



JAKUB FENGIER

Politechnika Poznańska
jakub.fengier@put.
poznan.pl



ANDRZEJ POŻARYCKI

Politechnika Poznańska
andrzej.pozarycki@put.
poznan.pl

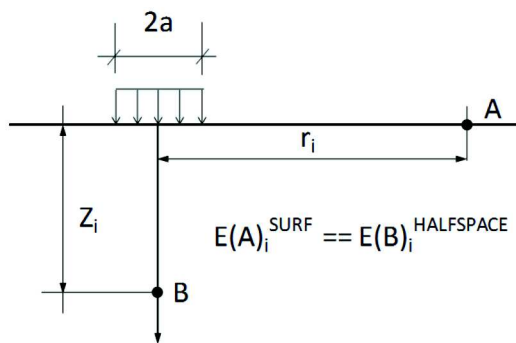
Możliwości diagnozowania podłoża nawierzchni jezdni na podstawie uproszczonego modelu ośrodków wielowarstwowych

Identyfikacja wartości modułów sztywności/sprężystości poszczególnych warstw modelu nawierzchni drogowej na podstawie zmierzonych wartości przemieszczeń na powierzchni jezdni, z matematycznego punktu widzenia jest zadaniem niejednoznacznym. Istnieje wiele konfiguracji modeli nawierzchni, w których błąd dopasowania obliczonego i zmierzonego przekroju czaszy ugięć będzie osiągać tę samą wartość. W takim kontekście wysiłek doboru odpowiednich założeń do modelu konstrukcji, który jest podstawą iden-

tyfikacji jest uzasadniony, a narzędzia pozwalające na wstępną weryfikację, mogą pełnić rolę filtra eliminującego błędy.

Wzór Boussinesqa do obliczenia wartości przemieszczeń półprzestrzeni sprężystej wciąż pozostaje ciekawą propozycją w problemach obliczeń odwrotnych. Wzór nie dostarcza informacji wprost na temat wartości modułu sprężystości ośrodków wielowarstwowych, ale umożliwia poczynienie odpowiednich założeń, dzięki którym czas obliczeń może być krótszy, a wartości błędów są w akceptowanym przez inżyniera przedziale.

Wzory umożliwiające obliczenie wartości przemieszczeń, bądź modułów półprzestrzeni sprężystej *SM* (*Surface Modulus*) – rys. 1 – dane są zależnościami (1) oraz (2).



Rys. 1. Koncepcja SM [13]

$$w = \frac{1+\nu}{E} \cdot \frac{P}{2\pi} \cdot (3-2\nu) \cdot \frac{1}{z} \quad (1)$$

$$w = \frac{2(1+\nu)^2}{E} \cdot \frac{P}{2\pi} \cdot \frac{1}{r} \quad (2)$$

w których:

w – przemieszczenie w kierunku pionowym,

ν – współczynnik Poissona,

E – moduł sprężystości,

z – rzędna,

r – odległość od osi obciążenia w kierunku poziomym.

Przy przyjęciu takich założeń można dojść do wniosku, że przemieszczenia na powierzchni są co do wartości równe przemieszczeniom w osi obciążenia, kiedy spełnione są warunki:

$$\frac{2z}{3} \geq r \geq \frac{z}{2} \quad (3)$$

$$0 \leq \nu \leq 0,5 \quad (4)$$

Przyjmując takie oznaczenia wielkość *SM* definiuje się jako [13]:

$$SM_i = \frac{(1-\nu^2) \cdot q \cdot a^2}{r_i \cdot w_i} \quad (5)$$

w której:

r_i – odległość w poziomie i -tego punktu od osi obciążenia,

w_i – wartość przemieszczenia dla i -tego punktu w kierunku pionowym,

SM_i – wartość *SM* w i -tym punkcie.

Największą niepewność prezentowanego podejścia stanowi fakt, że rozważania dotyczą modelu półprzestrzeni. W odniesieniu do ośrodków wielowarstwowych takich jak nawierzchnia jezdni zastosowanie jest ograniczone. Jednak przykład znaczenia w budownictwie drogowym parametrów oznaczanych przy zastosowaniu np. metody VSS jest dowodem na to, że odpowiednia interpretacja wyników otrzymanych w półprzestrzeni nie wyklucza metod bazujących na uproszczonych modelach.

Przegląd wiedzy

W dostępnej literaturze opisanych jest wiele prób, podejmowanych w celu wykorzystania wyników badań ugięciomierzem dynamicznym, bez angażowania teorii obliczeń odwrotnych [4], ograniczając rozważania jedynie do wnioskowania na podstawie wartości przemieszczeń zmierzonych na powierzchni jezdni w ściśle ustalonych miejscach (w Europie przyjmowany jest rozstaw punktów pomiarowych w odległości 0, 0,3 0,6 0,9 1,2 1,5 1,8 m od osi obciążenia). Do stosowanych w praktyce należą parametry przedstawione w pracy [7], a mianowicie: a) *SCI* (*ang. Surface Curvature Index*), do

