POLITECHNIKA RZESZOWSKA im. IGNACEGO ŁUKASIEWICZA

WYDZIAŁ BUDOWNICTWA, INŻYNIERII ŚRODOWISKA I ARCHITEKTURY POLITECHNIKI RZESZOWSKIEJ

Nawierzchnie betonowe w tunelach

Prof. dr hab. inż. Tomasz SIWOWSKI, PRz

Prof. dr hab. inż. Antoni SZYDŁO, PWr

Dr inż. Mateusz RAJCHEL, PRz

KATEDRA DRÓG I MOSTÓW
WYDZIAŁ BUDOWNICTWA, INŻYNIERII ŚRODOWISKA I ARCHITEKTURY
POLITECHNIKA RZESZOWSKA im. IGNACEGO ŁUKASIEWICZA

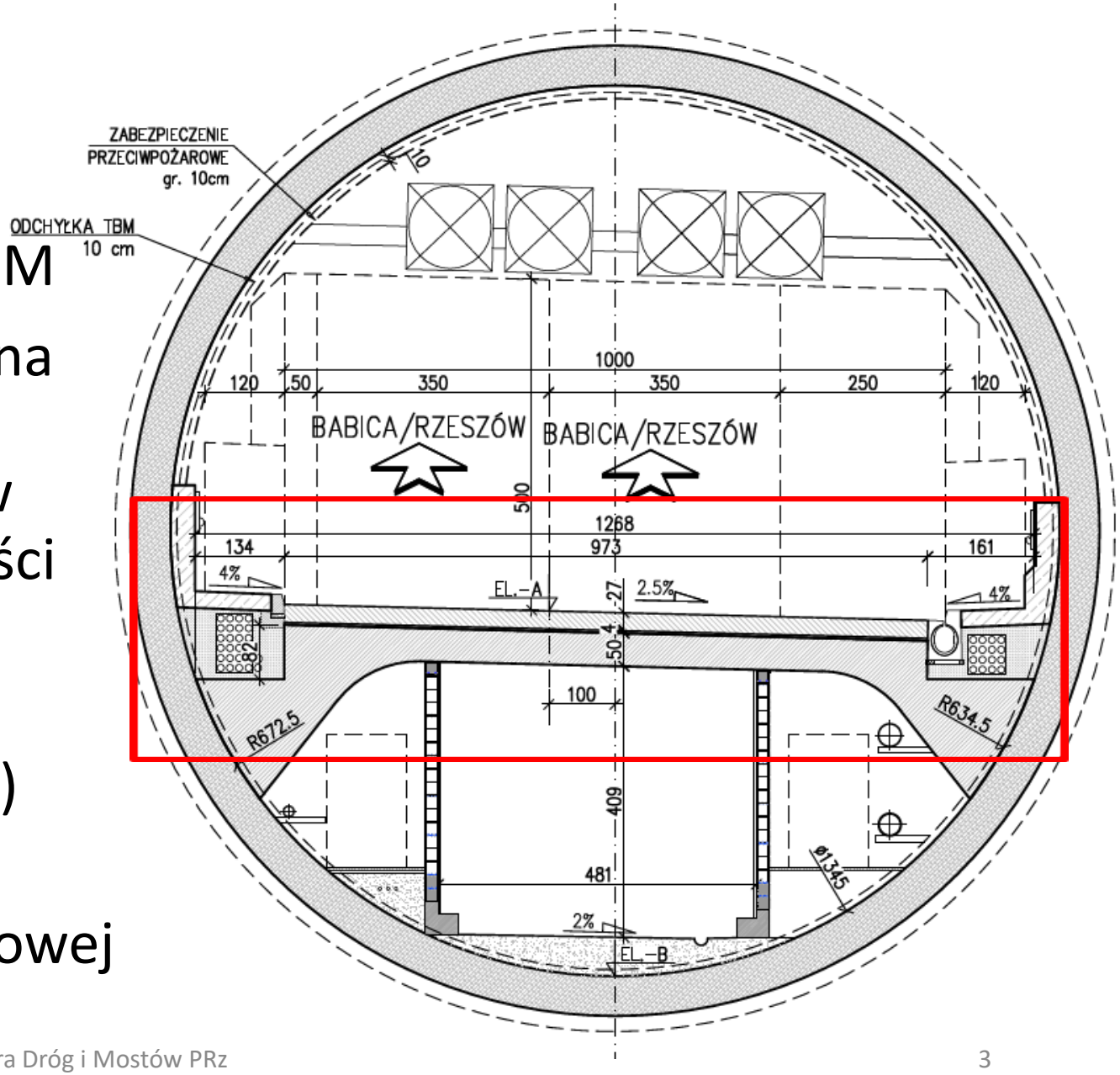
Problematyka nawierzchni betonowych w tunelach

- Wymagania GDDKiA – nawierzchnie betonowe w tunelach (trwałość, odporność ppoż. itp.)
- Katalog Typowych Konstrukcji Nawierzchni Sztywnych (KTKNS) nie zawsze może i/lub powinien być stosowany (np. w przypadku płyt podjezdniowych w tunelach TBM)
- Nawierzchnie betonowe na płytach żelbetowych (pomostowych, podjezdniowych) nie były dotychczas stosowane w Polsce (pilotaż: 5 obiektów mostowych na S-7)
- Brak zasad projektowania nawierzchni betonowych na płytach żelbetowych
- Brak sprawdzonych rozwiązań typowych nawierzchni betonowych na płytach żelbetowych

POLITECHNIKA RZESZOWSKA im. IGNACEGO ŁUKASIEWICZA
KATEDRA DRÓG I MOSTÓW
WYDZIAŁ BUDOWNICTWA, INŻYNIERII ŚRODOWISKA I ARCHITEKTURY

Konstrukcja tunelu

- Metoda wykonania tunelu – TBM
- System wentylacji – mechaniczna półpoprzeczna z otworami doprowadzającymi powietrze w dolnej części tunelu na wysokości kół pojazdów
- Średnica wewnętrzna tunelu: 13,45 m (szerokość jezdni 10 m)
- <u>Wniosek:</u> konieczność ukształtowania płyty podjezdniowej



POLITECHNIKA RZESZOWSKA im. IGNACEGO ŁUKASIEWICZA
KATEDRA DRÓG I MOSTÓW
WYDZIAŁ BUDOWNICTWA, INŻYNIERII ŚRODOWISKA I ARCHITEKTURY

Zalecenia PF-U dot. nawierzchni betonowej

Konstrukcje nawierzchni sztywnych trasy głównej w tunelu T-1 należy wykonać zgodnie z poniższym rozwiązaniem, zgodnym z Tablicą 9.4. KTKNS dla górnych warstw konstrukcyjnych:

1) warstwa nawierzchniowa z betonu cementowego, dyblowana i kotwiona o grubości 27 cm, (w przypadku wykończenia górnej warstwy nawierzchni w technologii NGCS o grubości 28 cm)

2) warstwa poślizgowa: geowłóknina ,

3) warstwa podbudowy zasadniczej z mieszanki związanej spoiwem hydraulicznym o grubości 18 cm,

oraz zgodnym z KTKNSZ dla dolnych warstw konstrukcyjnych.

