



**POLITECHNIKA
RZESZOWSKA**
im. IGNACEGO ŁUKASIEWICZA



**WYDZIAŁ
BUDOWNICTWA,
INŻYNIERII ŚRODOWISKA
I ARCHITEKTURY**
POLITECHNIKI RZESZOWSKIEJ



Nawierzchnie w tunelach drogowych: asfalt vs. beton

Lesław Bichajło, Tomasz Siwowski, Politechnika Rzeszowska

Nawierzchnie w tunelach drogowych

- Nawierzchnia – warstwy jezdne:

- Nawierzchnia z mieszanek mineralno – asfaltowych (dalej: asfaltowa)
- Nawierzchnia z betonu cementowego (dalej: betonowa)

- Podłoże warstw jezdnych:

- Klasyczna podbudowa drogowa (zasadnicza, pomocnicza)
 - Katalog typowych konstrukcji nawierzchni podatnych i półsztywnych
 - Katalog typowych konstrukcji nawierzchni sztywnych
- Żelbetowa płyta podjezdniowa (TBM)
 - Katalog typowych konstrukcji nawierzchni jezdni na drogowych obiektach mostowych i w tunelach (WR-M-61)

Bezpieczeństwo pożarowe (1)

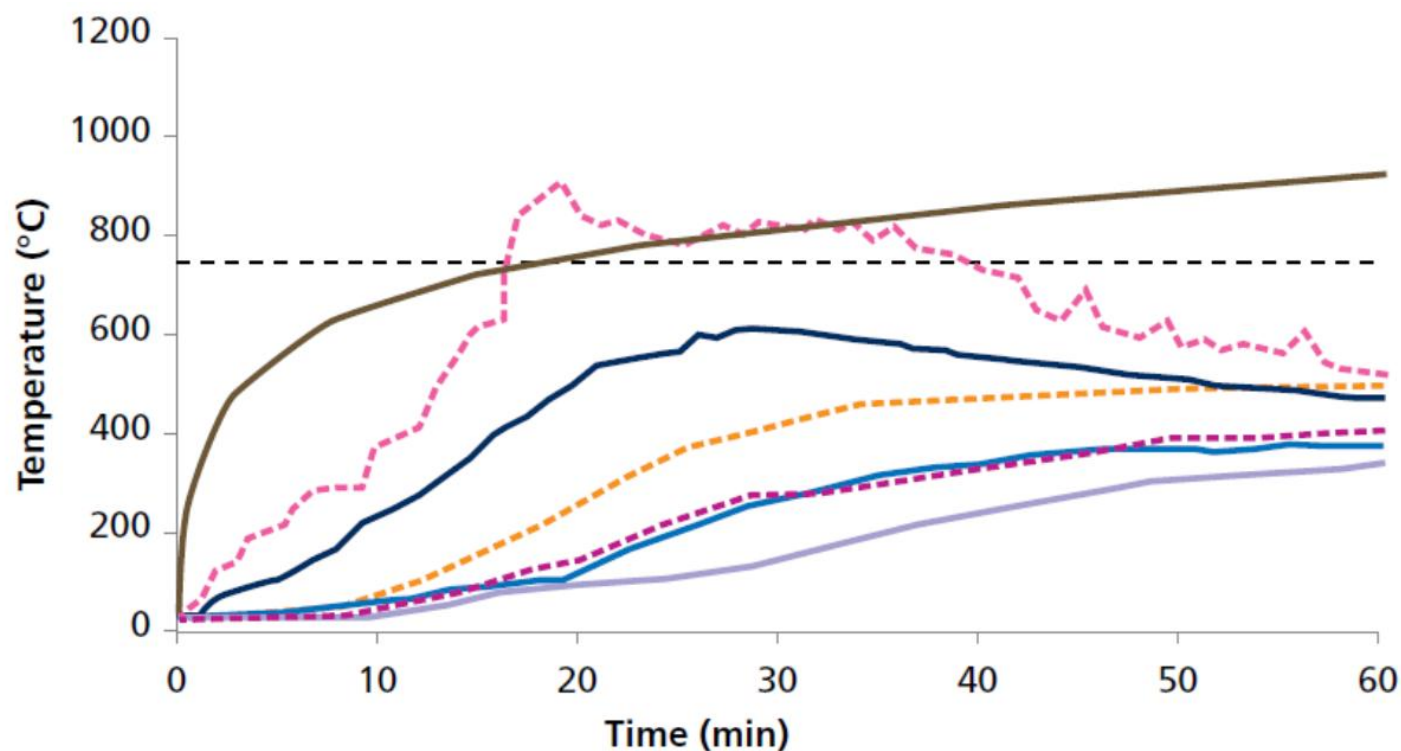
- **Beton cementowy**

- ze względu na swój skład **jest stabilny w sytuacjach pożarowych**. Nie jest palny, a zatem nie przyczynia się do obciążenia ogniowego, które wewnątrz tunelu decyduje o ryzyku pożaru oraz jego wielkości i skutkach.

- **Mieszanki mineralno-asfaltowe**

- mają wysoką wartość opałową, co **zwiększa zarówno obciążenie ogniowe, jak i temperaturę podczas pożaru**. Nawierzchnia bardzo szybko osiąga wysoką temperaturę w porównaniu z nawierzchnią betonową.
- **nie zachowują swoich właściwości mechanicznych** w przypadku pożaru. Spalanie powoduje rozpad i utratę spójności - efekt wiązania bitumu zostaje nieodwracalnie utracony. Po 5 minutach od podgrzania **wydzielają się duszące i toksyczne gazy**, pogarszając sytuację pożarową.

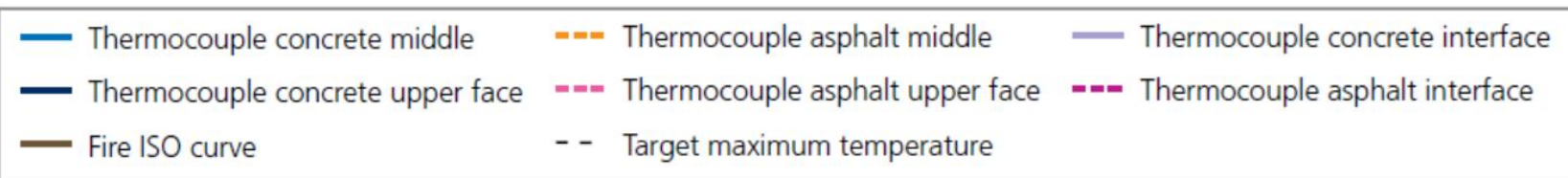
Bezpieczeństwo pożarowe (2)



ISO 834

Eurocode EN1991-1-2:

$$\Delta\theta(t)=20+345*\log(8t+1)$$



Bezpieczeństwo pożarowe (3)



- Ochrona życia i zdrowia
- Stan nawierzchni po pożarze, w tym utrzymanie przejezdności tunelu

Widoczność (poziom luminancji)

Zalety nawierzchni betonowej:

- lepsza widoczność (poziom luminancji) i kontrastowość (rozpoznawalności obiektów);
- obniżone ryzyko olśnienia przy wyjazdach z tunelu;
- zmniejszenie negatywnych skutków odbić dyfuzyjnych (lustrzanych) powstałych na skutek odbić światła reflektorów pojazdów od mokrej nawierzchni;
- oszczędności wynikające z mniejszego zapotrzebowania na oświetlenie;

Asfalt vs. beton jako nawierzchnia tunelu drogowego



Eksploatacja i utrzymanie nawierzchni

• Nawierzchnia asfaltowa:

- metody konwencjonalne (duże doświadczenie);
- dopuszczenie nawierzchni do eksploatacji po 1 dniu od naprawy;
- większy koszt utrzymania (wymiana po 10-15 latach);

• Nawierzchnia betonowa:

