

# RAPORT

## Z OBLICZEŃ TRWAŁOŚCI ZMĘCZENIOWEJ KONSTRUKCJI NAWIERZCHNI METODĄ MECHANISTCZNO-EMPIRYCZNĄ

Autor Adam Pokrzywiec

Projekt

Data 28.08.2022

Zamawiający

Pracownia projektowa Grupa Inżynieryjna PROTECH Construction Jacek Malmur

**MWS**  
MODEL WARSTW SKOŃCZONYCH

**Pavement Design** <sup>TM</sup>

wersja 2.0.

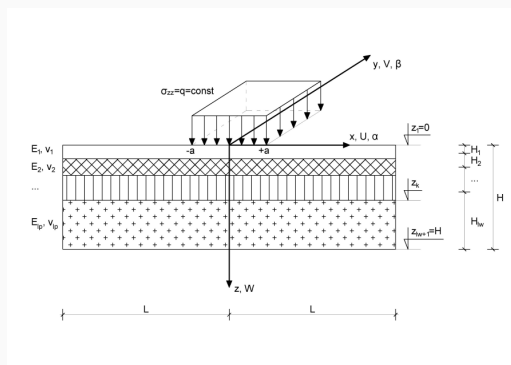
## OPIS METODY OBLICZANIA STANU NAPRĘŻEŃ, ODKSZTAŁCEŃ I PRZEMIESZCZEŃ

W obliczeniach współpracy nawierzchni drogowej z podbudową i niżej występującym gruntem rodzimym zastosowano model warstw sprężystych, obciążonych statycznie pojazdem na stopie najwyższej warstwy. Ocena pracy i wytrzymałości podłoża przeprowadzono z użyciem wyliczonych przemieszczeń, odkształceń i naprężeń we wnętrzu oraz na stykach warstw. Ponieważ dla ośrodków ciągłych, uwarstwionych poziomo, złożonych z kilku jednorodnych, izotropowych warstw sprężystych, nie istnieją ściśle rozwiązania teorii sprężystości (dla istotnych obciążeń powierzchni ośrodka), użyta została metoda przybliżona.

Zastosowana metoda warstw skończonych należy do grupy przybliżonych metod analitycznych, cechując się ścisłym rozwiązaniem zagadnienia w każdym punkcie wewnątrz ośrodka uwarstwowionego oraz przybliżonym odwzorowaniem obciążenia brzegu ośrodka (nawierzchni). Błąd przybliżenia w obliczeniach uznawany jest za nieistotnie mały, co możliwe jest poprzez wykorzystanie odpowiednio dużej liczby wyrazów rozwinięcia w szereg. Istota metody polega na dokładnym rozwiązywaniu zagadnienia dla obciążeń brzegu przyjętych jako okresowa funkcja trygonometryczna (jej ściśle rozwiązania istnieją w postaci zamkniętej), a następnie na złożeniu od kilkudziesięciu do kilkuset takich rozwiązań.

Podstawą metody jest twierdzenie Fouriera o rozwijaniu funkcji w szereg trygonometryczny: ponieważ przybliżeniem rzeczywistego obciążenia nawierzchni jest szereg funkcji trygonometrycznych to stosując zasadę superpozycji, przybliżeniem rozwiązania jest suma tych szczególnych rozwiązań dla obciążenia o kształcie okresowych funkcji trygonometrycznych.

W przeprowadzonych obliczeniach nawierzchnia jest obciążona siłą pionową, równomiernie rozłożoną na obszarze prostokątnym. Na granicach warstw występuje pełne ich zespolenie (ciągłość przemieszczeń), a na spodzie najniższej warstwy nie występuje osiadanie. Parametrami są (w każdej warstwie): grubość  $H_k$ , moduł Younga / sztywności  $E$  oraz współczynnik Poissona  $\nu_k$ . Obliczane są przemieszczenia, naprężenia i odkształcenia na granicach warstw, przy czym niektóre z naprężeń i odkształceń są różne nad granicą i pod granicą warstw (nieciągłość).



## II METODA OBLICZANIA TRWAŁOŚCI ZMĘCZENIOWEJ

Stan naprężeń i odkształceń w konstrukcji nawierzchni określono metodami analitycznymi z wykorzystaniem modelu warstw skończonych.

Trwałość zmęczeniową projektowanej konstrukcji nawierzchni określono stosując:

- kryterium spękań zmęczeniowych – wg AASHTO 2004,
- kryterium deformacji strukturalnych – wg Instytutu Asfaltowego.