Dolne warstwy konstrukcji należy zaprojektować zgodnie z KTKNSZ w zależności od grupy nośności podłoża i kategorii ruchu.

POLITECHNIKA RZESZOWSKA im. IGNACEGO ŁUKASIEWICZA
KATEDRA DRÓG I MOSTÓW
WYDZIAŁ BUDOWNICTWA, INŻYNIERII ŚRODOWISKA I ARCHITEKTURY

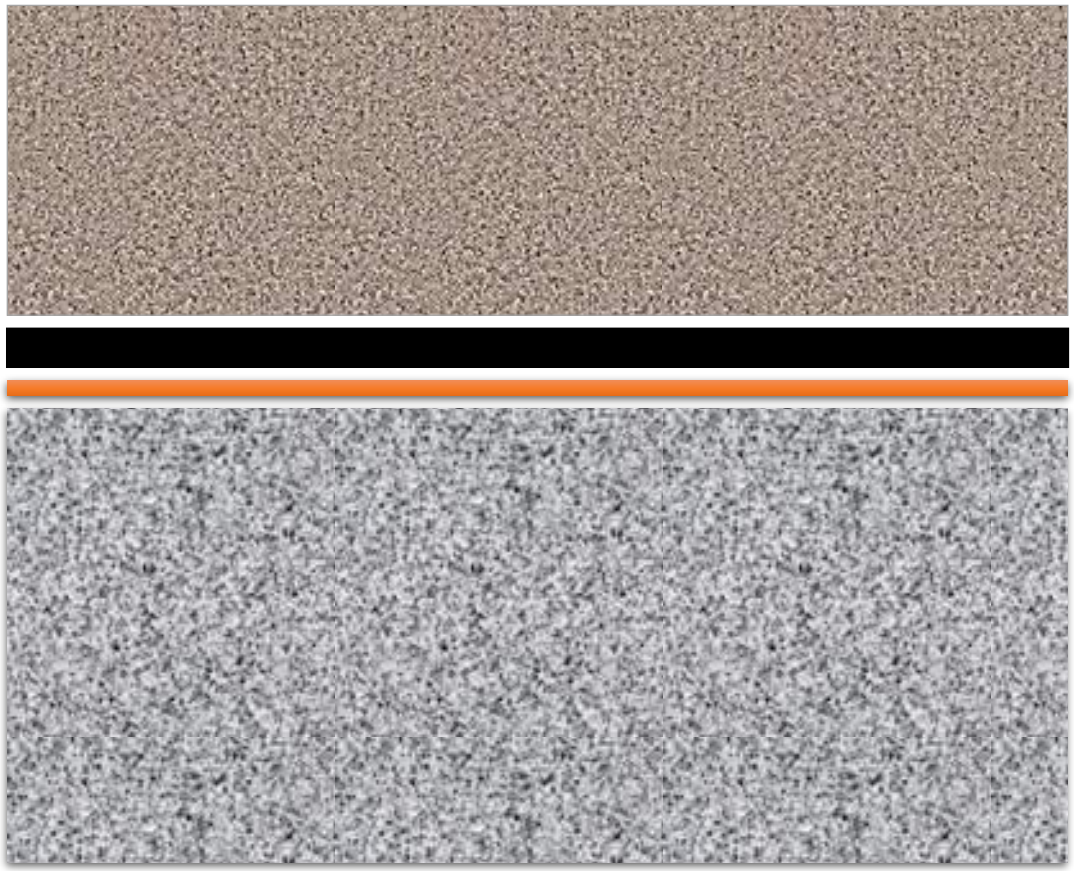
Projekt konstrukcji nawierzchni (1)

I. **Warstwa nawierzchniowa**: beton cementowy, dyblowany i kotwiony, grubość 27 cm.

II. **Warstwa poślizgowa**: mieszanka SMA-MA o uziarnieniu do 8 mm, grubość 4 cm.

III. **Izolacja** płyty podjezdniowej: warstwa MMA, grubość 0,5 cm.

IV. **Podłoże, płyta podjezdniowa**: beton cementowy, zbrojony, grubość 50 cm.



POLITECHNIKA RZESZOWSKA im. IGNACEGO ŁUKASIEWICZA
KATEDRA DRÓG I MOSTÓW
WYDZIAŁ BUDOWNICTWA, INŻYNIERII ŚRODOWISKA I ARCHITEKTURY

Projekt konstrukcji nawierzchni (2)