- metody niekonwencjonalne (brak doświadczeń);
- dopuszczenie nawierzchni do eksploatacji po kilku dniach od naprawy (wiązanie i pielęgnacja betonu);
- mniejszy koszt utrzymania (okres trwałości 30 lat);
- konieczna naprawa / wymiana masy zalewowej lub uszczelek w szczelinach dylatacyjnych;

Eksploatacja i utrzymanie nawierzchni

- **Nawierzchnia asfaltowa:**

- łatwiejsza reprofilacja

- **Nawierzchnia betonowa:**

- strefa wjazdu i wyjazdu z tunelu - inna bezwładność cieplna materiału nawierzchni;
- trudniejsza niwelacja ewentualnych nierówności nawierzchni po związaniu betonu;

Eksploatacja i utrzymanie nawierzchni

- **Nawierzchnia asfaltowa:**

- lepiej widoczne oznakowanie poziome;



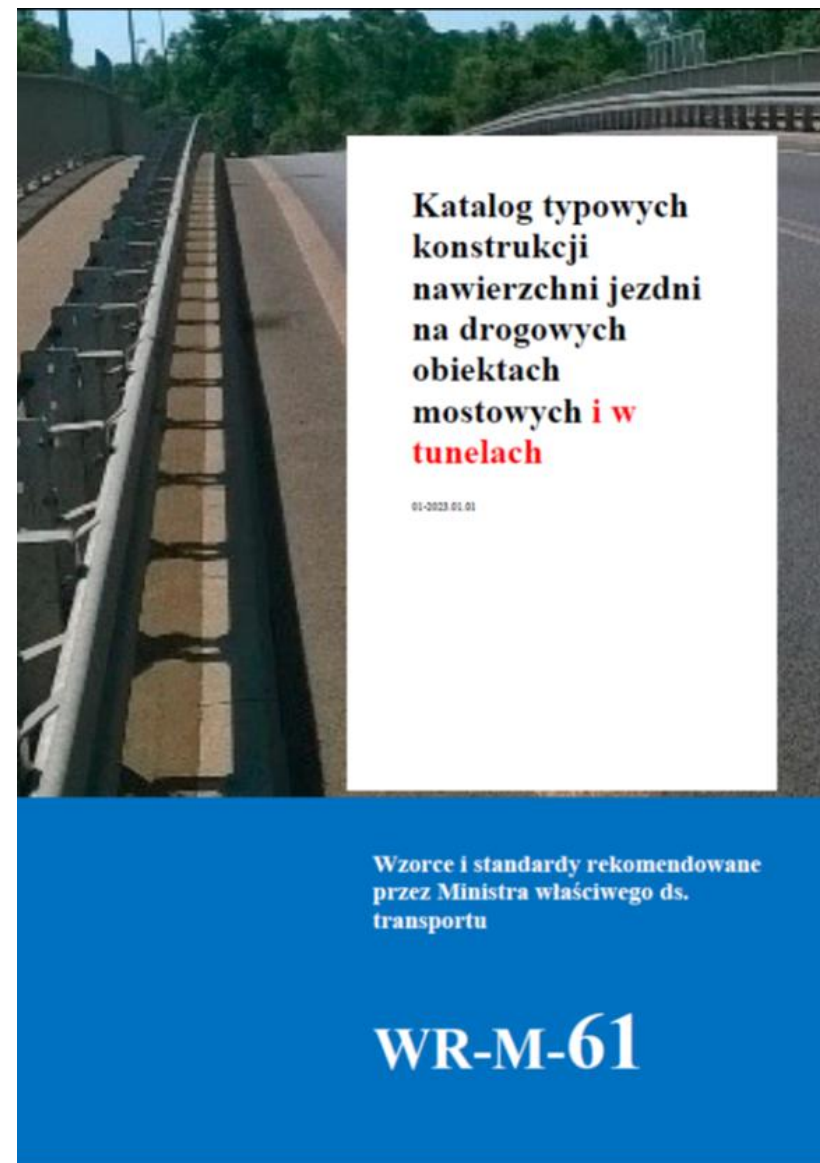
- **Nawierzchnia betonowa:**

- gorsza widoczność oznakowania poziomego (zwłaszcza białego – prowadzenie optyczne kierowcy, obszar wjazdu/wyjazdu – bywa mgła);



