

## Bibliografia

- [1] *Katalog typowych konstrukcji nawierzchni podatnych i półsztywnych*, IBDiM, GDDKiA, Warszawa 1997
- [2] *Oberbaubemessung RVS 03.08.63*, Österreichische Forschungsgesellschaft Strasse, Schienne, Verkehr, kwiecień 2008 *Catalogue des structures types de chaussées neuves*, Ministère de l'Équipement des Transports et du Logement, SETRA, LCPC, 1998
- [3] *Catalogue des structures types de chaussées neuves*, Ministère de l'Équipement des Transports et du Logement, SETRA, LCPC, 1998
- [4] *RStO 01 – Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaues von Verkehrsflächen*, FSV, 2001
- [5] *Design Manual for Roads and Bridges*, Vol. 7, Section 2, Part 3 HD 26/06 *Pavement Design*, luty 2006
- [6] Judycki J. i wsp., *Weryfikacja i aktualizacja „Katalogu typowych konstrukcji nawierzchni podatnych i półsztywnych z 1997 r.”*, Politechnika Gdańska, Katedra Inżynierii Drogowej, Gdańsk, listopad 2011. Opracowano na zlecenie GDDKiA *Katalog wzmocnień i remontów nawierzchni podatnych i półsztywnych*, GDDKiA, IBDiM, Warszawa 2001
- [7] *Design Manual for Roads and Bridges*, Vol. 7, Section 2, Part 1 HD 26/06, *Traffic Assessment*, luty 2006
- [8] *Katalog wzmocnień i remontów nawierzchni podatnych i półsztywnych*, GDDKiA, IBDiM, Warszawa, 2001
- [9] *French Design Manual for Pavement Structures*, Guide technique, LCPC, SETRA, maj 1997
- [10] *Conception et dimensionnement des structures de chaussée*, Guide technique, LCPC, SETRA. Decembre 1994
- [11] Sommer H. et al., *Überarbeiten der RVS 8.05.13 Zementstabilisierte Tragschichten*, Austrian Ministry for Traffic, Innovation and Technology, Heft 520, 2002
- [12] *AASHTO Guide for Design of Pavement Structures*, AASHTO, Washington D.C., 1993
- [13] Judycki J., Dołycki B., Jaskuła P., *Przedwczesne uszkodzenia nawierzchni asfaltowych*, I Kongres Drogowy, Warszawa, 04-06.10.2006, s. 359-368
- [14] Judycki J., Alenowicz J., Cyske W., Leszman G., *Analizy obliczeniowe dotyczące weryfikacji „Katalogu typowych konstrukcji nawierzchni podatnych i półsztywnych”; Część I – Ocena wpływu funkcji i kryteriów zmęczeniowych na wymiarowanie konstrukcji nawierzchni; Wybór funkcji i kryteriów, Część II, Wymiarowanie typowych podatnych i półsztywnych konstrukcji nawierzchni drogowych, Część II, Raporty badawcze dla IBDiM, Biuro Inżynierii Drogowej DROTEST, Gdańsk 1995 ■*



MARIUSZ JACZEŃSKI

Politechnika Gdańska  
Katedra Inżynierii  
Drogowej  
mariusz.jaczeński@  
willis.pg.gda.pl



JÓZEF JUDYCKI

Politechnika Gdańska  
Katedra Inżynierii  
Drogowej  
jozef.judycki@willis.pg.  
gda.pl

## Adaptacja francuskich kryteriów zmęczeniowych do projektowania nawierzchni podatnych w warunkach polskich

Począwszy od 1977 r. do dnia dzisiejszego, projektowanie typowych konstrukcji nawierzchni w Polsce opiera się na katalogach typowych konstrukcji nawierzchni. W 1977 r. był to Katalog Typowych Konstrukcji Jezdni Podatnych, znowelizowany w 1983 r. Konstrukcje nawierzchni zaprojektowane były według metod empirycznych. W pierwszej istotnej aktualizacji, czyli w Katalogu Typowych Konstrukcji Nawierzchni Podatnych i Półsztywnych [5] z 1997 r., do wyznaczenia grubości warstw zastosowano metody mechanistyczno-empiryczne. Druga duża aktualizacja katalogu, przeprowadzana obecnie przez Katedrę Inżynierii Drogowej Politechniki

Gdańskiej, dodaje do analizy zmęczeniowej opracowane w ostatnich latach kryteria. Należą do nich m.in. opracowane w Stanach Zjednoczonych kryteria AASHTO 2004 [4] oraz opracowane w Europie kryteria francuskie [1], [2], [3]. Celem niniejszego artykułu jest przedstawienie głównych założeń metody francuskiej w zakresie kryteriów zmęczeniowych wraz z jej dostosowaniem do warunków polskich.

Dostępne opisy metody francuskiej są napisane w sposób niejasny, co utrudnia jej zrozumienie i analizę. W angloję-

zycznych publikacjach na temat metody francuskiej brakuje uporządkowanego opisu wszystkich niezbędnych parametrów do projektowania. Często brakuje też jednoznacznego opisu przyjętych założeń. Ponadto francuska klasyfikacja materiałów odbiega w niektórych elementach bardzo istotnie od klasyfikacji polskiej. Całkowicie nowym elementem zastosowanym w projektowaniu w Polsce jest stosowana we Francji analiza ryzyka oraz wpływu niejednorodności materiałów i podłoża w projektowaniu nawierzchni.

Pierwszy katalog typowych nawierzchni powstał we Francji w 1971 r., był zmieniony w 1977 r., 1988 r. i w 1998 r. Obecnie obowiązujący katalog francuski opiera się na racjonalnym podejściu wykorzystującym metody analizy mechaniki konstrukcji.