I. Szczeliny skurczowe **podłużne**:

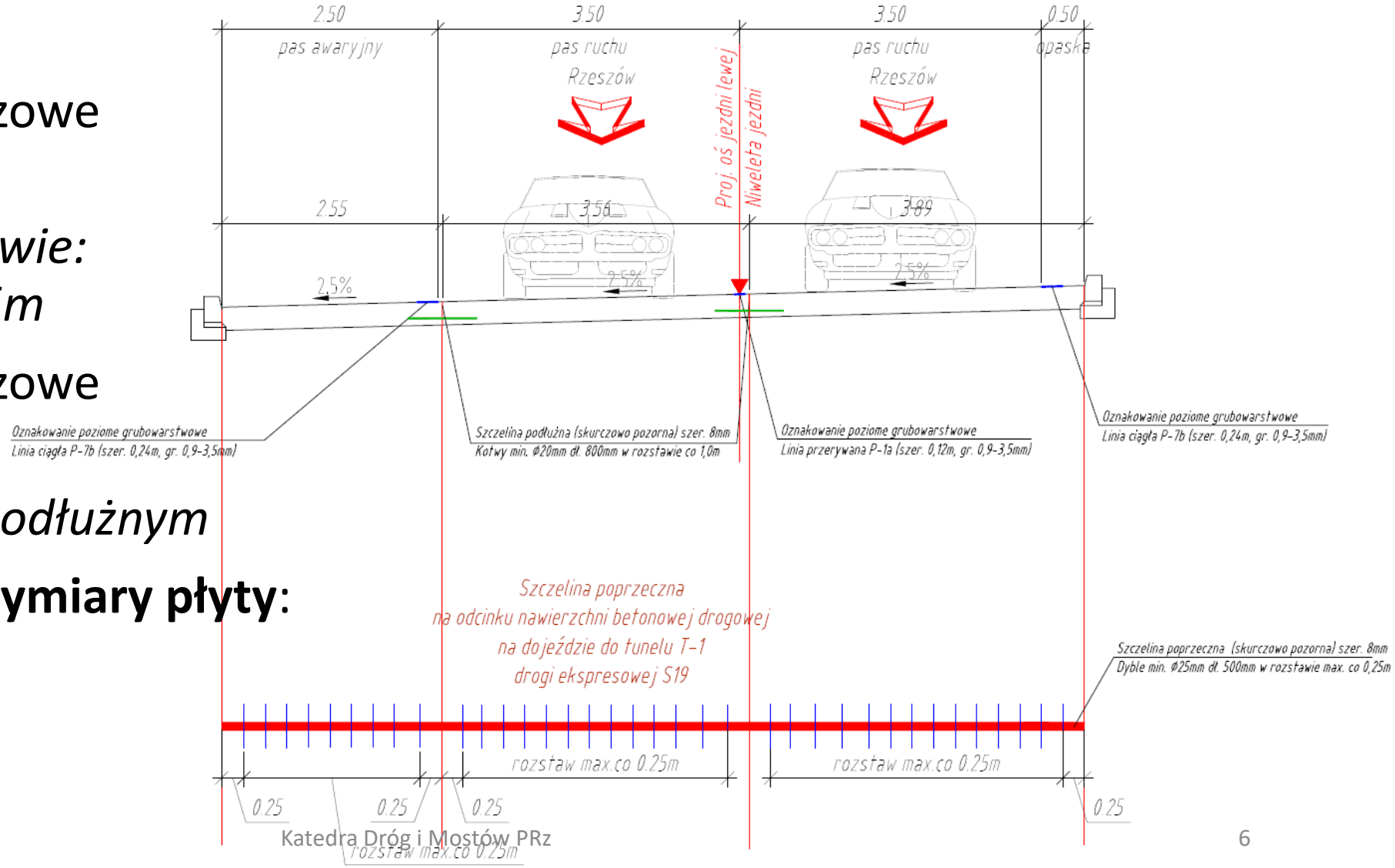
2 szczeliny w rozstawie: 3,89m+3,56m+2,55m

II. Szczeliny skurczowe **poprzeczne:**

co 5m w kierunku podłużnym

III. Maksymalne **wymiary płyty**:

3,89 x 5,00 m



KATEDRA DRÓG I MOSTÓW
WYDZIAŁ BUDOWNICTWA, INŻYNIERII ŚRODOWISKA I ARCHITEKTURY
POLITECHNIKA RZESZOWSKA im. IGNACEGO ŁUKASIEWICZA

Projektowanie nawierzchni betonowej

A. Nośność doraźna na obciążenie mostowe LM-1 klasy 1 wg PN-EN-1991-2

B. Trwałość zmęczeniowa pod obciążeniem drogowym 115 kN/oś wg KTKNS

C. Odporność na pożar na podstawie analizy piśmiennictwa technicznego

KATEDRA DRÓG I MOSTÓW
WYDZIAŁ BUDOWNICTWA, INŻYNIERII ŚRODOWISKA I ARCHITEKTURY
POLITECHNIKA RZESZOWSKA im. IGNACEGO ŁUKASIEWICZA