Zakres katalogu

1. **Przedmiot i zakres stosowania**
2. **Wykaz opracowań powołanych**
3. **Definicje i objaśnienia skrótów**
4. **Obciążenie projektowe i kategoria ruchu**
5. **Procedura wyboru typowej nawierzchni mostowej i tunelowej**
6. **Typowe hydroizolacje i nawierzchnie obiektów mostowych i tuneli**
7. **Wymagania materiałowe i technologiczne dla hydroizolacji**
8. **Wymagania materiałowe i technologiczne dla nawierzchni asfaltowych**
9. **Wymagania materiałowe i technologiczne dla nawierzchni betonowych**
10. **Obliczenia asfaltowej nawierzchni mostowej**
11. **Obliczenia betonowej nawierzchni mostowej**
12. **Obliczenia betonowej nawierzchni tunelowej**



Celowość uzupełnienia katalogu nawierzchni

- Wymagania GDDKiA – **nawierzchnie betonowe w tunelach** (trwałość, odporność poż., jasność itd.)
- Katalog Typowych Konstrukcji Nawierzchni Sztywnych (KTKNS) **nie zawsze może i/lub powinien być stosowany** w tunelach (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 **sprawdzonych rozwiązań typowych** nawierzchni betonowych na płytach żelbetowych
- Brak **zasad projektowania** nawierzchni betonowych na płytach żelbetowych