### Francuskie kryterium spękań zmęczeniowych warstw asfaltowych [1], [2], [3]

Kryterium francuskie podane jest jako następujący wzór ogólny:

$$\varepsilon_{t,ad} = \varepsilon(NE, \theta_{eq}, f) \cdot k_r \cdot k_c \cdot k_s \quad (1)$$

gdzie:

$\varepsilon_{t,ad}$  – dopuszczalne poziome odkształcenie rozciągające warstwy, określane na dolnej powierzchni warstw asfaltowych,

$\varepsilon(NE, \theta_{eq}, f)$  – odkształcenie rozciągające, dla którego następuje zniszczenie próbki zginanej z 50% prawdopodobieństwem, otrzymane po NE cyklach obciążenia, w temperaturze ekwiwalentnej, przy częstotliwości charakterystycznej dla naprężeń występujących w rozważanej warstwie,

- $k_r$  – współczynnik ryzyka,
- $k_c$  – współczynnik materiału,
- $k_s$  – współczynnik podłoża.

Prawo zmęczenia dla materiałów asfaltowych można przedstawić przy pomocy wzoru:

$$\varepsilon(NE, \theta_{eq}, f) = \varepsilon_6(\theta_{eq}, f) \cdot \left(\frac{NE}{10^6}\right)^b \quad (2)$$

gdzie:

$\varepsilon_6(\theta_{eq}, f)$  – odkształcenie rozciągające, przy którym z 50% prawdopodobieństwem zachodzi zniszczenie próbki przy zginaniu po  $10^6$  cyklach, w zadanej temperaturze ekwiwalentnej ( $\theta_{eq}$ ) oraz dla zadanej częstotliwości ( $f$ ),

- $NE$  – ilość obciążeń osi standardową,
- $b$  – nachylenie krzywej zmęczenia materiału w układzie współrzędnych  $\log \varepsilon - \log N$ .

Podstawowym badaniem do określenia wartości parametrów modułu  $E$  (w  $15^\circ\text{C}$  i  $10\text{ Hz}$ ) oraz odkształcenia rozciągającego  $\varepsilon_6$  (w  $10^\circ\text{C}$  i  $25\text{ Hz}$ ) jest test kontrolowanego odkształcenia. Schematem badania jest zginanie wspornikowe belki trapezowej. Schemat badania pokazano na rysunku 1.

W przypadku braku dokładnych danych laboratoryjnych dotyczących  $\varepsilon_6$  dla badanej mieszanki mineralno-asfaltowej w żądanych temperaturach, możliwe jest wyznaczenie wymaganego parametru w oparciu o następujący wzór:

$$\varepsilon_6(\theta) \cdot E(\theta)^{0.5} = \text{const} \quad (3)$$



Rys. 1. Schemat badania zginania wspornikowego belki trapezowej, rysunek według [2]

gdzie:

$\varepsilon_6(\theta)$  – odkształcenie, przy którym z 50% prawdopodobieństwem zachodzi zniszczenie próbki przy zginaniu po  $10^6$  cyklach w zadanej temperaturze ( $\theta$ ),

$E(\theta)$  – moduł sprężystości Younga mieszanki mineralno-asfaltowej w zadanej temperaturze ( $\theta$ ).

Zależność ta jest spełniona dla stałej częstotliwości ( $f$ ), w przypadku gdy rozpatrywana konstrukcja nawierzchni pracuje w klimacie umiarkowanym, w temperaturach powyżej  $0^\circ\text{C}$ , dla typowych częstotliwości obciążenia nawierzchni od  $10$  do  $25\text{ Hz}$  ( $\sim 15\text{-}30\text{ km/h}$ ).

Zależność ta nie obowiązuje dla:

- bardzo niskiej i wysokiej temperatury,
- bardzo zróżnicowanych charakterystycznych częstotliwości obciążenia (bardzo wolny ruch, warstwy ścieralne),
- materiałów o właściwościach reologicznych innych niż tradycyjne materiały asfaltowe.

Dla typowych warunków wzór otrzymuje następująca postać:

$$\varepsilon(NE, \theta_{eq}, f) = \varepsilon_6(10^\circ\text{C}, 25\text{ Hz}) \cdot \left[\frac{E(10^\circ\text{C})}{E(\theta_{eq})}\right]^{0.5} \cdot \left(\frac{NE}{10^6}\right)^b \quad (4)$$

co ostatecznie daje wzór:

$$\varepsilon_{t,ad} = \varepsilon_6(10^\circ\text{C}, 25\text{ Hz}) \cdot \left[\frac{E(10^\circ\text{C})}{E(\theta_{eq})}\right]^{0.5} \cdot \left(\frac{NE}{10^6}\right)^b \cdot k_r \cdot k_c \cdot k_s \quad (5)$$

a przekształcając do obliczeń według metody stosowanej w katalogu:

$$NE = \left\{ \frac{\varepsilon_{t,ad}}{\varepsilon_6(10^\circ\text{C}, 25\text{ Hz}) \cdot \left[\frac{E(10^\circ\text{C})}{E(\theta_{eq})}\right]^{0.5} \cdot k_r \cdot k_c \cdot k_s} \right\}^{\frac{1}{b}} \cdot 10^6 \quad (6)$$

Ze wzoru (6) można obliczyć trwałość zmęczeniową warstw asfaltowych, jako liczbę osi standardowych  $NE$  o ciężarze  $130\text{ kN}$  do wystąpienia spękań zmęczeniowych warstw asfaltowych.