szacowania modułu sprężystości warstw asfaltowych dla nawierzchni podatnych $SCI = D_0 - D_{30}$, b) BDI (*ang. Base Damage Index*), do oceny stanu warstw asfaltowych nawierzchni pól sztywnych oraz oceny podbudowy z kruszywa łamanego stabilizowanego mechanicznie (KŁSM) $BDI = D_{30} - D_{60}$ oraz c) BCI (*ang. Base Curvature Index*), który znalazł zastosowanie do oceny podłoża gruntowego $BDI = D_{60} - D_{90}$, gdzie: D_i – przemieszczenie w odległości „i” od osi obciążenia w cm. W pracy [8] wskazuje się również na możliwość analizy wpływu ilości punktów przegięcia linii przemieszczeń na jakość połączenia. Dowodzi się tam, że w przypadku, gdy występują dwa punkty przegięcia, szczepność jest wystarczająca. Gdy istnieją trzy punkty przegięcia, między warstwami asfaltowymi występuje poślizg. W pracy [9] autor zwraca uwagę, że *Surface Modulus* (SM) to wielkość, którą można wykorzystać do oceny sztywności poszczególnych warstw konstrukcji nawierzchni. Zauważa, że im bardziej oddalony od osi pomiar ugięcia, tym większy wpływ sztywności warstwy najniższej na wartości przemieszczenia zmierzonego w tym miejscu. W pracy [13] stwierdza, że SM może być parametrem przydatnym do wstępnego szacowania modułów sprężystości podłoża nawierzchni, a analiza taka może być przydatna przy obliczeniach odwrotnych modułów sprężystości poszczególnych warstw nawierzchni. Przytoczone tam przykłady obrazują tezę, że wartość SM można wykorzystać do ustalenia błędnej identyfikacji modułów w przypadku modeli nawierzchni, w których wartość modułu sprężystości nie maleje wraz z głębokością. Z własnych doświadczeń wynika, że wnioski te są ograniczone jednak do metody zastosowanej przez autora. W rozprawie [1] przedstawiono koncepcję SM jako parametru, który może służyć do identyfikacji przypadków, w których podłoża nawierzchni nie można traktować jako ciała sprężyste i pojedyncza wartość (moduł sprężystości) nie jest wystarczająca do budowy modelu podłoża. Ponadto, przedstawiono tam hipotezę, że w przypadku, gdy są przesłanki ku temu, aby podłoża mogło być opisane modelem sprężystym, najmniejsza wartość SM spośród tych obliczonych (przyjmując poszczególne wartości względem osi obciążenia) jest wartością, która najlepiej przybliża wartość modułu sprężystości podłoża nawierzchni. Autor pracy [6] przedstawia skokowy spadek wartości SM podczas odwilży w stosunku do sytuacji, gdy podłoża gruntowe było zmrożone. Autor wykazuje również niewielki wpływ zbrojenia nawierzchni siatką stalową na wartość SM. Kontrolę jakości materiałów niezwiązanych z uwzględnieniem ich wilgotności przedstawił [14], poddając pod dalsze rozważania relację SM w zależności od grubości warstw asfaltowych. Praca [5] traktuje zbiór wartości SM jako parametr oceny podłoża gruntowego oraz przedstawia jako narzędzie do wyznaczenia odcinków jednorodnych. Co więcej, autor przedstawia możliwość określenia za pomocą parametru SM (*Surface Modulus*) (parametr oznaczany w laboratoryjnym teście trójosiowego ściskania), który jest podstawową wielkością związków nieliniowych w modelach nawierzchni szczególnie w odniesieniu do warstw niezwiązanych [2,11]. Autorzy tych prac wskazują, że identyfikacja modułów sprężystości oparta na teorii, w której pomija się związki nieliniowe, często prowadzi do przeszacowania wartości modułów podłoża nawierzchni i niedoszacowania wartości modułu KŁSM (w przypadku nawierzchni podatnych), w stosunku do wyników ba-

dań laboratoryjnych. Rozporządzenie ministra infrastruktury z dnia 16 stycznia 2002 r. w sprawie przepisów techniczno-budowlanych dotyczących autostrad płatnych, wyznacza metodę oceny nośności, będącą szczególnym przypadkiem SM. Rozporządzenie to wprowadza termin miarodajnego zastępczego modułu sprężystości nawierzchni, określanego jedynie na podstawie wartości przemieszczenia w osi obciążenia. Metoda ta jest relatywnie prosta, jednak nie uwzględnia rodzaju nawierzchni i nie jest jednoznaczna, ponieważ wymagana wartość modułu zastępczego będzie uzyskiwana praktycznie w każdym przypadku, gdy w konstrukcji nawierzchni zastosowano sztywną podbudowę. Jako przykład wnioskowania, który prowadzi do błędnego oszacowania nośności tą metodą, mogą posłużyć wyniki analizy modelu nawierzchni trójwarstwowej o grubościach: 15 cm BA, 30 cm KŁSM oraz podłoża. Wartość przemieszczenia w osi obciążenia równa 369,2 μm odpowiada modelom nawierzchni, w której sprężystość warstw opisana jest odpowiednio: $E_1 = 10000 \text{ MPa}$, $E_2 = 400 \text{ MPa}$ i $E_3 = 100 \text{ MPa}$ oraz $E_1 = 10000 \text{ MPa}$, $E_2 = 11393 \text{ MPa}$ i $E_3 = 30 \text{ MPa}$. Wyniki takie oznaczają, że nie można w sposób jednoznaczny ocenić nośności podłoża gruntowego, bazując na wartości przemieszczenia zmierzonego wyłącznie w osi obciążenia.

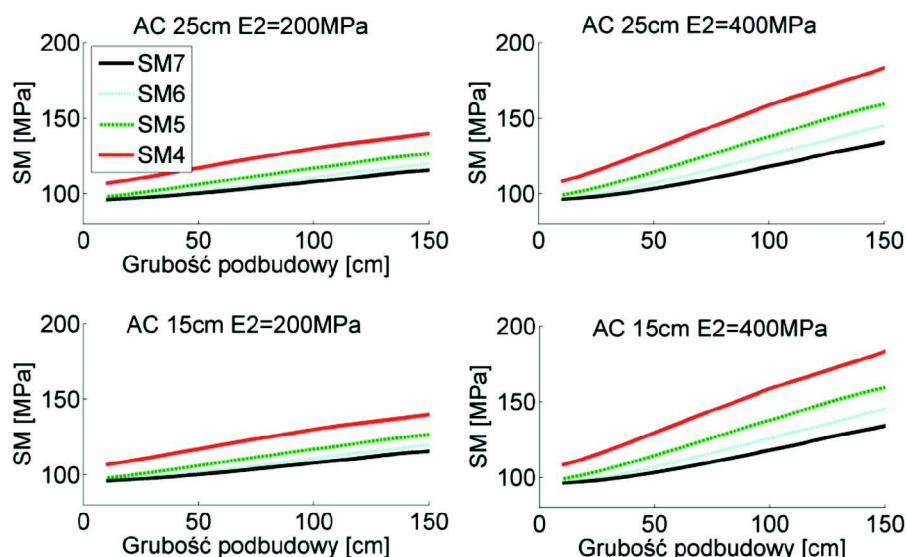
Praktyczne aspekty wykorzystania SM w modelach numerycznych nawierzchni

W pracy opisano przykłady identyfikacji parametrów modelu przy najbardziej powszechnie stosowanych założeniach w praktyce. Analizie poddano zarówno takie modele, w których wartość modułu poszczególnych warstw nawierzchni wraz z głębokością maleje, jak i te, w których to założenie nie jest spełnione.

Wpływ grubości warstw nawierzchni na wartość SM

Analizę wpływu grubości podbudowy na wartość SM zilustrowano w odniesieniu do przemieszczeń obliczonych w odległości od osi obciążenia równej 90, 120, 150 i 180 cm będących kolejno 4, 5, 6 i 7 geofonem przy typowym ugięciomierzu dynamicznym. Przyjęto dwa warianty podatnej konstrukcji nawierzchni: AC ($E = 10000 \text{ MPa}$) o grubościach 15 cm i 25 cm o podbudowie z KNSM (kruszywo naturalne stabilizowane mechanicznie $E = 200 \text{ MPa}$) i z KŁSM (kruszywo łamane stabilizowane mechanicznie $E = 400 \text{ MPa}$). Podłoża nawierzchni zamodelowano jako półprzestrzeń opisaną modelem sprężystości o wartości 100. W dalszej kolejności obliczono wartości przemieszczeń, które były podstawą wyznaczenia SM.