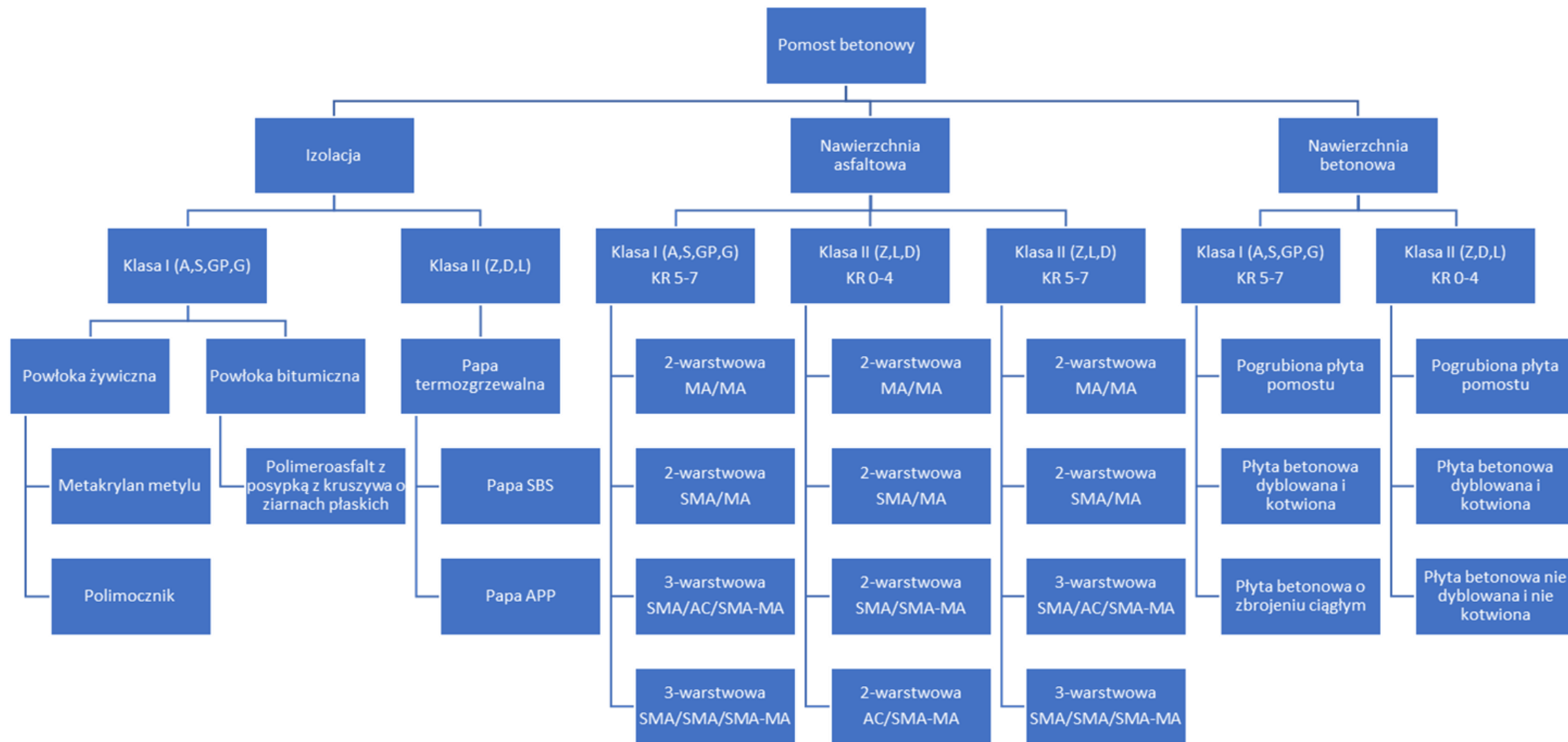
Podstawowe założenia do katalogu

- Katalog **opiera się na ogólnych założeniach** zawartych w:
 - Katalogu Typowych Konstrukcji Nawierzchni Sztywnych oraz
 - Eurokodach konstrukcyjnych w zakresie obiektów mostowych.
- Ogólne zasady przyjmowania **obciążeń i oddziaływań** stosowanych w projektowaniu nawierzchni