### Współczynniki modyfikujące trwałość zmęczeniową konstrukcji

W przedstawionych powyżej wzorach występują następujące współczynniki modyfikujące trwałość zmęczeniową konstrukcji:

- $k_r$  – współczynnik ryzyka dostosowujący odkształcenie dopuszczalne (*working strain*) do dobranego ryzyka wyznaczonego na podstawie odchylenia standardowego grubości warstwy nawierzchni ( $Sh$ ) oraz wyników testów zmęczeniowych ( $SN$ ),
- $k_c$  – współczynnik dostosowujący wyniki obliczeń do rzeczywistego zachowania danego materiału na drodze,
- $k_s$  – współczynnik redukcji, uwzględniający efekt miejscowego braku zdolności do przenoszenia obciążeń warstwy znajdującej się pod warstwą rozpatrywaną (pod warstwą asfaltową lub związaną spoiwem hydraulicznym).

Metodyka obliczania poszczególnych współczynników została podana poniżej.

## Współczynnik ryzyka – $k_r$

Wzór na współczynnik związany z ryzykiem, redukujący dopuszczalne naprężenie, a przy tym trwałość nawierzchni, przedstawia się następująco:

$$k_r = 10^{-u\delta b} \quad (7)$$

gdzie:

$u$  – losowa wariancja rozkładu normalnego związanego z ryzykiem  $r$ ,

$\delta$  – wynikowe odchylenie standardowe łączące dwa odchylenia standardowe: grubości warstw nawierzchni (Sh) oraz testów zmęczeniowych (SN),

$b$  – nachylenie krzywej zmęczeniowej materiału w układzie  $\log \varepsilon - \log N$ .

Metoda francuska podaje następującą definicję ryzyka obliczonego:

„Ryzyko obliczone „x%” na okres „p” lat jest to prawdopodobieństwo (x%), że przez okres „p” lat, bez wykonywania zabiegów wzmacniających nawierzchni drogowej, pojawią się takie zniszczenia, że będzie wymagana całkowita rekonstrukcja nawierzchni”.

Przykładowo, przyjmując ryzyko 2% dla nawierzchni projektowanej na okres 30 lat, istnieje dwuprocentowa szansa, że nawierzchnia ulegnie zniszczeniu w stopniu wymagającym całkowitej rekonstrukcji. Dobranie ryzyka w projektowaniu nawierzchni leży w gestii projektanta. Katalog francuski podaje typowe wartości, w zależności od stosowanego materiału oraz kategorii ruchu. W tabeli 1 przedstawiono zestawienie przyjętego ryzyka dla obliczeń dla ruchu według klasyfikacji francuskiej.

Tabela 1. Wartości ryzyka (%) w zależności od kategorii ruchu, według [1], [2], [3]

Kategoria ruchu (FR)	Ryzyko dla nawierzchni podatnych	Ryzyko dla nawierzchni półsztywnych (jedna faza pracy)	Ryzyko dla nawierzchni półsztywnych (dwie fazy pracy)
T3	25%	12%	35%
T2	12%	7,5%	20%
T1	5%	5%	10%
T0	2%	2,5%	3%

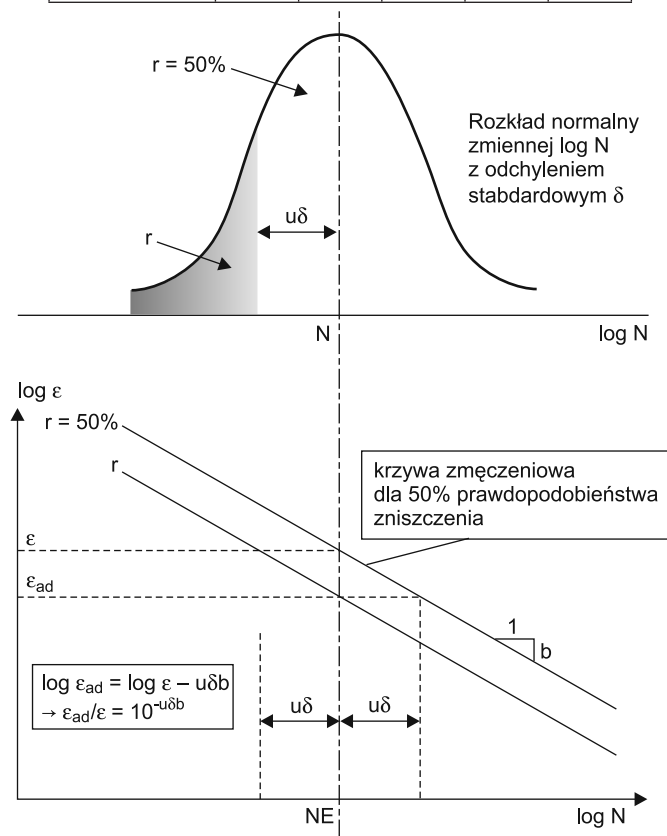
Pozostałe parametry konieczne do wyznaczenia współczynnika związanego z ryzykiem zaprezentowano na rysunku 2.

Parametr  $u$  (losowa wariancja rozkładu normalnego związanego z ryzykiem  $r$ ) określany jest na podstawie załączonych do katalogu tablic. Przyjęte wartości  $u$  w zależności od przyjętego ryzyka przedstawiono w tabeli 2.