Dla nawierzchni półsztywnych zastosowano kryterium spękań warstw związanych spoiwem hydraulicznym (kryterium Dempsey'a) oraz hipotezę Minera dla określenia szkody zmęczeniowej.

## 1 KRYTERIUM SPĘKAŃ ZMĘCZENIOWYCH

Trwałość zmęczeniowa dla kryterium spękań warstw asfaltowych obliczana wg AASHTO 2004:

$$N = D_{FC} \cdot 7,3557 \cdot (10^{-6}) \cdot C \cdot k'_1 \cdot \left(\frac{1}{\epsilon_t}\right)^{3,9492} \cdot \left(\frac{1}{E}\right)^{1,281}$$

$N$  - liczba powtarzalnych obciążeń do wystąpienia spękań zmęczeniowych, na FC procentach całkowitej powierzchni pasa ruchu [osi/pas/okres obliczeniowy]

$E$  - moduł sztywności najniższej warstwy asfaltowej [MPa]

$D_{FC}$  - szkoda zmęczeniowa wyrażona jako ułamek dziesiętny, odpowiadająca założonej ilości spękań zmęczeniowych FC oraz grubości warstw asfaltowych  $h_{ac}$

$$D_{FC} = \frac{1}{100} \cdot 10^{\ln(100 - 1) \cdot \frac{1}{C_2} + 2}$$

$FC$  - założona ilość spękań zmęczeniowych [%]

$C_2$  - współczynnik zależny od grubości warstw asfaltowych

$$C_2 = -2,40874 - 39,748 \cdot \left(1 + \frac{h_{ac}}{2,54}\right)^{-2,856}$$

$h_{ac}$  - grubość wszystkich warstw z mieszanek mineralno-asfaltowych [cm]

$k'_1$  - parametr określony w procesie kalibracji, zależny od grubości warstw asfaltowych

$$k'_1 = \frac{1}{0,000398 + \frac{0,003602}{1 + e^{(11,02 - 1,374 \cdot h_{ac})}}}$$

$\epsilon_t$  - odkształcenia rozciągające poziome w osi obciążenia na dolnej powierzchni najniższej warstwy asfaltowej [m/m]

$C$  - współczynnik zależny od właściwości objętościowych mieszanki mineralno-asfaltowej

$$C = 10^M \quad M = 4,84 \cdot \left(\frac{V_b}{V_a + V_b} - 0,69\right)$$

$V_b$  - zawartość objętościowa asfaltu [v/v %]

$V_a$  - zawartość objętościowa wolnej przestrzeni [v/v %]

## 2 KRYTERIUM DEFORMACJI STRUKTURALNYCH

Zależność pomiędzy dopuszczalną liczbą powtarzalnych obciążeń  $N$  do powstania krytycznej deformacji strukturalnej, a odkształceniem pionowym na poziomie podłoża gruntowego  $\varepsilon_p$ :

$$\varepsilon_p = k \cdot (1/N_s)^m$$

Wzór kryterium deformacji strukturalnych rozpatrywanej konstrukcji nawierzchni po przekształceniu:

$$N_s = \frac{1}{\sqrt[m]{\frac{\varepsilon_p}{k}}}$$

$N$  - liczba dopuszczalnych obciążeń do wystąpienia krytycznej deformacji strukturalnej w konstrukcji nawierzchni

$k, m$  - współczynniki doświadczalne:

$$k = 1,05 \cdot 10^{-2}$$

$$m = 0,223$$

$\varepsilon_p$  - wartość pionowego odkształcenia na powierzchni podłoża gruntowego w osi obciążenia

## 3 KRYTERIUM SPĘKAŃ PODBUDOWY ZWIĄZANEJ SPOIWM HYDRAULICZNYM (KONSTRUKCJE PÓLSZTYWNE)

Obliczenia trwałości zmęczeniowej konstrukcji półsztywnej przeprowadzono stosując hipotezę Minera dla sumowania się szkód zmęczeniowych w każdej fazie pracy konstrukcji:

$$N = N_I + N_{II} \cdot \left(1 - \frac{N_I}{N_{Ia}}\right)$$

$N_{Ia}$  - trwałość zmęczeniowa przy założeniu, że podbudowa zasadnicza związana spoiwem hydraulicznym pracuje w Fazie I (brak spękań)