betonowej w tunelu oparte są na wymaganiach normy **PN-EN 1991-2**.
- Ruch projektowy właściwy dla typowych warunków ruchu drogowego jest klasyfikowany przez określenie kategorii ruchu w zakresie od **KR0 do KR7** zgodnie z katalogiem **WR-D-63**.

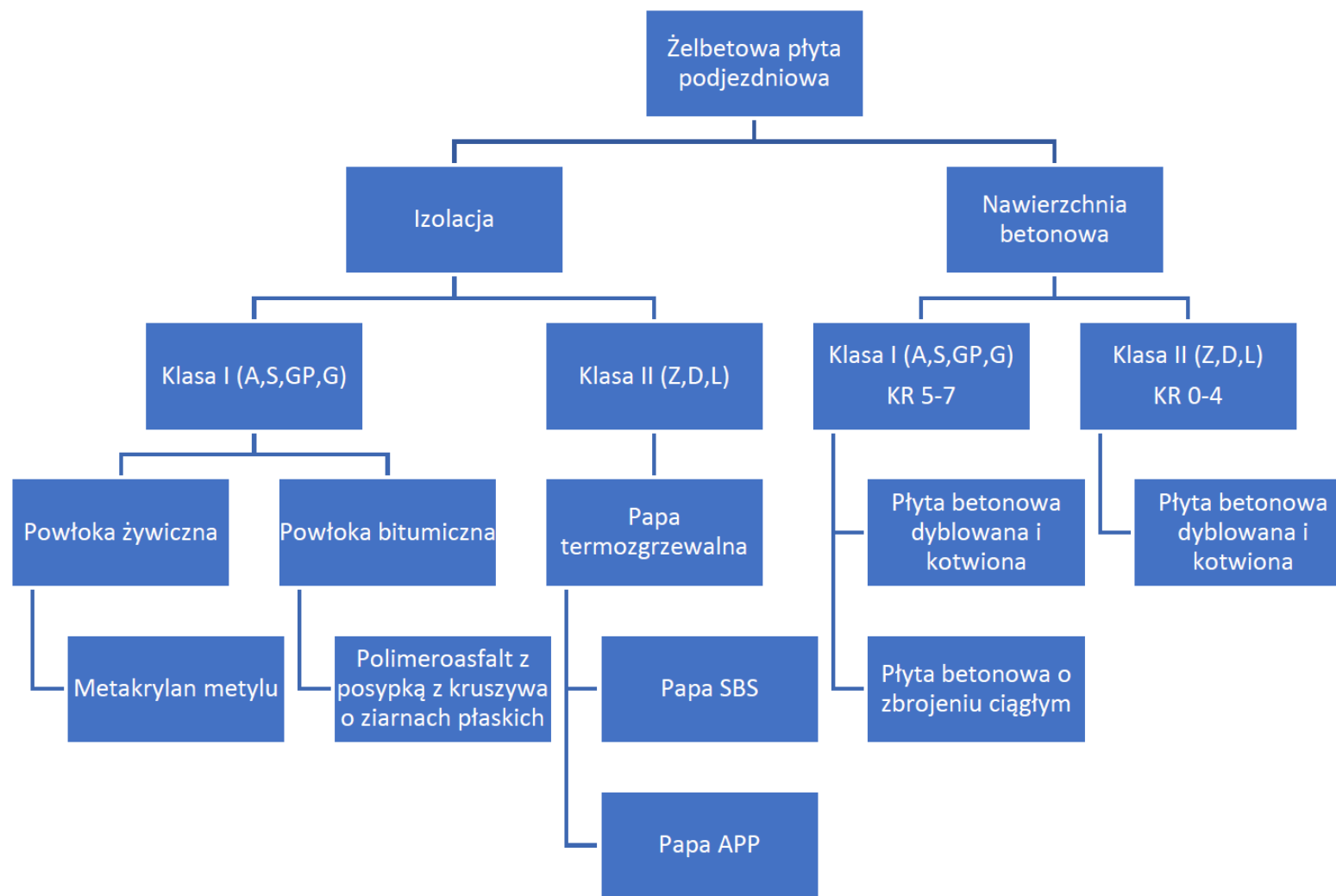
**POLITECHNIKA
RZESZOWSKA**
im. IGNACEGO ŁUKASIEWICZA

