μm):

$$d_{jk,ref} = \frac{\sum_{n=1}^{NR} d_{jkn}}{NR} \quad \text{dla } NR \leq 4, \quad (4.8)$$

$$d_{jk,ref} = \frac{\left(\sum_{n=1}^{NR} d_{jkn} \right) - d_{jk,max} - d_{jk,min}}{NR - 2} \quad \text{dla } NR \geq 5. \quad (4.9)$$

Obliczenie stosunku ugięcia wzorcowego do ugięcia zmierzonego:

$$R_{jkm} = \frac{d_{jk,ref}}{d_{jkn}} . \quad (4.10)$$

Obliczenie średniej stosunków ugięcia wzorcowego do ugięcia zmierzonego dla grupy NM stanowisk badawczych. Uzyskana średnia jest współczynnikiem harmonizacji in-situ czujnika ugięć:

$$R_{jm} = \frac{\sum_{k=1}^{NM} R_{jkm}}{NM} . \quad (4.11)$$

Obliczenie odchylenia standardowego stosunków ugięcia wzorcowego do ugięcia zmierzonego dla grupy NM stanowisk badawczych:

$$sR_{jm} = \sqrt{\frac{NM \sum_{k=1}^{NM} R_{jkm}^2 - \left(\sum_{k=1}^{NM} R_{jkm} \right)^2}{NM (NM - 1)}} . \quad (4.12)$$

Obliczenie średniej wartości współczynników harmonizacji in-situ czujników ugięć:

$$R_m = \frac{\sum_{j=1}^{NG} R_{jm}}{NG} . \quad (4.13)$$

Obliczenie odchylenia standardowego obciążeń dla poszczególnych stanowisk badawczych w badaniu powtarzalności:

$$sF_{km} = \sqrt{\frac{NK \sum_{i=1}^{NK} F_{ikm}^2 - \left(\sum_{i=1}^{NK} F_{ikm} \right)^2}{NK (NK - 1)}} . \quad (4.14)$$

Obliczenie odchylenia standardowego znormalizowanych ugięć dla poszczególnych stanowisk badawczych w badaniu powtarzalności:

$$sd_j = \sqrt{\frac{NK \sum_{i=1}^{NK} d_{ij}^2 - \left(\sum_{i=1}^{NK} d_{ij} \right)^2}{NK (NK - 1)}} . \quad (4.15)$$

5. Sprawozdanie

Sprawozdanie powinno zawierać co najmniej:

1. dane arkusza kalibracyjnego,
2. wyniki badań,
3. wyniki analizy,
4. informację, czy badany FWD spełnia wymogi specyfikacji,
5. zatwierdzenie i autoryzację przez koordynatora badań.

Po analizie wyników badań porównawczych i spełnieniu wymagań niniejszej procedury, urządzenie otrzymuje Świadectwo Dopuszczenia do Wykonywania Pomiarów (SDWP), wystawione przez jednostkę nadzorującą kampanię pomiarową, dopuszczające zestawy FWD do pomiarów w danym sezonie.