Tabela 2. Wartości parametru  $u$  w zależności od wybranego ryzyka  $r$

u									
-2,05	-1,96	-1,881	-1,65	-1,439	-1,28	-1,175	-0,84	-0,674	-0,385
ryzyko (r) %									
2%	2,5%	3%	5%	7,5%	10%	12%	20%	25%	35%

Fraktyl (u)	-0,84	-1,04	-1,28	-1,65	-2,05
Ryzyko (r) (%)	20	15	10	5	2



Rys. 2. Wyznaczanie odkształcenia dopuszczalnego  $\varepsilon_{ad}$  na podstawie testów zmęczeniowych, rysunek według [2], [3]

Odchylenie standardowe  $\delta$ , łączące odchylenia standardowe grubości warstwy nawierzchni (Sh) oraz wyników testów zmęczeniowych (SN) określone jest następującym wzorem:

$$\delta = \left[ SN^2 + \left( \frac{c^2}{b^2} \right) \cdot Sh^2 \right]^{0,5} \quad (8)$$

gdzie:

$SN$  – odchylenie standardowe liczby cykli (w skali logarytmicznej), prowadzących do zniszczenia przez zmęczenie materiału,

$c$  – współczynnik łączący wariancję odkształcenia (naprężenia) w nawierzchni z losową wariancją grubości  $\Delta h$ , ( $\log \varepsilon = \log \varepsilon_0 - c \Delta h$ ),

$b$  – nachylenie krzywej zmęczeniowej materiału w układzie współrzędnych  $\log \varepsilon - \log N$ ,

$Sh$  – odchylenie standardowe grubości nawierzchni.

Współczynniki  $SN$  oraz  $b$  są parametrami materiałowymi. Wartość  $SN$  dla materiałów asfaltowych zawiera się w przedziale od 0,25 do 0,4. Szczegółowe wartości zostaną przedstawione w sekcji dotyczącej materiałów. Wartość współczynnika  $-1/b$  dla materiałów asfaltowych wynosi 5 dla każdego typu mieszanki.

Współczynnik  $c$  dla typowych konstrukcji przyjmuje stałą wartość wynoszącą w przybliżeniu  $0,02 \text{ cm}^{-1}$ .

Współczynnik  $Sh$  przyjmowany jest w zależności od stosowanego materiału i przedstawia się następująco:



- dla cienkich warstw asfaltowych  $Sh = 1 \text{ cm}$ ,
- dla warstw podbudowy asfaltowej  $Sh$  przyjmuje wartość zależną od grubości nawierzchni według tabeli 3.

Tabela 3. Wartości współczynnika  $Sh$  dla podbudów asfaltowych w zależności od grubości nawierzchni, według [1], [2], [3]

Grubość nawierzchni asfaltowej	<10 cm	11 cm	12 cm	13 cm	14 cm	>15 cm
Wartość współczynnika $Sh$	1,0	1,3	1,6	1,9	2,2	2,5

### Współczynnik materiałowy – $k_c$

Współczynnik  $k_c$  służy do dostosowania wyników modelu obliczeniowego do zaobserwowanego rzeczywistego zachowania się mieszanek na drodze. W tabeli 4 przedstawiono współczynniki dla materiałów asfaltowych stosowanych we Francji. Parametry typowych mieszanek francuskich przedstawiono w tabeli 9.

Tabela 4. Współczynniki materiałowe  $k_c$  dla materiałów asfaltowych, według [1], [2], [3]

Materiał	Wartość współczynnika $k_c$
Beton asfaltowy o wysokim module sztywności, Enrobes a module eleve (EME)	1,0
Beton asfaltowy, Beton bitumeneux (BB)	1,1
Beton asfaltowy do podbudowy drogowej, Grave Bitume (GB)	1,3

### Współczynnik podłoża – $k_s$

Jest to współczynnik redukujący, uwzględniający efekt miejscowego obniżenia nośności warstwy podłoża położonej poniżej rozpatrywanej nawierzchni. Wartości współczynnika, w zależności od modułu podano w tabeli 5.

Tabela 5. Wartości współczynnika  $k_s$  w zależności od modułu podłoża, według [1], [2], [3]

Moduł warstwy podłoża poniżej rozpatrywanej nawierzchni	$E < 50 \text{ MPa}$	$50 \text{ MPa} < E < 120 \text{ MPa}$	$E > 120 \text{ MPa}$
Wartość współczynnika $k_s$	1/1,2 (0,833)	1/1,1 (0,909)	1

### Różnice pomiędzy kryteriami obecnie stosowanymi w Polsce a kryterium francuskim oraz ich przystosowanie do warunków polskich

Projektowanie konstrukcji według metody francuskiej znacząco odbiega od metod stosowanych przy opracowaniu obecnego polskiego katalogu [5]. Inne jest zarówno podejście do samych kryteriów, określania parametrów materiałowych, określania ruchu obciążającego drogę, jak i podejście do ryzyka zniszczeń konstrukcji na etapie projektowania. Aby móc zastosować metodę francuską w odniesieniu do polskich warunków należałoby przyjąć pewne założenia.