-

Procedura doboru nawierzchni w tunelu



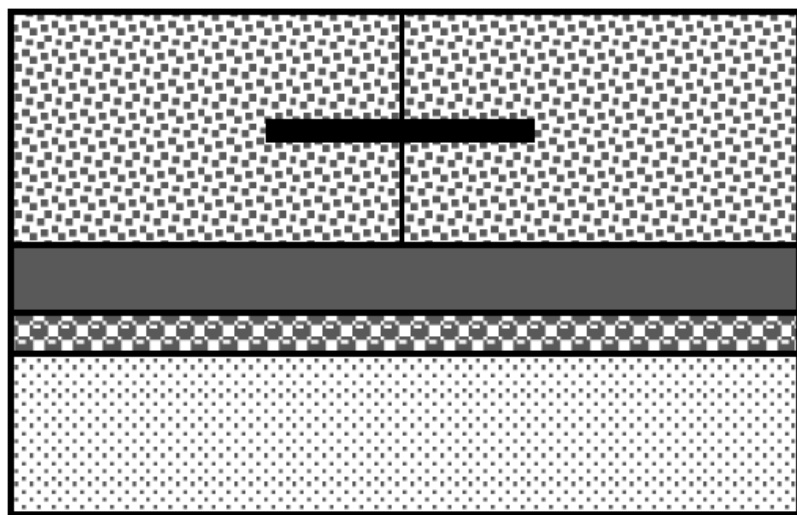
Procedura doboru nawierzchni w tunelu



Typowe nawierzchnie w tunelu

Schemat i opis warstw nawierzchni

Typ IA - nawierzchnia betonowa jednowarstwowa, dyblowana i kotwiona



warstwa z betonu cementowego C35/45 – grubości i wykończenie górnej powierzchni jak na odcinku przed obiektem