$N_{II}$  - trwałość zmęczeniowa przy założeniu, że podbudowa zasadnicza związana spoiwem hydraulicznym pracuje w Fazie II (spękana w formie małych bloków)

$N_I$  - liczba powtarzalnych obciążeń do wystąpienia spękań zmęczeniowych w warstwie stabilizowanej spoiwem hydraulicznym wg kryterium Dempsey'a:

$$N_I = 10^{11,782 - 12,1212 \left( \frac{\sigma_t}{R_{zg}} \right)}$$

$\sigma_t$  - maksymalne naprężenia poziome wywołane na spodzie warstwy podbudowy stabilizowanej spoiwami hydraulicznymi [MPa]

$R_{zg}$  - wytrzymałość na zginanie warstwy związanej spoiwem hydraulicznym [MPa]

## III ZAŁOŻENIA DO OBLICZEŃ

## 1 OBCIĄŻENIE RUCHEM

Kategoria Ruchu:

KR2

Liczba dopuszczalnych osi obliczeniowych dla kategorii ruchu:

0,09-0,5 mln osi

Okres obliczeniowy:

20lat

## 2 PARAMETRY OBCIĄŻENIA

Siła:

50,0 kN

Ciśnienie kontaktowe:

0,85 MPa

Pole powierzchni obciążenia:

0,0589 m<sup>2</sup> (0,2426 m x 0,2426 m)

Oś obciążenia w punkcie:

X=0, Y=0

## 3 WSPÓŁCZYNNIK FC

Ilość spękań zmęczeniowych w stosunku do powierzchni pasa ruchu:

10 %

## IV WYNIKI

## 1 WYNIKI - KONSTRUKCJA 1

## KONSTRUKCJA

Warstwa	Moduł E [MPa]	Współczynnik Possiona v	Grubość H [m]	Zawartość asfaltu [%]	Zawartość wolnych przestrzeni [%]
Warstwa ścieralna z betonu asfaltowego (AC) KR3-KR4 konstrukcja podatna +13°C	9 300,00	0,30	0,04	14,20	3,00
Warstwa wiążąca z betonu asfaltowego (AC) KR3-KR7 konstrukcja podatna +13°C	10 300,00	0,30	0,04	11,50	6,00
Warstwa podbudowy zasadniczej z mieszanki niezwiązanej z kruszywem C90/3	400,00	0,30	0,20		
Warstwa mrozoochronna z gruntu stabilizowanego spoiwem hydraulicznym C1,5/2	200,00	0,30	0,20		
Warstwa podłoża gruntowego G4	25,00	0,35	podłoże gruntowe		

## PRZEMIESZCZENIE

Warstwa		W [m]	V [m]	U [m]
Warstwa ścieralna z betonu asfaltowego (AC) KR3-KR4 konstrukcja podatna +13°C	strop	0,0007515	0,0000000	0,0000000
	spąg	0,0007536	0,0000000	0,0000000
Warstwa wiążąca z betonu asfaltowego (AC) KR3-KR7 konstrukcja podatna +13°C	strop	0,0007536	0,0000000	0,0000000
	spąg	0,0007492	0,0000000	0,0000000
Warstwa podbudowy zasadniczej z mieszanki niezwiązanej z kruszywem C90/3	strop	0,0007492	0,0000000	0,0000000
	spąg	0,0006484	0,0000000	0,0000000
Warstwa mrozoochronna z gruntu stabilizowanego spoiwem hydraulicznym C1,5/2	strop	0,0006484	0,0000000	0,0000000
	spąg	0,0005756	0,0000000	0,0000000
Warstwa podłoża gruntowego G4	strop	0,0005756	0,0000000	0,0000000
	spąg	0,0000000	0,0000000	0,0000000