Projektowanie - podejście numeryczne MES

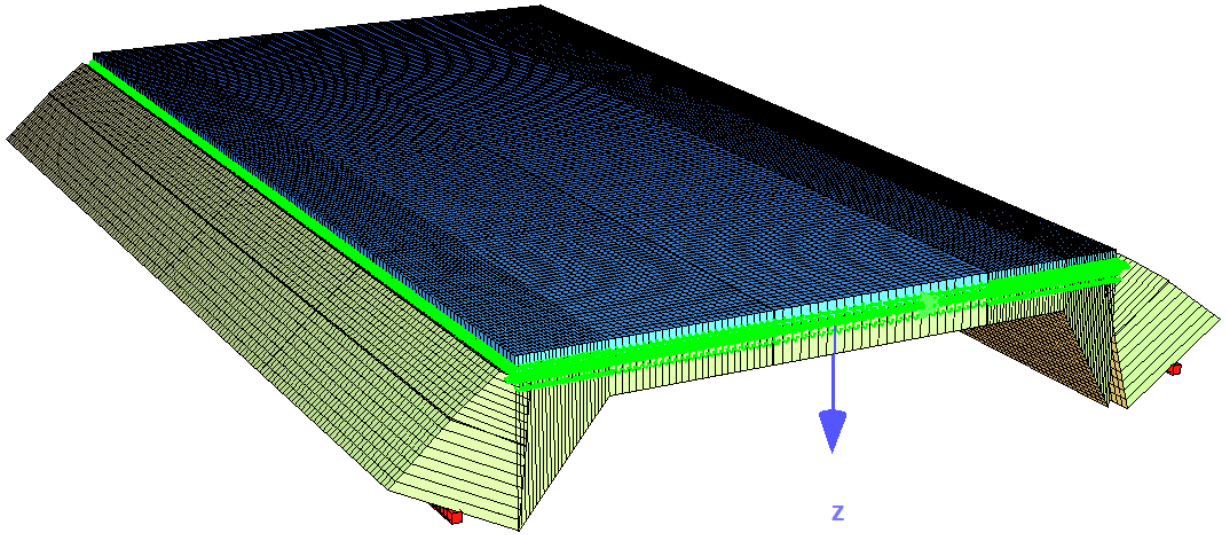
Zalecenia katalogu KTKNS

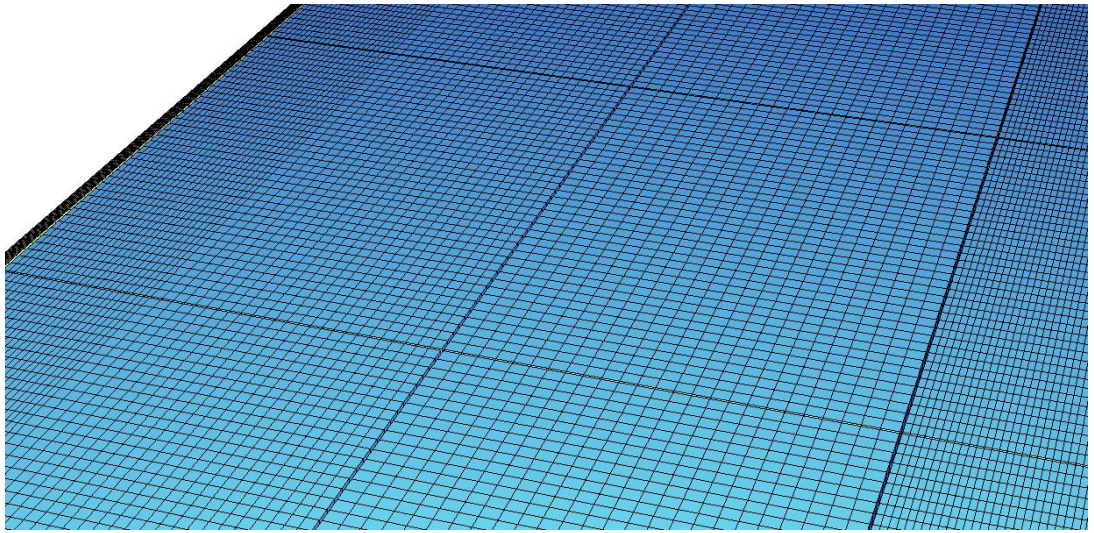
12. INDYWIDUALNE PROJEKTOWANIE NAWIERZCHNI

12.7. Przy indywidualnym projektowaniu nawierzchni można stosować algorytmy obliczeniowe wykorzystujące teorię układów warstwowych z uwzględnieniem m.in. zagadnień sprężystości, plastyczności, lepkosprężystości, zmęczenia, mechaniki pękania oraz mechaniki gruntów. Do rozwiązań można stosować różne metody numeryczne, np. metodę elementów skończonych (MES) wykorzystując ogólne oprogramowanie komercyjne lub dedykowane dla nawierzchni drogowych. Należy jednak zwrócić uwagę na właściwy dobór parametrów materiałowych (po wcześniejszej kalibracji modelu).

KATEDRA DRÓG I MOSTÓW
WYDZIAŁ BUDOWNICTWA, INŻYNIERII ŚRODOWISKA I ARCHITEKTURY
POLITECHNIKA RZESZOWSKA im. IGNACEGO ŁUKASIEWICZA

Model obliczeniowy MES (Sofistik 2018)





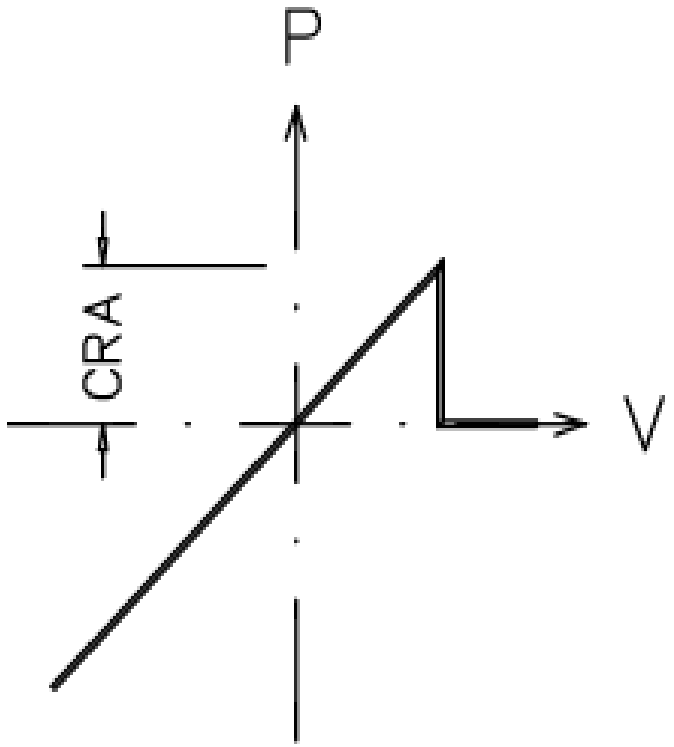
- betonowe konstrukcje nawierzchni, ścian obudowy oraz płyty podjezdniowej zamodelowano za pomocą **dwuwymiarowych elementów płytowych typu *quad***;
- elementy nawierzchni i płyty połączono za pomocą **kontaktowych elementów sprężynowych typu *spri*** o parametrach warstwy poślizgowej (mieszanki SMA-MA o uziarnieniu do 8 mm);
- w modelu nawierzchni wprowadzono **szczeliny skurczowe** w kierunku poprzecznym i w kierunku podłużnym;
- odwzorowano pełną **sztywność płyty podjezdniowej**, modelując jej rzeczywiste wymiary i uwzględniając rzeczywiste parametry materiałowe;

KATEDRA DRÓG I MOSTÓW
WYDZIAŁ BUDOWNICTWA, INŻYNIERII ŚRODOWISKA I ARCHITEKTURY
POLITECHNIKA RZESZOWSKA im. IGNACEGO ŁUKASIEWICZA

Model obliczeniowy MES – elementy kontaktowe

<u>Elementy sprężyste</u> *spri* symulujące kontakt (poślizg) pomiędzy nawierzchnią betonową a żelbetową płytą podjezdniową zostały opisane następującymi parametrami:

- sztywność w płaszczyźnie (kierunki x,y): 6000000 kN/m^2 = 6 GPa,
- sztywność z płaszczyzny (kierunek z): 6000000 kN/m^2= 6 GPa,
- wytrzymałość na ścinanie (w płaszczyźnie x,y): CRA = 300 kPa,
- wytrzymałość na odrywanie (kierunek z): CRA = 1 kPa,
- współczynnik Poissona: v=0,3,
- współczynnik tarcia (bitum/beton): f=0,2.



KATEDRA DRÓG I MOSTÓW
WYDZIAŁ BUDOWNICTWA, INŻYNIERII ŚRODOWISKA I ARCHITEKTURY
POLITECHNIKA RZESZOWSKA im. IGNACEGO ŁUKASIEWICZA