Najmniejszy przyrost wartości SM, biorąc pod uwagę poszczególne grubości podbudowy, można zaobserwować w przypadku przemieszczeń oddalonych od osi obciążenia o 180 cm (rys. 2), dlatego przedział ten jest odzwierciedleniem wartości modułu podłoża gruntowego w najszerszym zakresie, biorąc pod uwagę analizowane warianty. W przypadku wariantu z podbudową KŁSM (o większej nośności) jest to grubość w przedziale między 10 a 35 cm, a w przy-



Rys. 2. Wpływ konstrukcji nawierzchni na wartość SM (SM4, SM5, SM6, SM7 – wartości SM obliczone dla przemieszczeń obliczonych w odległościach odpowiadających lokalizacji geofonów nr 4,5,6 i 7 w typowym urządzeniu FWD)

padku podbudowy z KNSM (o niższej nośności) przedział waha się w granicach od 10 do 90 cm. Przyjmując kryterium dopuszczalnej wartości błędów względnych równej 15%, SM może służyć do określania wartości modułu podłoża tej nawierzchni pod warunkiem, że grubość warstwy podbudowy w nawierzchni podatnej nie przekracza 35 oraz 90 cm odpowiednio dla warstwy KŁSM i KNSM.

Własności identyfikacji parametrów przy danych syntetycznych (model sprężysty LET)

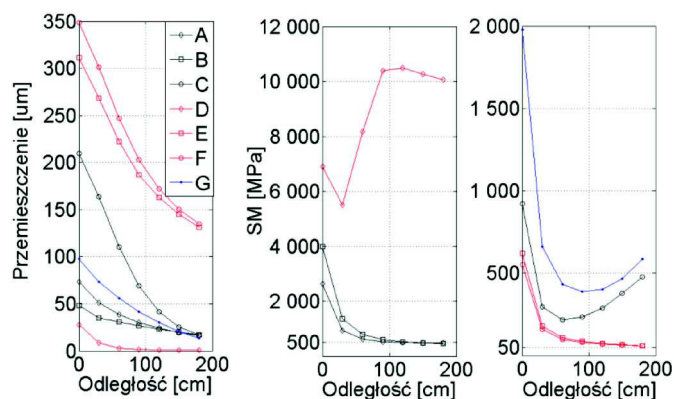
Rozważaniom poddano siedem różnych przypadków modeli konstrukcji nawierzchni jezdni (oznaczone symbolami A, B, C, D, E, F, G w tabeli 1). W modelu przyjęto obciążenie (707 kPa) równomiernie rozłożone na powierzchni koła o średnicy 30 cm. Przesunięcia na powierzchni jezdni w odniesieniu do wektora odległości $r = (0, 30, 60, 90, 120, 150, 180)$ obliczono przy założeniu powiązania warstw. W dalszej kolejności założono, że otrzymane tym sposobem linie przemieszczeń stanowią wynik pomiaru ugięć nawierzchni, a poszukiwaniom będą podlegały wartości modułów sprężystości

Tabela 1. Dane syntetyczne i wyniki obliczeń odwrotnych

Wariant modelu nawierzchni	Zakładana wartość modułu sprężystości zakładany					Wyniki identyfikacji modułów sprężystości identyfikowany					
	E1 [MPa]	E2 [MPa]	E3 [MPa]	E4 [MPa]	E5 [MPa]	E1 [MPa]	E2 [MPa]	E3 [MPa]	E4 [MPa]	E5 [MPa]	RMS [%]
A	10000	3000	500	–	–	9839	3021	501	–	–	0,08
B	10000	25000	500	–	–	10483	23846	500	–	–	0,18
C	10000	50	500	–	–	10027	50	500	–	–	0,10
D	10000	3000	10000	200	–a	9416	3260	9097	202	–	0,20
E	10000	100	5000	50	–	9709	104	4528	50	–	0,12
F	10000	50	10000	50	–	10125	48	11287	49	–	0,10
G	10000	3000	50	500	5000	10713	2925	44	389	491	0,10

w poszczególnych warstwach tych siedmiu modeli. Obliczenia odwrotne przeprowadzono przy założeniu wielowarstwowej nawierzchni spoczywającej na półprzestrzeni sprężystej (model LET *layer elastic theory*). Zakładając, że: materiały są izotropowe, sprężyste, warstwy mają stałą grubość h_i (najniższa ma grubość nieskończoną) oraz warstwy w planie są nieograniczone, do obliczeń wykorzystano algorytm Nelder Mead. Zaprezentowane przypadki symulują najczęściej spotykane sytuacje występujące przy identyfikacji parametrów modeli nawierzchni asfaltowych (tabela 1).

Do każdego wariantu modelu nawierzchni (spośród wariantów przedstawionych w tabeli 1), zgodnie ze wzorem (5) obliczono wartości SM. Wykresy przemieszczeń i kształt krzywych SM w funkcji odległości od osi obciążenia przedstawiono na rys. 3.



Rys. 3. Typowa postać krzywych dla danych syntetycznych a) wartości przemieszczeń b) SM

Na podstawie kształtu krzywych SM przedstawionych na rys. 3 można wyróżnić następujące sytuacje:

- Krzywe A i B asymptotycznie dążą do wartości modułu sprężystości podłoża w przypadku, gdy w modelu nawierzchni założono układ warstw, w których wartość modułów wraz z głębokością maleje.

- Krzywe C i G wyrażające wielkość SM nie są asymptotyczne i występuje wyraźny wzrost SM wraz ze wzrostem odległości od osi obciążenia. Sytuacja taka ma również miejsce przy nieliniowych modelach materiałowych, w których $E = f(\sigma)$, tzw. materiały *stress-sensitive*, co oznacza, że taki przypadek może sygnalizować niejednorodne i uwarstwione podłoże.
- Naprzemienna lokalizacja warstw o „dużej” i „małej” sztywności/sprężystości skutkuje charakterystycznym kształtem krzywej SM (krzywa D), co stanowi ważną informację kontrolną na etapie budowy modelu, który ma być wykorzystany do identyfikacji parametrów w analizie odwrotnej.
- Ważną cechą przypadku krzywych E i F jest mała wartość SM w osi obciążenia w porównaniu do krzywych o podobnym kształcie (A i B), jednak spostrzeżenie nie jest uniwersalne, bo nie można sformułować jednoznacznych wniosków gdy brakuje wariantu do porównania.