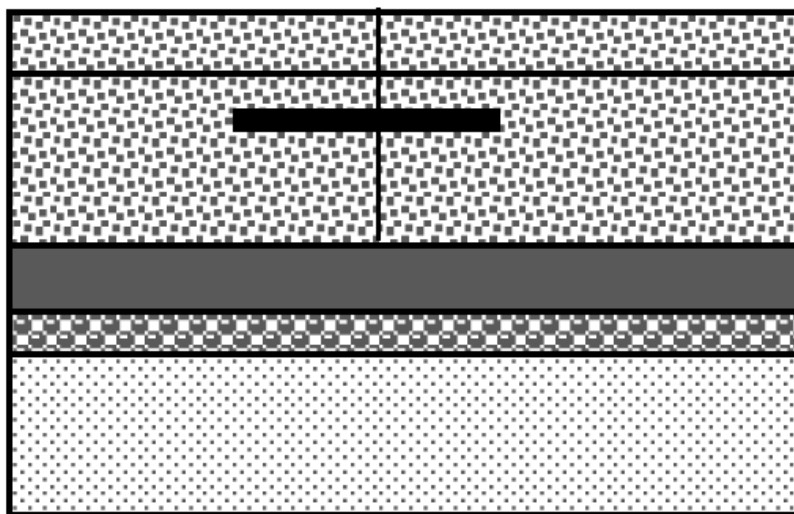
warstwa poslizgowa, MA 8 PmB 25/55-60 lub 25/55-80
lub PmB 45/80-80, gr. 3 cm

hydroizolacja

żelbetowa płyta podjezdniowa

Typowe nawierzchnie w tunelu

Typ IB – nawierzchnia betonowa dwuwarstwowa układana „mokre na mokre”, dyblowana i kotwiona



warstwa z betonu cementowego z odkrytym kruszywem, grubości jak na odcinku przed obiektem

warstwa z betonu cementowego C35/45, grubości jak na odcinku przed obiektem

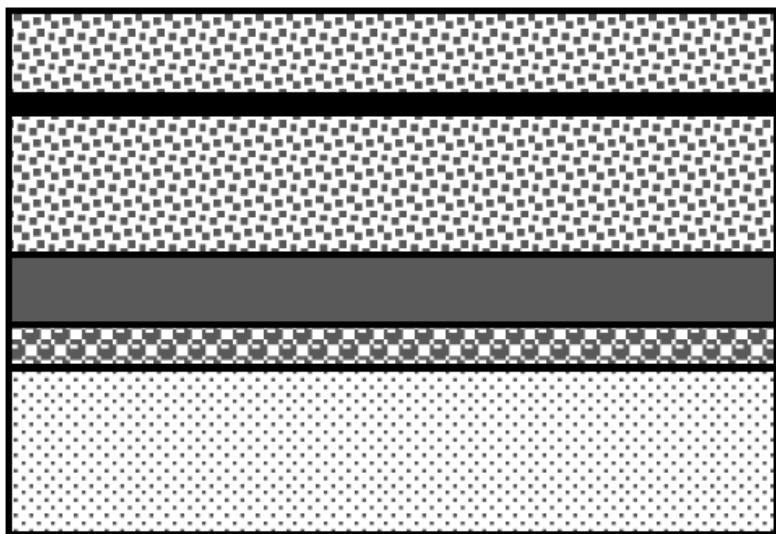
warstwa poślizgowa, SMA-MA 8/PmB 45/80-65 lub 45/80-80 lub 65/105-60, lub 65/105-80, gr. 2.5-3.5 cm lub MA 8// PmB 25/55-60 lub 25/55-80 lub 45/80-80, gr. 3 cm

hydroizolacja

żelbetowa płyta podjezdniowa

Typowe nawierzchnie w tunelu

Typ IIA – nawierzchnia betonowa jednowarstwowa o ciągłym zbrojeniu



warstwa z betonu cementowego C35/45 o ciągłym zbrojeniu – grubości i wykończenie górnej powierzchni jak na odcinku przed obiektem,