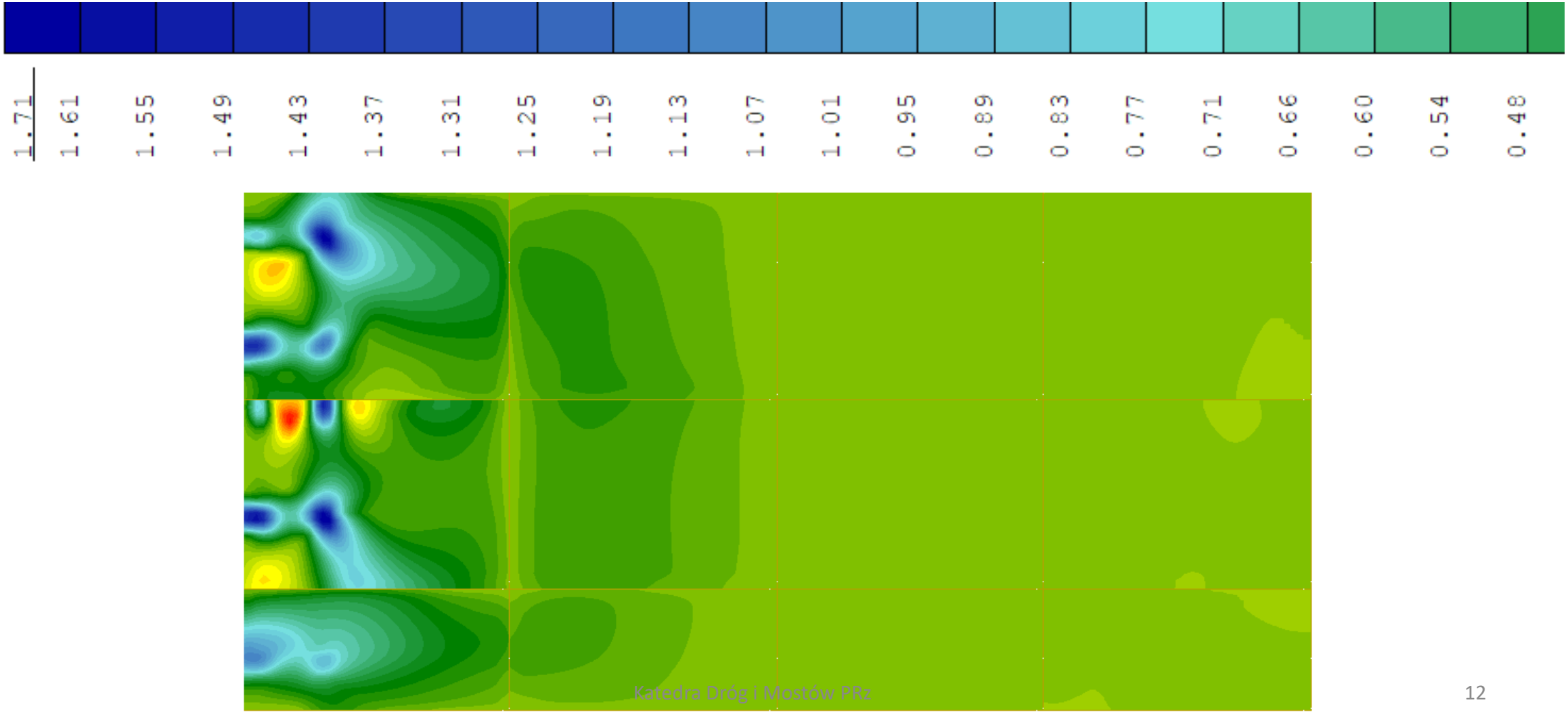
Obciążenia i oddziaływania

- ciężar własny konstrukcji i wyposażenia wg PN-EN 1991-1-1;
- obciążenia pionowe ruchome (nośność doraźna) – model LM1 dla klasy I wg PN-EN 1991-2;
- obciążenie pionowe ruchome (trwałość zmęczeniowa) – pojazd drogowy o nacisku 115 kN/oś wg KTKNS;
- obciążenia poziome od hamowania i przyśpieszania wg PN-EN 1991-2;
- oddziaływania termiczne: +/- $\Delta T=10°C$ (zmiana po wysokości przekroju) wg KTKNS;
- nośność doraźną sprawdzono dla kombinacji obliczeniowej wg PN-EN 1990 (SGN), trwałość zmęczeniową dla obciążeń charakterystycznych (ND);
- w analizie uwzględniano naprężenia w obu kierunkach głównych oraz naprężenia zastępcze;

POLITECHNIKA RZESZOWSKA im. IGNACEGO ŁUKASIEWICZA
KATEDRA DRÓG I MOSTÓW
WYDZIAŁ BUDOWNICTWA, INŻYNIERII ŚRODOWISKA I ARCHITEKTURY

Wyniki – naprężenia w betonie, włókna dolne

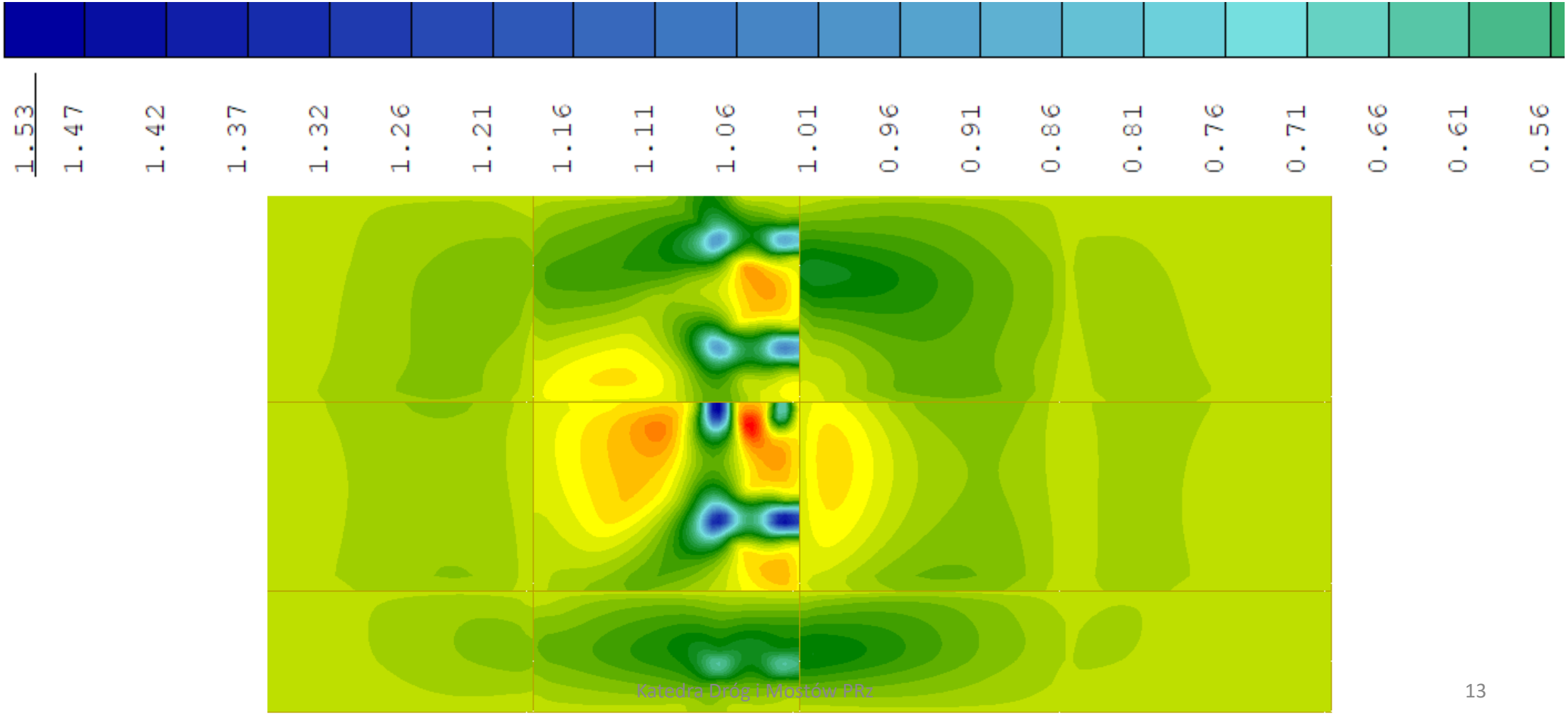
obciążenie mostowe LM1 (przy krawędzi)