Opis krótkiego eksperymentu dowodzi, że na podstawie SM można formułować praktyczne wnioski. Mogą one stanowić wsparcie decyzji np. o układzie warstw w nawierzchni w sytuacji, gdy są do dyspozycji tylko wyniki pomiarów przemieszczeń na najwyżej usytuowanej w przekroju normalnym warstwie nawierzchni. Przy tych spostrzeżeniach, brak asymptotycznego przebiegu krzywej SM autorzy nazywają dalej „zaburzeniem warunku malejącej sztywności wraz z głębokością” lub krócej „zaburzeniem”.

Model odniesienia

Obrazy krzywych SM można również przedstawić w powiązaniu z koncepcją wyidealizowanego modelu porównawczego, który w tej pracy zbudowano na podstawie makroskopowego rozpoznania konstrukcji przy wykorzystaniu techniki odwiercania rdzeni z nawierzchni i prześwietleń georadarowych. Biorąc pod uwagę rzeczywiste dane o konstrukcji nawierzchni (układ warstw, materiał i grubości) zakłada się, że sztywność warstw analizowanej nawierzchni odpowiada wartościom modułów sprężystości/sztywności jak przy nawierzchni nowej. W świetle tak sformułowanego założenia, w dalszym kroku warstwom modelu przypisuje się wartości modułów, korzystając z zestawienia umieszczonego w rozporządzeniu nr 430 (DzU nr 43 z dnia 2 marca 1999 r.). Diagram tego rozumowania zilustrowano na rys. 4.

Przykładowa postać modelu przygotowanego do identyfikacji parametrów E_i w analizie odwrotnej	Model odniesienia
E_1 ($T_{ref} = 10^\circ C$), BA, 15 cm	$E_1 = 10000$ MPa, BA, 15 cm
E_2 , KŁSM, 40 cm	$E_2 = 400$ MPa, KŁSM, 40 cm
.....
E_{n-1} , KNSM, 15 cm	$E_{n-1} = 200$ MPa, KNSM, 15 cm
E_n , grunt rodzimy	$E_n \approx E_{v2} = 100$ MPa

Rys. 4. Schemat modelu nawierzchni wyrażający koncepcję modelu odniesienia

Na potrzeby budowy modeli odniesienia wykorzystano założenie, że wartość modułu sprężystości warstwy podłoża wynosi 120 MPa lub 100 MPa, w zależności od obciążenia ruchem na rozważanym odcinku drogi.

Wykorzystanie SM w formułowaniu warunków brzegowych analizy odwrotnej

U podstaw założeń modelu Bousinessqa leży półprzeźroczystość sprężysta. W rzeczywistości, w większości ośrodków ten warunek nie jest spełniony, ale praktyczne wykorzystanie wspomnianej tu już wcześniej metody VSS (obliczanie E_{v1} i E_{v2}), sprawia, że pomimo upływu czasu model wciąż ma swoje uzasadnienie. W takim podejściu, ośrodek wielowarstwowy traktuje się jako jedną warstwę o nieskończonej grubości. W ogólnym przypadku analizy ośrodków wielowarstwowych do wyboru są dwie możliwości: należy zdecydować czy daną grupę warstw a) traktować jako półprzeźroczystą b) sprowadzić do przekroju jednowarstwowego (przeprowadzić homogenizację), wykorzystując przekształcenia, np. typu [12] czy [3], jeśli wykorzystuje się model dynamiczny.

Jak wcześniej wspomniano, na rys. 3 przedstawione zostały typowe postacie krzywych SM w funkcji odległości od obciążenia dla danych syntetycznych. W przypadku większości nawierzchni w Polsce (przyjmując rozwiązania rozporządzeniu nr 430) prawdziwe wydaje się założenie, że występuje przypadek opisany wariantami A oraz B, czyli malejąca wartość modułu kolejnych warstw wraz z głębokością. Z drugiej strony, z własnych doświadczeń i tych opisanych w pracy [11] wynika, że podczas identyfikacji odwrotnej parametrów modelu nawierzchni jezdni relatywnie często dochodzi do sytuacji, w której ma miejsce kilkukrotne przeszacowanie wartości modułu sprężystości jednej z warstw przy niedoszacowaniu innej. Zidentyfikowane wartości są zupełnie nieadekwatne do oczekiwań inżyniera, np. wartość modułu podłoża z gliny wynosi 1000 MPa, podczas gdy warstwa kruszywa łamanego ułożonego na tym podłożu opisana jest modułem rzędu 50 MPa. Zgodnie z przywołaną już pracą [11], zachodzi tu zjawisko tzw. „kompensacji” i wynika z faktu zastosowania niewłaściwego modelu. Zakłada się więc w takim przypadku wybór lepszego (najczęściej z dużo większą liczbą parametrów) modelu. Inne sposoby sprowadzają się do poszukiwania rozwiązań przybliżonych. Do tych drugich można zaliczyć technikę zakładania z góry (a priori) wartości modułu podłoża w modelu, co w rzeczywistości oznacza warunek brzegowy w analizie odwrotnej. Podejście skutkuje uzyskaniem większego błędu RMS od wartości dopuszczalnej, przyjmowanej w większości jako równej 2%, jednak w praktyce wyniki identyfikacji są dużo bardziej wiarygodne. Często w takim przypadku rozwiązaniem jest też przyjęcie nieliniowego modelu materiałowego w postaci *Resilient Modulus* [11].

Wobec powyższych, autorzy w pracy testują możliwość wykorzystania w analizie odwrotnej spostrzeżeń związanych z wielkością SM. W modelu nawierzchni, przy znanych a priori grubościach warstw, można obliczyć wartości SM przy przemieszczeniach w różnych odległościach od osi obciążenia i wartość minimalną założyć jako wartość modułu sprężystości podłoża. Pozostałe warstwy podlegają normalnym procedurom identyfikacji. W pracy analizowane są

głównie modele trójwarstwowe, z uwagi na ich powszechne zastosowanie wśród konstrukcji nawierzchni w Polsce (układ warstw typu podłoże – podbudowa – mma). Dodatkowo, z przykładów zestawionych w tabeli 1, identyfikacja tych modeli jest relatywnie jednoznaczna, jeżeli by przyjąć model identyfikacji typu LET.