## Ruch

Podstawową różnicą występującą w opisie ruchu w Polsce i we Francji jest stosowanie innych osi standardowych. Osią standardową stosowaną we Francji jest oś 130 kN, natomiast w Polsce oś 100 kN. Kolejną znaczącą różnicą jest sposób obliczania ilości osi standardowych. W metodzie francuskiej zliczane są wszystkie pojazdy powyżej 3,5 tony, a następnie, aby otrzymać równoważną ilość osi standardowych, ich liczba jest przemnażana przez współczynnik agresywności CAM, zależny od obciążenia ruchem i typu nawierzchni. W podejściu polskim wyznacza się równoważną ilość osi standardowych mnożąc ilość pojazdów ciężarowych w trzech klasach przez odpowiednie współczynniki przeliczeniowe. Inny jest także okres obliczeniowy stosowany w projektowaniu. Podejście francuskie dopuszcza przyjęcie zarówno 30, jak i 20 lat eksploatacji drogi. Jest to zależne od rodzaju sieci drogowej. Dla sieci strukturalnej VRS (autostrady, drogi ekspresowe oraz ważniejsze drogi o znaczeniu krajowym) okres projektowy wynosi 30 lat. Dla sieci niestructuralnej VRNS (pozostałe drogi) okres projektowy wynosi 20 lat. Podejście polskie dopuszcza tylko okres 20 lat. Porównania kategorii ruchu w Polsce i we Francji dokonano dla Średniorocznego Ruchu Dobowego (SRD). Wyniki przedstawiono w tabeli 6.

Tabela 6. Porównanie kategorii ruchu według katalogów polskiego i francuskiego [1], [2], [3]

Kategoria ruchu (PL)	SRD – Średnioroczny Ruch Dobowy Ilość osi (L) 100kN na dobę według katalogu polskiego	Kategoria ruchu (FR)	SRD – Średnioroczny Ruch Dobowy Ilość osi (MJA) 130kN na dobę według katalogu francuskiego
KR 1	0 – 12	T5	0 – 25
KR 2	13 – 70	T4	25 – 50
KR 3	71 – 335	T3	50 – 150
KR 4	336 – 1000	T2	150 – 300
KR 5	1001 – 2000	T1	300 – 750
KR 6	2001 i więcej	T0	750 – 2000
		TS	2000 – 5000
		TEX	5000+

Poszczególne kategorie ruchu porównano ze sobą po sprowadzeniu ich do jednego rodzaju osi równoważnych. Zakresy polskich kategorii ruchu w pewnym stopniu pokrywały się z niższymi francuskimi kategoriami ruchu. Największe różnice zakresów wystąpiły dla najniższej kategorii ruchu oraz dla kategorii ruchu (T0, TS oraz TEX), które nie mają odpowiedników w Polsce. Parametry ryzyka dla ruchu polskiego przyjęto na podstawie francuskich kategorii ruchu, które były najbardziej zbliżone do polskich kategorii ruchu. Przyjęte wartości przedstawiono w tabeli 7.

Tabela 7. Przyjęta dla warunków polskich wartość ryzyka ( $r$ ) w zależności od kategorii ruchu

Kategoria ruchu (PL)	KR 1	KR 2	KR 3	KR 4	KR 5	KR 6
Ryzyko dla nawierzchni podatnych	25%	25%	25%	12%	5%	2%

## Charakterystyka mieszanek mineralno-asfaltowych

Drugą istotną różnicą między polską i francuską metodą wymiarowania nawierzchni jest opis stosowanych materiałów. W przypadku metody francuskiej każdy materiał asfaltowy opisany jest następującymi parametrami:

- E – moduł sprężystości Younga [MPa] (15°C oraz 10 Hz i temperaturze ekwiwalentnej ( $\theta$ ); dwupunktowe zginanie belki o kształcie trapezoidalnym w schemacie wspornikowym, w teście kontrolowanego odkształcenia),
- $\epsilon_6$  – odkształcenie [ $\mu$ strain], przy którym w konwencjonalnym teście zginania (dwupunktowe zginanie) następuje zniszczenie próbki testowej po  $10^6$  cyklach z 50% prawdopodobieństwem (przy 10°C i 25 Hz),
- 1/b – nachylenie krzywej zmęczenia danego materiału w układzie współrzędnych  $\log \epsilon - \log N$  (stała materiałowa – dla wszystkich typowych mieszanek mineralno-asfaltowych przyjmuje wartość 5),
- SN – odchylenie standardowe liczby cykli (w skali logarytmicznej) prowadzących do zniszczenia przez zmęczenie materiału. Wartość odchylenia standardowego SN przedstawiono w tabeli 8.

Tabela 8. Wartości odchylenia standardowego SN w zależności od materiału, według [1], [2], [3]

Materiał	Wartość odchylenia standardowego SN
Grave bitume klasy 1 (GB1) (Podbudowa asfaltowa klasy 1)	0,4
Grave bitume klasy 2 i 3 (GB2, GB3) (Podbudowa asfaltowa klasy 2 i 3)	0,3
Enrobes a module eleve klasy 1 (EME1) Beton asfaltowy o wysokim module sztywności klasy 1	0,3
Enrobes a module eleve klasy 2 (EME2) Beton asfaltowy o wysokim module sztywności klasy 2	0,25
Beton bitumineux (BB) Beton asfaltowy (warstwy wiążące, warstwy ściernic)	0,25