## NAPRĘŻENIE

Warstwa		SIZZ [MPa]	SIZY [MPa]	SIZX [MPa]	SIYY [MPa]	SIYX [MPa]	SIXX [MPa]
Warstwa ścieralna z betonu asfaltowego (AC) KR3-KR4 konstrukcja podatna +13°C	strop	-0,8515982	0,0000000	0,0000000	-3,7309244	0,0000000	-3,7309244
	spąg	-0,6070656	0,0000000	0,0000000	-0,5469156	0,0000000	-0,5469156
Warstwa wiążąca z betonu asfaltowego (AC) KR3-KR7 konstrukcja podatna +13°C	strop	-0,6070656	0,0000000	0,0000000	-0,5777484	0,0000000	-0,5777484
	spąg	-0,3176593	0,0000000	0,0000000	2,9264983	0,0000000	2,9264983
Warstwa podbudowy zasadniczej z mieszanki niezwiązanej z kruszywem C90/3	strop	-0,3176593	0,0000000	0,0000000	-0,0172023	0,0000000	-0,0172023
	spąg	-0,0739018	0,0000000	0,0000000	0,1145681	0,0000000	0,1145681
Warstwa mrozoochronna z gruntu stabilizowanego spoiwem hydraulicznym C1,5/2	strop	-0,0739018	0,0000000	0,0000000	0,0414480	0,0000000	0,0414480
	spąg	-0,0189080	0,0000000	0,0000000	0,0819109	0,0000000	0,0819109
Warstwa podłoża gruntowego G4	strop	-0,0189080	0,0000000	0,0000000	0,0019361	0,0000000	0,0019361
	spąg	-0,0025440	0,0000000	0,0000000	-0,0013698	0,0000000	-0,0013698

## ODKSZTAŁCENIE

Warstwa		EPSIZZ [m/m]	EPSIZY [m/m]	EPSIZX [m/m]	EPSIYY [m/m]	EPSIYX [m/m]	EPSIXX [m/m]
Warstwa ścieralna z betonu asfaltowego (AC) KR3-KR4 konstrukcja podatna +13°C	strop	0,0001491	0,0000000	0,0000000	-0,0002534	0,0000000	-0,0002534
	spąg	-0,0000300	0,0000000	0,0000000	-0,0000216	0,0000000	-0,0000216
Warstwa wiążąca z betonu asfaltowego (AC) KR3-KR7 konstrukcja podatna +13°C	strop	-0,0000253	0,0000000	0,0000000	-0,0000216	0,0000000	-0,0000216
	spąg	-0,0002013	0,0000000	0,0000000	0,0002081	0,0000000	0,0002081
Warstwa podbudowy zasadniczej z mieszanki niezwiązanej z kruszywem C90/3	strop	-0,0007683	0,0000000	0,0000000	0,0002081	0,0000000	0,0002081
	spąg	-0,0003566	0,0000000	0,0000000	0,0002559	0,0000000	0,0002559
Warstwa mrozoochronna z gruntu stabilizowanego spoiwem hydraulicznym C1,5/2	strop	-0,0004939	0,0000000	0,0000000	0,0002559	0,0000000	0,0002559
	spąg	-0,0003403	0,0000000	0,0000000	0,0003151	0,0000000	0,0003151
Warstwa podłoża gruntowego G4	strop	-0,0008105	0,0000000	0,0000000	0,0003151	0,0000000	0,0003151
	spąg	-0,0000634	0,0000000	0,0000000	0,0000000	0,0000000	0,0000000

## V — TRWAŁOŚĆ ZMĘCZENIOWA KONSTRUKCJI

## 1 — KONSTRUKCJA 1

Kryterium spękań zmęczeniowych

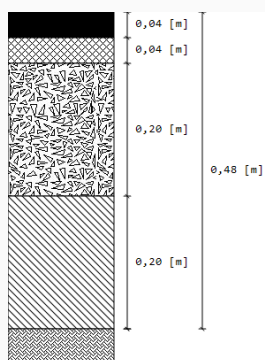
N = 1 144 871 osi 100kN/pas/20lat

Kryterium deformacji strukturalnych

N<sub>s</sub> = 97 371 osi 100kN/pas/20lat

## VI — PODSUMOWANIE

Wymagana trwałość dla zakładanej kategorii ruchu KR2:  
**0.09-0.5 mln osi 100kN/pas/20lat**

**Układ warstw konstrukcyjnych:**

- Warstwa ścieralna z betonu asfaltowego (AC) KR3-KR4 konstrukcja podatna +13°C
- Warstwa wiążąca z betonu asfaltowego (AC) KR3-KR7 konstrukcja podatna +13°C
- Warstwa podbudowy zasadniczej z mieszanki niezwiązanej z kruszywem C90/3
- Warstwa mrozoochronna z gruntu stabilizowanego spoiwem hydraulicznym C1,5/2
- Warstwa podłoża gruntowego G4

Trwałość zmęczeniowa Konstrukcji:

**97 371 osi 100kN/pas/20lat****SPEŁNIA wymagania dla KR2**