Tabela 2. Wyniki identyfikacji wartości modułów sprężystości na odcinku nr 1

Przekrój czaszy ugięć wg:	E1inv	E2inv	E3inv	RMS	E1inv	E2inv	E3 = min(SM)*	RMS
	2	3	4	5	6	7	8	9
	MPa	MPa	MPa	%	MPa	MPa	MPa	%
Obliczeń LET dla modelu odniesienia, T=10°C	9886	431	121	0,31	9436	456	119	0,47
Pomiarów FWD, T=4°C	16718	257 /	170	2,06	14729	383	164	2,20

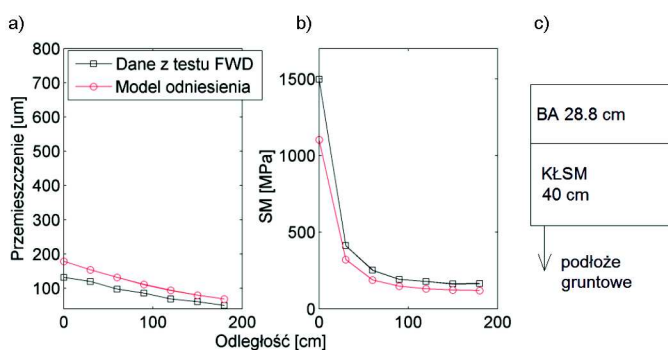
* Sztywność podłoża przyjęta zgodnie z opisem w punkcie 3.4, Einv – wartość zidentyfikowana

Konfrontacja modeli numerycznych z wynikami badań nawierzchni

W dalszej kolejności analizie poddano przykłady nawierzchni pięciu zróżnicowanych pod względem konstrukcji nawierzchni jezdni dróg wojewódzkich i krajowych. Wykorzystując koncepcję modelu odniesienia, założeniem o traktowaniu ośrodka warstwowego jako model półprzestrzeni sprawdza się, czy można się spodziewać akceptowanych wyników identyfikacji przy założonej z góry wartości podłoża (wartość SM), i na tej podstawie wykonać obliczenia odwrotne dla konstrukcji rzeczywistej.

Odcinek nr 1

Analizie poddano wyniki badań ugięciomierzem dynamicznym nawierzchni o konstrukcji jak na rys. 5, poddanej obciążeniu siłą o wartości 51 kN (KR 5). Obliczona postać krzywej SM (5) asymptotycznie dąży do wartości, którą przypuszczalnie można uznać za wartość modułu sprężystości podłoża nawierzchni (przypadek adekwatny do wariantu A przy danych syntetycznych opisany w tabeli 1). Asymptotyczny charakter SM w obszarze odległym od osi obciążenia, sugeruje liniową relację $\sigma-\varepsilon$ wszystkich warstw. W wyniku identyfikacji, uzyskane wartości modułów odpowiadają oczekiwaniom założeń inżynierskich, które w tym przypadku skłaniają do uznania, że wraz z kierunkiem osi „z” (oznaczającej przeloty warstw nawierzchni) wartości modułów sukcesywnie maleją.



Rys. 5. Wyniki analiz: a) przekrój przez czaszę ugięć, b) wartości SM, c) schemat konstrukcji nawierzchni odcinka nr 1

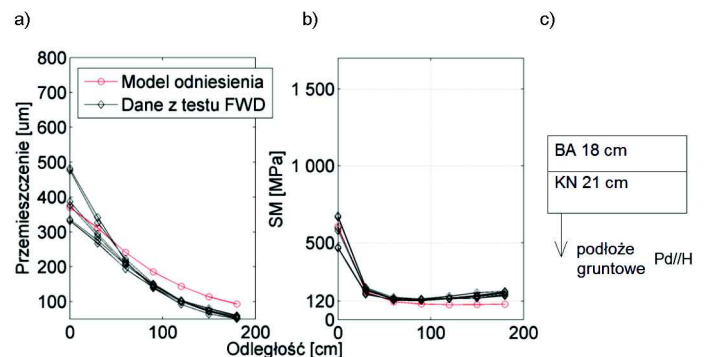
Postać krzywej SM obliczonej na podstawie wyników identyfikacji zestawiono z kształtem krzywej określonej do modelu odniesienia. Zakładając w modelu odniesienia, że $E1(T = 10^\circ\text{C}) = 10\,000\text{ MPa}$, $E2 = 400\text{ MPa}$, $E3 = 120\text{ MPa}$, obliczono przekrój czaszy ugięć, który w kolejnym kroku posłużył jako dane wejściowe syntetyczne w analizie odwrotnej (tabela 2).

Uzyskano tym sposobem pewien obraz zachowania się nawierzchni nowej, o grubościach warstw przedstawionych na rys. 5.

W wariancie w którym skorzystano z właściwości krzywej SM (tabela 2, kol 6,7,8), wartość minimalna SM jest przybliżeniem wartości modułu podłoża nawierzchni (164 MPa). Przyjmując, że wartości te traktujemy w analizie odwrotnej jako znane, identyfikacji podlega jedynie wartość warstw MMA i KŁSM. W stosunku do wartości spodziewanych rezultaty identyfikacji skłaniają do zaakceptowania wartości przy zastosowaniu techniki z SM, ostatecznie jednak, trudno jest o jednoznaczną weryfikację tej koncepcji w tym przypadku.

Odcinek nr 2

Kolejny przypadek dotyczy analizy konstrukcji nawierzchni odcinka drogi kategorii ruchu KR 3, poddanej typowemu zabiegowi wzmocnienia „w górę”. Przekrój czaszy ugięć na podstawie testu FWD oraz obliczone wartości SM zilustrowano na rys. 6.



Rys. 6. Wyniki analiz: a) Przekrój przez czaszę ugięć, b) Wartości SM, c) Schemat konstrukcji nawierzchni odcinka nr 2

Kształt krzywych SM oznaczonych na podstawie danych z eksperymentu, przypomina kształt krzywych C i G według danych syntetycznych. W nawiązaniu do tych modeli wnioskujemy, że w układzie sztywności warstw wystąpił efekt przyrostu sztywności podłoża nawierzchni. To oznacza, że podłoże może być uwarstwione i można się spodziewać, że relacja $\sigma-\varepsilon$ jest nieliniowa. Takie spostrzeżenie skłania do wykorzystania nieliniowego modelu konstytutywnego materiału podłoża.