W obecnie obowiązujących przepisach – Wytycznych Technicznych WT2 – 2010 [6], w których usunięto część dotyczącą projektowania funkcjonalnego dla większości mieszanek, oprócz jednej mieszanki (AC-WMS) można odczytać parametry częściowo odpowiadające opisowi materiałów według metody francuskiej. Podane są tam wymagania dotyczące modułu sztywności E [MPa] oraz  $\epsilon_6$  [ $\mu$ strain] dla mieszanek mineralno-asfaltowych o wysokim module sztywności (AC – WMS). Są one jednak wyznaczane z innego schematu zginania niż w metodzie francuskiej i przy innych parametrach testu. W Polsce stosowane jest czteropunktowe zginanie przy 10 Hz i 10°C i wykonuje się test kontrolowanego odkształcenia. We Francji stosuje się zginanie wspornika – jest to tak zwane „zginanie dwupunktowe” i podobnie jak w Polsce test kontrolowanego odkształcenia. W przypadku mieszanek typu EME/AC – WMS parametry

modułu sztywności oraz  $\epsilon_6$  podane w polskich wytycznych WT2 oraz w literaturze francuskiej [1], [2], [3] pokrywają się. Fakt ten umożliwia przyjęcie parametrów mieszanek polskich do obliczeń według metody francuskiej. Wykorzystując poprzednie polskie przepisy (WT2 2008 [7]), uzyskujemy parametry dla każdego typu mieszanki. Alternatywnym rozwiązaniem jest stosowanie parametrów mieszanek francuskich o właściwościach najbardziej zbliżonych do rozpatrywanej mieszanki polskiej.

Parametry b oraz SN nie występują w żadnych polskich przepisach. Do dalszych obliczeń zostały przyjęte wartości z metody francuskiej z mieszanek mineralno-asfaltowych o parametrach zbliżonych do mieszanek polskich. W tabeli 9 przedstawiono zestawienie parametrów mieszanek mineralno-asfaltowych.

Tabela 9. Parametry materiałowe wybranych mieszanek mineralno-asfaltowych

Mieszanka (opis polski oraz odpowiadająca mieszanka francuska)	Parametry według metody francuskiej [2],[3] E (10Hz, 15°C) $\epsilon_6$ (25Hz, 10°C)	Parametry według przepisów polskich (10Hz, 10°C) (wg WT 2 2008 [7] i WT 2 2010 [6])
Podbudowa Asfaltowa Grave Bitume klasy 1–3	E = 7000–9000 [MPa] $\epsilon_6$ = 70–90 [ $\mu$ strain] -1/b = 5 SN = 0,3–0,4	$E_{min}$ = 11000 [MPa] $\epsilon_6$ = 115 [ $\mu$ strain]
Warstwa wiążąca/wyrównawcza BBSG/BBME/BBM etc	E = 5000–12000 [MPa] $\epsilon_6$ = 100–110 [ $\mu$ strain] -1/b = 5 SN = 0,25	$E_{min}$ = 9000–11000 [MPa] $\epsilon_6$ = 115 [ $\mu$ strain]
Warstwy ściernic BBTM/BBDr/BBMa	Brak wymagań	Brak wymagań
AC-WMS EME1/EME2	E = 14000 [MPa] $\epsilon_6$ = 100–130 [ $\mu$ strain] -1/b = 5 SN = 0,25–0,3	$E_{min}$ = 14000–16000 [MPa] $\epsilon_6$ = 130 [ $\mu$ strain]

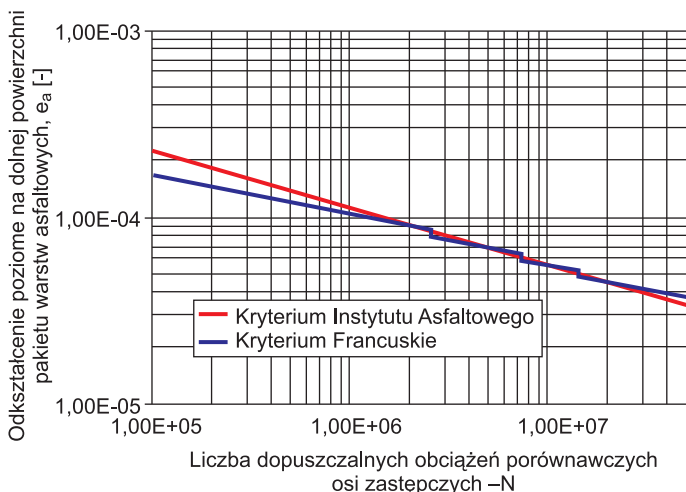
## Porównanie kryterium Instytutu Asfaltowego oraz kryterium francuskiego

Kryterium Instytutu Asfaltowego [8], [9] było stosowane w Polsce do opracowania obecnego katalogu [3]. Na rysunku 3 przedstawiono porównanie wyników otrzymanych z kryterium francuskiego oraz z kryterium Instytutu Asfaltowego dla identycznych parametrów francuskiej mieszanki mineralno-asfaltowej przedstawionej w tabeli 10.

Na przedstawionym wykresie, kryterium francuskie oraz kryterium Instytutu Asfaltowego dają zbliżone wartości trwałości zmęczeniowych w zakresie odkształceń od  $\epsilon = 4,5 \cdot 10^{-5}$  do  $\epsilon = 1,0 \cdot 10^{-4}$ . W przypadku odkształceń  $\epsilon < 4,5 \cdot 10^{-5}$  kryterium francuskie daje nieznacznie większe trwałości nawierzchni, natomiast w przypadku odkształceń  $\epsilon > 1,0 \cdot 10^{-4}$ , daje mniejsze trwałości przy zastosowaniu tej samej mieszanki mineralno-asfaltowej. Skoki wykresu dla kryterium francuskiego wynikają z przyjęcia odpowiednich, zmiennych wartości ryzyka dla zadanych kategorii ruchu.