POLITECHNIKA RZESZOWSKA im. IGNACEGO ŁUKASIEWICZA
KATEDRA DRÓG I MOSTÓW
WYDZIAŁ BUDOWNICTWA, INŻYNIERII ŚRODOWISKA I ARCHITEKTURY

Wyniki – naprężenia w betonie, włókna dolne

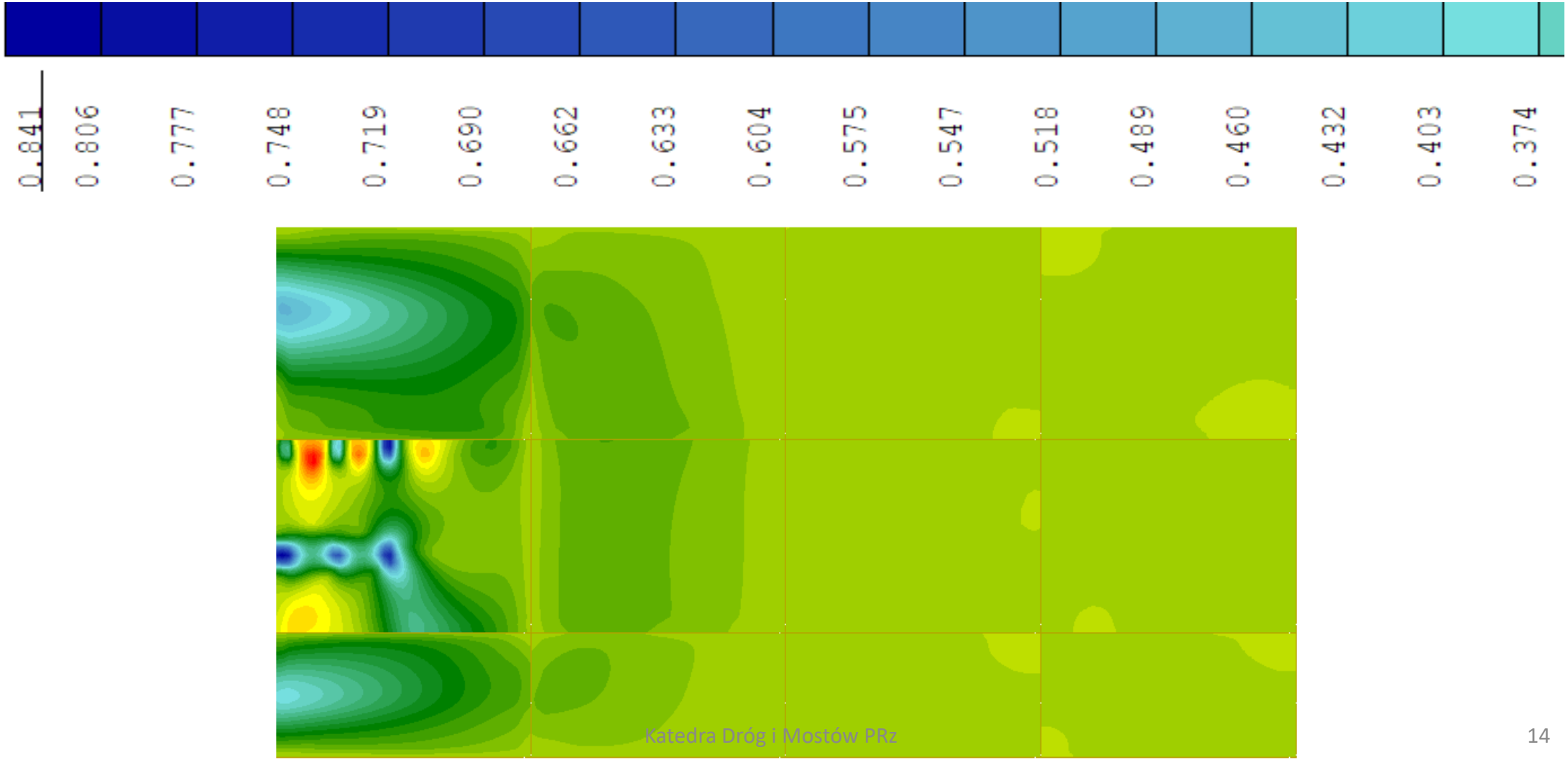
obciążenie mostowe LM1 (w przęśle)



POLITECHNIKA RZESZOWSKA im. IGNACEGO ŁUKASIEWICZA
KATEDRA DRÓG I MOSTÓW
WYDZIAŁ BUDOWNICTWA, INŻYNIERII ŚRODOWISKA I ARCHITEKTURY