W tabeli 3 zestawiono wyniki identyfikacji parametrów warstw modelu nawierzchni przedstawionego na rysunku 6c. W wyniku obliczeń odwrotnych na podstawie standardowych założeń LET, uzyskano wyniki, w stosunku do których nasu-

Tabela 3. Wyniki identyfikacji wartości modułów sprężystości na odcinku nr 2 – model LET

Nr krzywej		E1inv	E2inv	E3inv	RMS	E1inv	E2inv	E3 = min(SM)*	RMS
		2	3	4	5	6	7	8	9
		MPa	MPa	MPa	%	MPa	MPa	MPa	%
1	T=7°C F = 57.5 kN,	11563	30	165	1,20	6861	361	126	12,17
2		11813	45	190	1,99	6289	317	133	14,95
3		8101	71	158	1,31	4999	273	128	10,87
4		8838	47	174	1,94	4835	250	126	15,10
5		4318	53	170	1,75	2798	148	129	17,08
6		5364	55	158	3,48	3204	173	124	13,51
Model odniesienia		9919	197	100*	0,12	8120	341	97	1,66

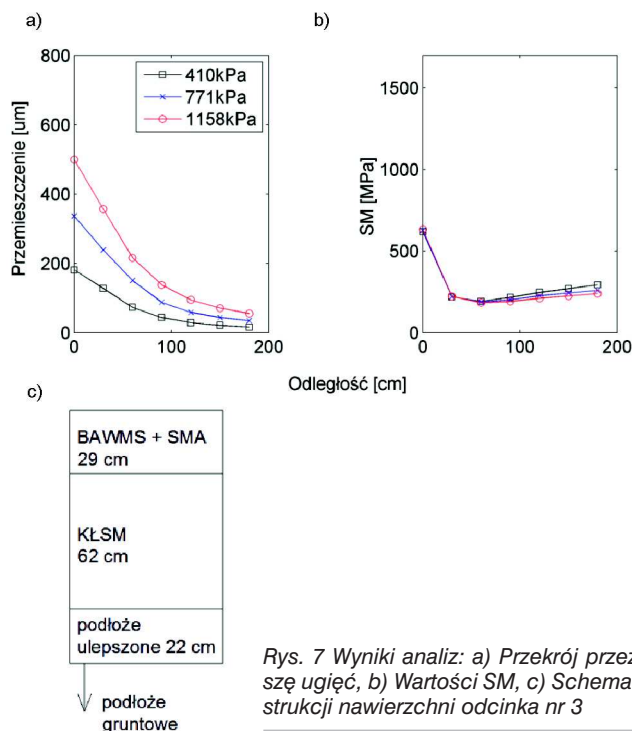
* Sztywność podłoża przyjęta zgodnie z opisem w punkcie 3.4

wają się wątpliwości. Zidentyfikowane wartości modułów warstwy podbudowy z kruszywa naturalnego są nieprawdopodobnie niskie w porównaniu do wartości podłoża nawierzchni złożonego z piasku drobnego z domieszką humusu. Stosując identyfikację z przyjęciem wartości SM podłoża (tabela 3 kolumny 6,7,8), wyniki są bardziej zbliżone do oczekiwanych, jednak wartość błędu RMS jest większa o rząd wielkości (tabela 3 kolumna 9) w porównaniu z błędem standardowej identyfikacji dla 3-warstwowego modelu (tabela 3 kolumna 5).

Odcinek nr 3

Dalsze rozważania dotyczą konstrukcji nawierzchni przedstawionej na rys. 7 obciążonej ruchem KR 6. Wektor naprężeń „pod płytą” w badaniach ugięciomierzem na powierzchni warstw asfaltowych był równy $q = (410, 771, 1158)$ kPa.

Im większe wartości naprężeń, tym wartość modułu sprężystości warstw najniższych jest mniejsza. Z warunku $SM = \min(f(r, q)) \approx 200$ MPa, wynika, że dla różnych obciążeń w osi

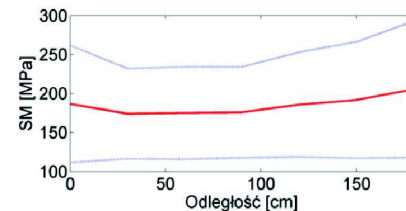


Rys. 7 Wyniki analiz: a) Przekrój przez czaszą ugięć, b) Wartości SM, c) Schemat konstrukcji nawierzchni odcinka nr 3

obciążenia wartość modułu warstw usytuowanych poniżej warstw asfaltowych jest stała. Z kolei wartości SM obliczone na wszystkich odległościach „r”, wykazują kształt podobny do krzywej C i G przy danych syntetycznych. Należy tu jednak podkreślić, że ich krzywizna jest dużo mniejsza, a wraz ze wzrostem wartości naprężeń krzywe wykazują asymptotyczny charakter zmierzając do wartości 200 MPa, a więc minimalnej wartości wspomnianego powyżej warunku min(SM). Mając tu jednak na uwadze wnioski sformułowane w punkcie 3.1, i relatywnie dużą grubość warstwy kruszywa (62

cm), należy przyjąć, że wartości te odnoszą się do parametrów warstwy z kruszywa, a nie warstw podłoża (tych usytuowanych poniżej KŁSM). Na rys. 8 przedstawiono 95% przedział ufności wartości SM obliczonych w odniesieniu do przemieszczeń zmierzonych na powierzchni warstwy z kruszywa.

Uzyskany kształt krzywej SM jest bardzo zbliżony do linii poziomej, szczególnie w zakresie dla $r \leq 100$ cm. To sugeruje, że uzyskane wyniki odnoszą się do zarówno do warstwy półprzestrzeni, jak i modelu sprężystego, co oznacza spełnione założenia teorii Boussinesqa. Choć autorzy nie przytaczali tu wyników badań metodą VSS na powierzchni kruszywa, warto zauważyć, że wartości SM przedstawione na rys. 8 są w przybliżeniu równe wartościom Ev_2 , oznaczonym na powierzchni KŁSM.