Tabela 10. Parametry materiałowe betonu asfaltowego do podbudowy drogowej klasy 3 (GB3)

Właściwość	Wartość
Moduł sztywności w temperaturze 10°C, E (10°C)	12 300 MPa
Moduł sztywności w temperaturze ekwiwalentnej, E ( $\varepsilon=12^\circ\text{C}$ )	11000 MPa
Odształcenie przy 10 <sup>6</sup> cyklach obciążeń, $\varepsilon_6$	90 $\mu\text{strain}$
Nachylenie krzywej zmęczenia materiału, -1/b	5
Odchylenie standardowe, SN	0,3
Współczynnik podłoża, $k_s$	0,909
Współczynnik materiału, $k_c$	1,3
Współczynnik ryzyka, $k_r$	przyjmowany w zależności od ruchu wg tabeli 1
Zawartość wolnych przestrzeni w mieszance mineralno-asfaltowej, $V_v$	9%
Zawartość asfaltu w mieszance mineralno-asfaltowej, $V_b$	4,5% (m/m)



Rys. 3. Porównanie kryteriów zmęzeniowych dla warstwy podbudowy z betonu asfaltowego

### Kryterium deformacji strukturalnych (kryterium odkształceń podłoża gruntowego) [1], [2], [3]

Kryterium to ma ogólną postać identyczną jak kryteria Instytutu Asfaltowego [8], [9] i niektórych innych instytucji badawczych. Ogólną postać kryterium przedstawia poniższy wzór.

$$\varepsilon_p = k \cdot \left(\frac{1}{N}\right)^m \quad (9)$$

gdzie:

- $\varepsilon_p$  – pionowe odkształcenia ściskające wywołane na górnej powierzchni podłoża gruntowego,
- $N$  – liczba dopuszczalnych obciążeń osi standardowych,
- $k, m$  – współczynniki empiryczne.

W metodzie francuskiej współczynnik  $m$  przyjmuje wartość  $m = 0,222$ . Natomiast wartość współczynnika  $k$  jest wyznaczana w zależności od obciążenia drogi ruchem. W przypadku ruchu lekkiego (T5 i T4) jego wartość wynosi  $k = 0,016$ . Dla ruchu średniego i ciężkiego (od T3 do TEX) przyjmuje wartość  $k = 0,012$ .

Przekształcona postać wzorów jest następująca:

$$\text{Dla T5 i T4:} \quad NE = \left(\frac{\varepsilon_p}{0,016}\right)^{\left(-\frac{1}{0,222}\right)} \quad (10)$$

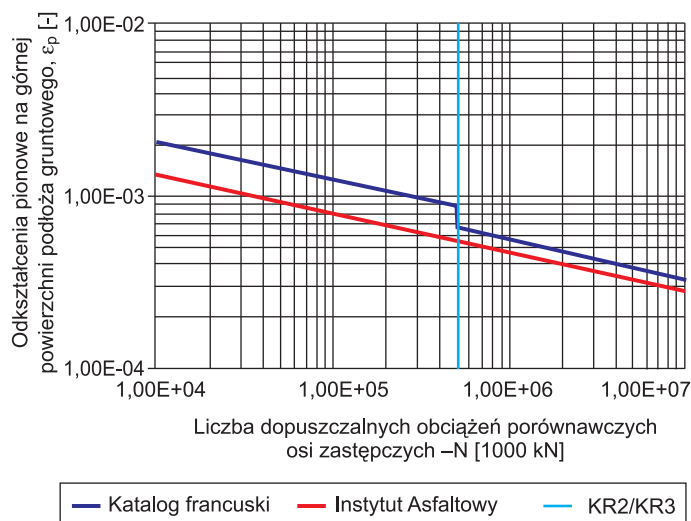
$$\text{Dla T3 – TEX} \quad NE = \left(\frac{\varepsilon_p}{0,012}\right)^{\left(-\frac{1}{0,222}\right)} \quad (11)$$

gdzie: NE – liczba osi standardowych o ciężarze 130 kN.

Zastosowanie francuskich współczynników empirycznych powoduje uzyskanie większych trwałości zmęzeniowych dla deformacji strukturalnych, niż ze stosowanego dotychczas kryterium Instytutu Asfaltowego.

Wyniki przedstawiono na rysunku 4.

W przypadku niskich kategorii ruchu, różnice w trwałości są na poziomie nawet jednego rzędu wielkości.



Rys. 4. Porównanie trwałości zmęzeniowej dla kolein strukturalnych uzyskiwanych z kryteriów zmęzeniowych dla deformacji strukturalnych wg metody francuskiej i Instytutu Asfaltowego

### Przykład obliczeń:

Sprawdzić czy podana niżej nawierzchnia spełni wymagania dla polskiego ruchu KR4. Zastosować metodę francuską.

Proponowana nawierzchnia:

- warstwa ścieralna: SMA 4 cm,
- podbudowa asfaltowa: beton asfaltowy o wysokim module sztywności typu EME2, grubość szukana,
- wzmocnione podłożo: wtórny moduł odkształcenia  $E_2 = 120$  MPa.

Dane o ruchu:

- kategoria ruchu KR4,
- wymagana ilość osi standardowych 100 kN w okresie obliczeniowym 20 lat,  $N_{100} = 7,3$  mln,

- koło pojedyncze o ciężarze 50 kN,
- ciśnienie kontaktowe 650 kPa.