Wyniki – naprężenia w betonie, włókna dolne

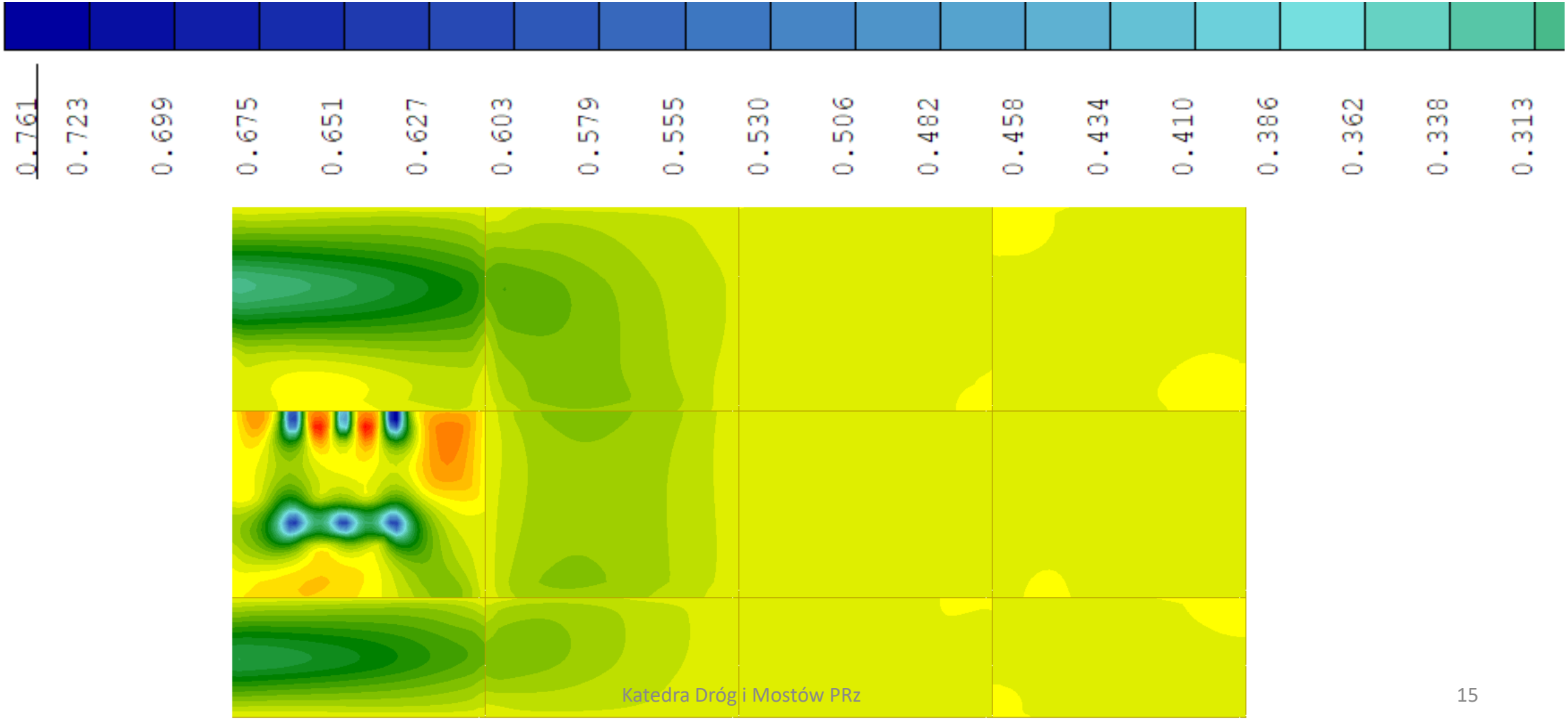
obciążenie drogowe 115 kN/oś (przy krawędzi)



POLITECHNIKA RZESZOWSKA im. IGNACEGO ŁUKASIEWICZA
KATEDRA DRÓG I MOSTÓW
WYDZIAŁ BUDOWNICTWA, INŻYNIERII ŚRODOWISKA I ARCHITEKTURY

Wyniki – naprężenia w betonie, włókna dolne

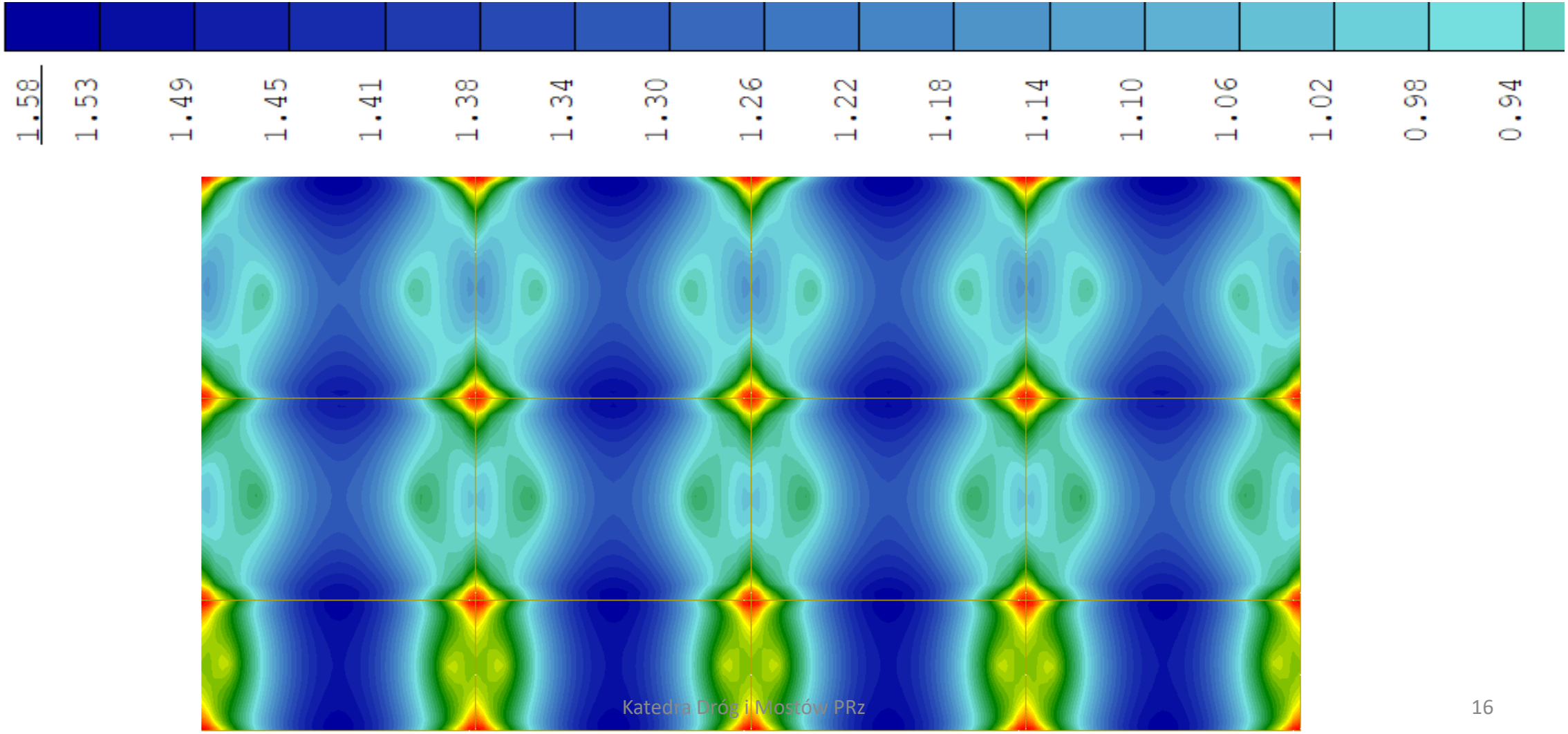
obciążenie drogowe 115 kN/oś (w przęśle)



POLITECHNIKA RZESZOWSKA im. IGNACEGO ŁUKASIEWICZA
KATEDRA DRÓG I MOSTÓW
WYDZIAŁ BUDOWNICTWA, INŻYNIERII ŚRODOWISKA I ARCHITEKTURY