Rys. 8. Wykres przedziału ufności (95 %) dla wartości SM przy obciążeniu 30kN podczas pomiaru urządzeniem FWD na powierzchni KŁSM

Odcinek nr 4

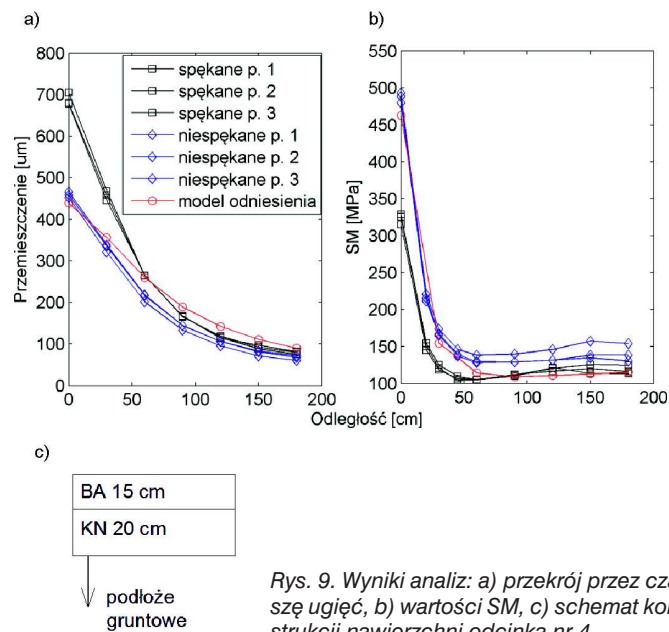
Do badań wytypowano odcinek o długości 20 metrów obciążony ruchem KR 4. Odcinek był jednorodny pod względem układu konstrukcyjnego, co potwierdziły badania georadarem. Na powierzchni połowy odcinka pomiarowego stwierdzono spękania siatkowe. Badania ugięciomierzem dynamicznym wykonano w sześciu sąsiednich punktach pomiarowych (w trzech miejscach, gdzie podczas wizualnej inwentaryzacji stwierdzono spękania i w trzech, gdzie spękań nie odnotowano). Uzyskane wyniki zilustrowano na rys. 9.

Na rys. 9 mianem spękanych oznaczono punkty, w których odbyły się zrzuty FWD z widocznymi spękaniem warstwy ścieralnej (3 punkty w odległościach 3 metrów od siebie), natomiast mianem niespękanych określono punkty na obszarze, na którym zaobserwowano brak spękań na powierzchni warstwy ścieralnej (3 punkty w odległościach 3 metrów od siebie).

Tabela 4. Wyniki identyfikacji modułów sprężystości na odcinku nr 4 – model LET

punkt	Temperatura podczas pomiarów	E1inv [MPa]	E2inv [MPa]	E3inv [MPa]	RMS [%]	E1inv [MPa]	E2inv [MPa]	E3 = min(SM)* [MPa]	RMS [%]
Odcinek spękany									
1	T=27°C	2571	98	112	2,58	2312	129	105	5,36
2		2358	93	114	1,29	2102	126	105	5,80
3		2972	84	118	1,14	2435	129	105	8,56
Odcinek niespękany									
4	T=27°C	5482	133	148	1,21	4578	201	138	4,65
5		5499	166	133	0,65	4621	208	128	1,62
6		4761	195	129	1,48	4530	219	127	1,91
Model odniesienia									
	T=10°C	9890	205	100	0,31	8562	294	98	1,36

* Szywność podłoża przyjęta zgodnie z opisem w punkcie 3.4

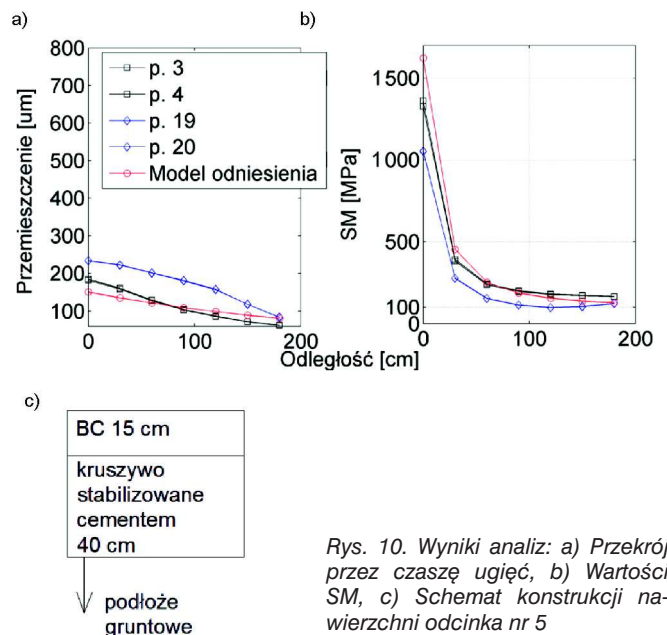


Zaburzenia odnotowane za pomocą SM są szczególnie widoczne na odcinku spękany. Identyfikacja parametrów modelu (tabela 4) bez określania jakichkolwiek warunków brzegowych przyniosła efekt, w którym wartość „E” podłoża modelu nawierzchni była większa od wartości modułu warstwy z KŁSM (wspomniany wcześniej efekt kompensacji). Wyniki identyfikacji uzyskane przy zastosowaniu koncepcji SM w ocenie inżynierskiej wydają się bardziej prawdopodobne. Na spękanej części jezdni zidentyfikowane wartości modułów podłoża i warstwy kruszywa naturalnego są mniejsze w porównaniu do tych uzyskanych dla części odcinka bez spękań. W kontrolnych otworach geotechnicznych na odcinku ze spękaniem stwierdzono wilgotność około 18%, co stanowiło średnio o 3-5% procent więcej niż na odcinku bez spękań. W konsekwencji konfrontacji tych spostrzeżeń z wynikami modelu odniesienia, pomimo zawilgoconego podłoża, wartości wynikające z warunku $SM = \min(f(r))$ dla odcinka ze spękaniem wciąż spełniają wymagania minimalnej

wartości E_{v2} w stosunku do podłoża (> 100 MPa), jednak w porównaniu do wartości uzyskanych dla odcinka bez spękań są niemal o 50% mniejsze.

Odcinek nr 5

Odcinek drogi obciążony ruchem KR 4 posłużył autorom do przetestowania koncepcji zastosowania wielkości SM do identyfikacji parametrów modelu nawierzchni sztywnej (rys. 10). Z uwagi na układ warstw w nawierzchni w badaniach ugięciomierzem dynamicznym zastosowano obciążenie o wartości równej 64 kN.