**Rozwiązanie:**

Przyjęte parametry materiałowe

Tabela 11. Przyjęte parametry materiałowe dla mieszanek mineralno-asfaltowych

Materiał	E (10°C,10Hz) [MPa]	E (θ <sub>eq</sub> ,10Hz) [MPa]	ε <sub>6</sub> (10°C,25Hz)	b	SN	v
SMA	–	8 000	–	–	–	0,3
EME2	14 000	12 500	130	-0,2	0,25	0,3

- Podbudowa z kruszywa łamanego stabilizowanego mechanicznie, E = 400 MPa, v = 0,3
- Wzmocnione podłoże gruntowe, E = 120 MPa, v = 0,35

**Założone współczynniki:**

Współczynnik materiału  $k_c = 1,0$  (EME2)  
 Współczynnik podłoża  $k_s = 1,0$  (120 MPa)  
 Współczynnik ryzyka:

Sh = 2,5 cm (założono wstępnie, że h<sub>bit</sub> ≥ 15 cm -> Sh = 2,5 cm)  
 c = 0,02  
 r = 12 %  
 u = -1,175

$$\delta = \left[ SN^2 + \left( \frac{c^2}{b^2} \right) \cdot Sh^2 \right]^{0,5}$$

Odchylenie standardowe  $\delta = 0,354$

$$k_r = 10^{-u\delta b}$$

Współczynnik ryzyka  $k_r = 0,826$

**Wyniki obliczeń:**

Tabela 12. Odształcenia powstające w konstrukcji nawierzchni pod obciążeniem kołem 50 kN obliczone z programu BISAR

Konstrukcja	Odształcenia rozciągające na spodzie warstw asfaltowych, ε <sub>t</sub> [μstrain]	Odształcenia ściskające powierzchni wzmoczonego podłoża, ε <sub>z</sub> [μstrain]
4 cm SMA / 14 cm EME2 / 20 cm KŁSM	79,21	261,1
4 cm SMA / 15 cm EME2 / 20 cm KŁSM	73,94	241,0

Odształcenia dopuszczalne według metody francuskiej obliczono z poniższych wzorów:

$$\epsilon_{t,ad} = \epsilon_6(10^\circ C, 25 Hz) \cdot \left[ \frac{E(10^\circ C)}{E(\theta_{eq})} \right]^{0,5} \cdot \left( \frac{N}{10^6} \right)^b \cdot k_r \cdot k_c \cdot k_s$$

$$\epsilon_{z,ad} = 0,012 \cdot (N)^{-0,222}$$

gdzie:

ε<sub>t,ad</sub> – dopuszczalne odkształcenie rozciągające dla warstwy podbudowy EME2,

ε<sub>z,ad</sub> – dopuszczalne odkształcenie ściskające we wzmocnionym podłożu,

N – liczba osi dopuszczalnych, o ciężarze 100 kN.

Ze wzorów otrzymano:

- Dopuszczalne odkształcenia rozciągające na spodzie podbudowy EME2:

$$\epsilon_{t,ad} = 76,36 \mu\text{strain}$$

- Dopuszczalne odkształcenia ściskające podłoża gruntowego:

$$\epsilon_{z,ad} = 359,3 \mu\text{strain}$$

**Wyniki obliczeń:**

Konstrukcja:

- SMA – 4 cm,
- EME2 – 15 cm,
- KŁSM – 20 cm.

Spełnione wymagania projektowe.

$$\epsilon_t = 73,94 \mu\text{strain} < \epsilon_{t,ad} = 76,36 \mu\text{strain}$$

$$\epsilon_z = 241,0 \mu\text{strain} < \epsilon_{z,ad} = 359,3 \mu\text{strain}$$

Uwagi do przykładu:

Założono polskie wymagania na moduł sztywności EME2 równy E = 14 000 MPa w 10°C według WT2.

## Podsumowanie

Przedstawione kryteria zmęczeniowe są wynikiem trzydziestoletnich doświadczeń inżynierów francuskich w zakresie projektowania konstrukcji nawierzchni. Przyjęte przez nich założenia dotyczące zarówno ryzyka zniszczenia nawierzchni, jak i opisu materiałów, różnią się od obecnie wykorzystywanych w Polsce. Wstępne obliczenia, przy zastosowaniu przedstawionej metody francuskiej i przyjęciu odpowiednich założeń, dają wyniki różniące się w pewnym stopniu od wyników otrzymywanych z obecnie stosowanych w Polsce kryteriów zmęczeniowych Instytutu Asfaltowego. Przy odpowiednio przyjętych założeniach materiałowych francuskie kryteria zmęczeniowe mogą stanowić dobre narzędzie do projektowania konstrukcji nawierzchni.

## Bibliografia

- [1] *Catalogue des Structures Types de Chaussées Neuves*, Edition 1998, SETRA, LCPC
- [2] *Conception et Dimensionnement des Structures de Chaussées*, Guide Technique, LCPC, Setra, Décembre 1994
- [3] *French Design Manual for Pavement Structures*, Guide technique, Ministère de l'Équipement, des Transports et du Tourisme, LCPC, SETRA, May 1997
- [4] *Guide for Mechanistic-Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures*, Final Report, Part 3 – Design and Analysis, NCHRP, TRB, NRC, March 2004
- [5] *Katalog typowych konstrukcji nawierzchni podatnych i półsztywnych*, IBDiM, GDDKiA, Warszawa 1997
- [6] *Nawierzchnie asfaltowe na drogach krajowych – WT-2 2010 Mieszanki mineralno-asfaltowe – Wymagania techniczne*, Warszawa 2010
- [7] *Nawierzchnie asfaltowe na drogach publicznych – WT2 Nawierzchnie asfaltowe – 2008*, Warszawa 2008
- [8] *Research and Development of the Asphalt Institute's Thickness Design Manual (MS-1)*, Ninth edition, The Asphalt Institute, Research Report No. 82-2, RR-82-2, August 1982
- [9] *Thickness Design – Asphalt Pavements for Highways & Streets, Manual Series No. 1 (MS-1)*, Asphalt Institute, 1981 (Revised 2008) ■