Wyniki – naprężenia w betonie, włókna dolne

oddziaływanie zmianą temperatury ±10°C



POLITECHNIKA RZESZOWSKA im. IGNACEGO ŁUKASIEWICZA
KATEDRA DRÓG I MOSTÓW
WYDZIAŁ BUDOWNICTWA, INŻYNIERII ŚRODOWISKA I ARCHITEKTURY

Ocena nośności doraźnej wg PN-EN-1991-2

- Sprawdzenie nośności doraźnej nawierzchni wykonano metodą stanów granicznych (SGN):

$$\sigma_{td} < \alpha_{ct} \cdot f_{ct,fl} / \gamma_c$$

- σ_{td} – główne naprężenia rozciągające od kombinacji obliczeniowej dla decydujących włókien górnych lub dolnych nawierzchni betonowej,
- α_{ct} = 1,0 - współczynnik uwzględniający efekty długotrwałe oraz niekorzystne wpływy powstałe w wyniku przyłożenia obciążenia;
- $f_{ct,fl}$ = 5,5 MPa - charakterystyczna wytrzymałość betonu na rozciąganie przy zginaniu określona wg PN-EN 12390 - 5;
- γ_c= 1,4 – częściowy współczynnik materiałowy dla betonu dla sytuacji trwałej;

POLITECHNIKA RZESZOWSKA im. IGNACEGO ŁUKASIEWICZA
KATEDRA DRÓG I MOSTÓW
WYDZIAŁ BUDOWNICTWA, INŻYNIERII ŚRODOWISKA I ARCHITEKTURY

Ocena nośności doraźnej wg PN-EN-1991-2

Rodzaj obciążenia ruchomego	Przekrój	Naprężenia [MPa]			Wytrzymałość obliczeniowa f_{ctm}/γ_c [MPa]	Wykorzystanie materiału [%]
		od obciążeń ruchomych [MPa]	od temperatury [MPa]	od kombinacji obliczeniowej [MPa]		
Mostowe (model LM1 – TS+UDL)	Przęsłowy	1,53+0,09=1,62	1,58	3,609	**5,5/1,4= 3,929**	**91,9**
	Krawędziowy	1,71+0,10=1,81	1,46	3,758		**95,7**
Drogowe (115 kN/oś)	Przęsłowy	0,76	1,58	2,448		62,3
	Krawędziowy	0,84	1,46	2,448		62,3

KATEDRA DRÓG I MOSTÓW
WYDZIAŁ BUDOWNICTWA, INŻYNIERII ŚRODOWISKA I ARCHITEKTURY
POLITECHNIKA RZESZOWSKA im. IGNACEGO ŁUKASIEWICZA

Ocena trwałości zmęczeniowej wg KTKNS

- Sprawdzenie trwałości zmęczeniowej nawierzchni wykonano metodą naprężeń dopuszczalnych (ND):

$$\sigma_t < \sigma_{dop} = f_{ct,fl} \times (1-0{,}078 \log N)$$

- σ_t – główne naprężenia rozciągające od obciążeń charakterystycznych dla decydujących włókien górnych lub dolnych nawierzchni betonowej,
- $f_{ct,fl}$ – charakterystyczna wytrzymałość betonu na rozciąganie przy zginaniu, 5,5 MPa dla betonu klasy C 35/45 MPa;
- N – powtarzalna liczba obciążeń osi standardowych o obciążeniu 115 kN (N = 38 mln dla ruchu KR-6);
- σ_{dop} – naprężenia dopuszczalne (2,24 MPa dla danych jak wyżej);

POLITECHNIKA RZESZOWSKA im. IGNACEGO ŁUKASIEWICZA
KATEDRA DRÓG I MOSTÓW
WYDZIAŁ BUDOWNICTWA, INŻYNIERII ŚRODOWISKA I ARCHITEKTURY

Ocena trwałości zmęczeniowej wg KTKNS

Rodzaj obciążenia ruchomego	Przekrój	Naprężenia charakterystyczne od obciążeń rucho-mych [MPa]	Naprężenie dopuszczalne dla betonu [MPa]	Wykorzystanie materiału [%]
Mostowe (model LM1)	Przęsłowy	1,62	**2,24**	**72,3**
	Krawędziowy	1,81		**80,8**
Drogowe (115 kN/oś)	Przęsłowy	0,76		33,9
	Krawędziowy	0,84		37,5

KATEDRA DRÓG I MOSTÓW
WYDZIAŁ BUDOWNICTWA, INŻYNIERII ŚRODOWISKA I ARCHITEKTURY
POLITECHNIKA RZESZOWSKA im. IGNACEGO ŁUKASIEWICZA

Wnioski z obliczeń nawierzchni betonowej

- Zaprojektowana nawierzchnia w tunelu spełnia wymagania normowe w zakresie nośności doraźnej i trwałości zmęczeniowej pod obciążeniem mostowym (LM1) i drogowym (115 kN/oś).
- Obliczenia wykazały maksymalne doraźne wykorzystanie betonu na poziomie:
  - 95,7% dla obciążenia mostowego LM-1;
  - 62,3% dla obciążenia drogowego 115 kN/oś.
- Obliczenia wykazały maksymalne wykorzystanie trwałości zmęczeniowej betonu na poziomie:
  - 80,8% dla obciążenia mostowego LM-1;
  - 37,5% dla obciążenia drogowego 115 kN/oś.

POLITECHNIKA RZESZOWSKA im. IGNACEGO ŁUKASIEWICZA
KATEDRA DRÓG I MOSTÓW
WYDZIAŁ BUDOWNICTWA, INŻYNIERII ŚRODOWISKA I ARCHITEKTURY

Podsumowanie

- Zaproponowany projekt nawierzchni betonowej może być przyjęty jako zunifikowane rozwiązanie typowe, stosowane na płycie podjezdniowej w tunelach drogowych.
- Dyskusyjne jest stosowanie obciążeń mostowych i warunków nośności doraźnej (przewidzianych dla projektowania elementów konstrukcyjnych) do projektowania nawierzchni betonowej.
- W przypadku projektowania nawierzchni tylko na obciążenia drogowe i trwałość zmęczeniową (zgodnie z KTKNS) możliwa jest optymalizacja grubości nawierzchni na sztywnej płycie podjezdniowej w tunelu.
- Możliwe jest stosowanie innych rodzajów nawierzchni betonowych na płytach podjezdniowych w tunelach drogowych (np. proponowanych w Katalogu Typowych Nawierzchni Mostowych, 2022).

Dziękuję za uwagę

KATEDRA DRÓG I MOSTÓW
WYDZIAŁ BUDOWNICTWA, INŻYNIERII ŚRODOWISKA I ARCHITEKTURY
POLITECHNIKA RZESZOWSKA
im. IGNACEGO ŁUKASIEWICZA