W przypadku nawierzchni sztywnych można zaobserwować inne kształty linii przemieszczeń (wklęsłość i wypukłość), co nie miało miejsca w nawierzchniach podatnych. W konsekwencji zaburzenie kształtu SM zaprezentowane na rysunku 10 przełożyło się na efekt kompensacji w postaci zamiany wartości modułów pomiędzy warstwami drugą i trzecią (tabela 5 punkt 19 i 20). Sytuacja ta nie miała miejsca przy zasto-

Tabela 5. Wyniki identyfikacji modułów sprężystości na odcinku nr 5

punkt	E1inv [MPa]	E2inv [MPa]	E3inv [MPa]	RMS [%]	E1inv [MPa]	E2inv [MPa]	E3 = min(SM)* [MPa]	RMS [%]
3	36185	745	144	0,52	32970	893	165	0,70
4	35773	819	146	0,53	34338	849	166	0,97
19	99999	21	200	5,88	64324	5235	98	25,21
20	99999	21	141	5,80	86223	7174	98	27,88
Model odniesienia	35037	4271	120	0,48	13204	5663	127	1,83

* Sztywność podłoża przyjęta zgodnie z opisem w punkcie 3.4,

** Wartości wyjściowe modelu odniesienia

sowaniu i wykorzystaniu koncepcji SM, jednak uzyskane wartości są z inżynierskiego punktu widzenia zupełnie nierealne (szczególnie dla warstwy betonu cementowego). Gdy zaburzenie nie występuje, stosując obie metody identyfikacji uzyskano bardzo zbliżone rezultaty (tabela 5 punkty pomiarowe nr 3 i 4). Wartość identyfikowanego modułu podłoża przy zastosowaniu koncepcji SM (opisanej w punkcie 3.4) różniła się o mniej niż 10% w stosunku do średniej wartości E_{v2} uzyskanej w badaniach in-situ.

Wnioski

W sytuacji, gdy dąży się do rozwiązań optymalnych w zakresie konstrukcji nawierzchni jezdni, kluczowym zadaniem jest poprawny dobór parametrów poszczególnych warstw modelu nawierzchni. Jeżeli poprzez nośność będzie się wyrażać zdolność nawierzchni jezdni do przenoszenia określonej liczby obciążeń cyklicznych w założonym okresie czasu, to szacunkowy charakter wartości parametrów przyjętych do wymiarowania może w praktyce okazać się zbyt dużym uproszczeniem, a optymalizacja będzie nieskuteczna, mając na uwadze szeroki wachlarz technologii wzmocnień dostępnych na rynku.

Na podstawie wyników przeprowadzonych badań nawierzchni jezdni, analizy modeli numerycznych i założeń przyjętych na potrzeby tej pracy (odzwierciedlających powszechną praktykę w tym obszarze), można sformułować następujące wnioski:

- Jeżeli wykres funkcji opisującej wartość parametru SM (*surface moduli*) w zależności od odległości od osi obciążenia ma asymptotyczny charakter, wartość modułu sprężystości poszczególnych warstw modelu nawierzchni jezdni maleje wraz z głębokością, przy czym:
 - Nieasymptotyczne dążenie krzywej zbudowanej na podstawie wielkości SM w modelu 3-warstwowym nawierzchni oznacza, że model sprężysty (LET) będzie skutkował efektem kompensacji, dokonując zamiany wartości identyfikowanych modułów pomiędzy warstwą drugą a trzecią,
 - Mniejsza wartość błędów RMS nie musi oznaczać prawidłowo dobranych parametrów modelu podczas identyfikacji odwrotnej i analogicznie (wartość większa RMS nie musi ich wykluczać)
- Przy różnych wartościach naprężenia na styku płyta obciążająca – nawierzchnia, w najbardziej odległych od osi obciążenia punktach pomiaru, można zauważyć przyrost

wartości SM. Zachowanie można uznać za ilustrację „czystego” przypadku nieliniowej reakcji podłoża.

- W przypadku, gdy wykres funkcji $SM = f(r)$ wskazuje na nieliniową charakterystykę podłoża nawierzchni, wartością która w przybliżeniu jest równa wartości modułu sprężystości ostatniej warstwy modelu (podłoża nawierzchni) jest wartość minimalna z wartości SM,
- Stosowanie analizy odwrotnej z wykorzystaniem koncepcji SM i modeli LET, prowadzi do wyników z większą wartością błędów RMS, jednak przyporządkowane wartości modułów dolnych warstw konstrukcji jezdni są bliższe oczekiwaniom z inżynierskiego punktu widzenia,
- SM może również być pomocne przy identyfikacji parametrów modelu konstrukcji sztywnych. Krzywa SM w tym przypadku nie jest „asymptotyczna”, ale zbiega się do wartości zbliżonej do wartości modułu sprężystości podłoża (pod warunkiem wklęsłej postaci przekroju czasu ugięć),
- Zakres zastosowania identyfikacji parametrów modelu nawierzchni jezdni z użyciem parametru SM, modelu LET i „zasięgu” metody FWD najprawdopodobniej ogranicza się do obliczeń odwrotnych modeli o łącznej grubości warstw nie większej niż 90 cm.

Bibliografia

- M. Broutin, Assessment of flexible airfield pavements using Heavy Weight Deflectometers, Paryż, Narodowa szkoła mostów i dróg, 2010.
- K. Drenth, The low-strength interlayer: a realistic assumption or an expensive approximation in the back-calculation process, Sterrebeek, Belgian Road Research Centre, 2010.
- M. Graczyk, Nośność konstrukcji nawierzchni wielowarstwowych w krajowych warunkach klimatycznych, Warszawa, IBDiM, 2010.
- J. Grobler, T. Cameron, The use of FWD testing as a quality control tool during construction, Sydney, 2011.
- E. Horak, Surface moduli determined with the falling weight deflectometer used as benchmarking tool, Pretoria, University of Pretoria, 2007.
- H. Kangas, et al., Testing a pavement on thawing, frost-susceptible subgrade with the heavy vehicle simulator, Helsinki, Finnish National Road Administration, 2000.
- R. Kim, Use of falling weight deflectometer multi-load data for pavement strength estimation, Raleigh, North Carolina State University, 2002.
- T. Mechowski, et al., Sprawozdanie z realizacji pracy TD-75pt.: Opracowanie metody oceny jakości połączenia warstw konstrukcji nawierzchni za pomocą ugięciomierza dynamicznego FWD, Warszawa, IBDiM, 2006.
- A. Molenaar, Structural Evaluation and Strengthening of Flexible Pavements Using Deflection Measurements and Visual Condition Surveys, Delft, Delft University of Technology, 2009.
- C. Sopian, Płyta kolistna na wielowarstwowej półprzestrzeni sprężystej, Wrocław, Politechnika Wrocławska, 1963.
- S.D. Tayabji, et al., Nondestructive testing of pavements and backcalculation of moduli, Fredricksberg, ASTM, 2000.
- P. Ullidtz, Pavment Analysis, Amsterdam, Development in Civil Engineering Tom 19, 1987.
- F. van Cauwelaert, Pavement design and evaluation the required mathematics and its applications, Brussels, Federation of the Belgian Cement Industry, 2003.
- C. van Gorp, et al., The use of LWD on granular bases and asphalt structures, Sterrebeek, 2010.