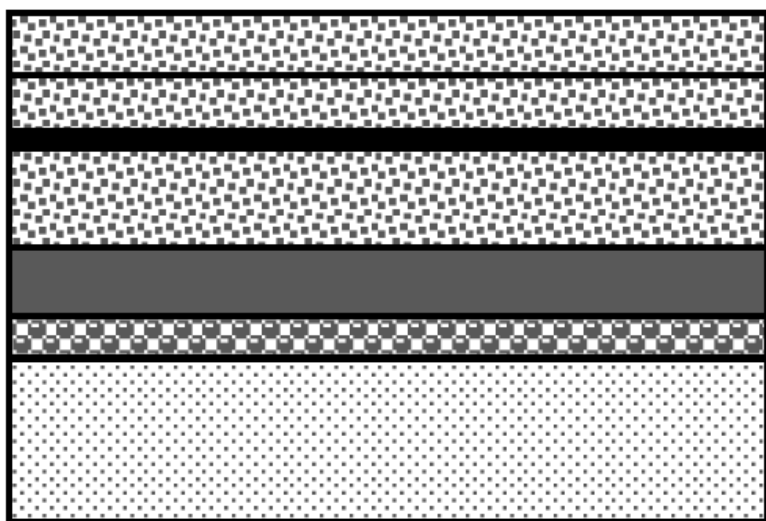
warstwa poślizgowa, SMA-MA 8/PmB 45/80-65 lub 45/80-80 lub 65/105-60 lub 65/105-80, gr. 2.5-3.5 cm lub MA 8/ PmB 25/55-60 lub 25/55-80 lub 45/80-80, gr. 3 cm

hydroizolacja wodoochronna z warstwą gruntującą

żelbetowa płyta podjezdniowa

Typowe nawierzchnie w tunelu

Typ IIB – nawierzchnia betonowa dwuwarstwowa układana „mokre na mokre” o ciągłym zbrojeniu



warstwa z betonu cementowego z odkrytym kruszywem, grubości jak na odcinku przed obiektem

warstwa z betonu cementowego C35/45 – grubości jak na odcinku przed obiektem

warstwa poślizgowa, SMA-MA 8 / PmB 45/80-65 lub 45/80-80 lub 65/105-60 lub 65/105-80, gr. 2.5-3.5 cm lub MA 8/ PmB 25/55-60 lub 25/55-80 lub 45/80-80, gr. 3 cm

hydroizolacja

żelbetowa płyta podjezdniowa

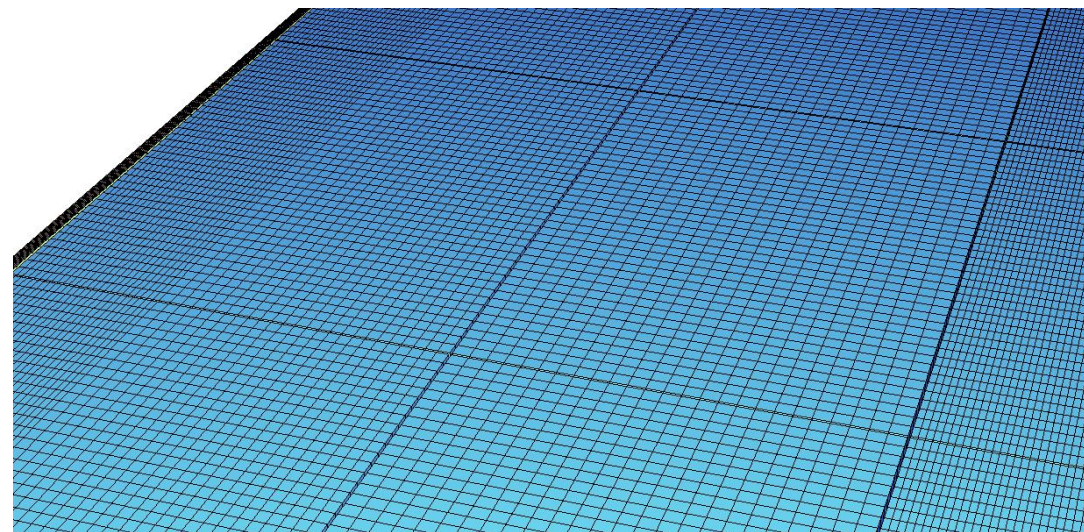
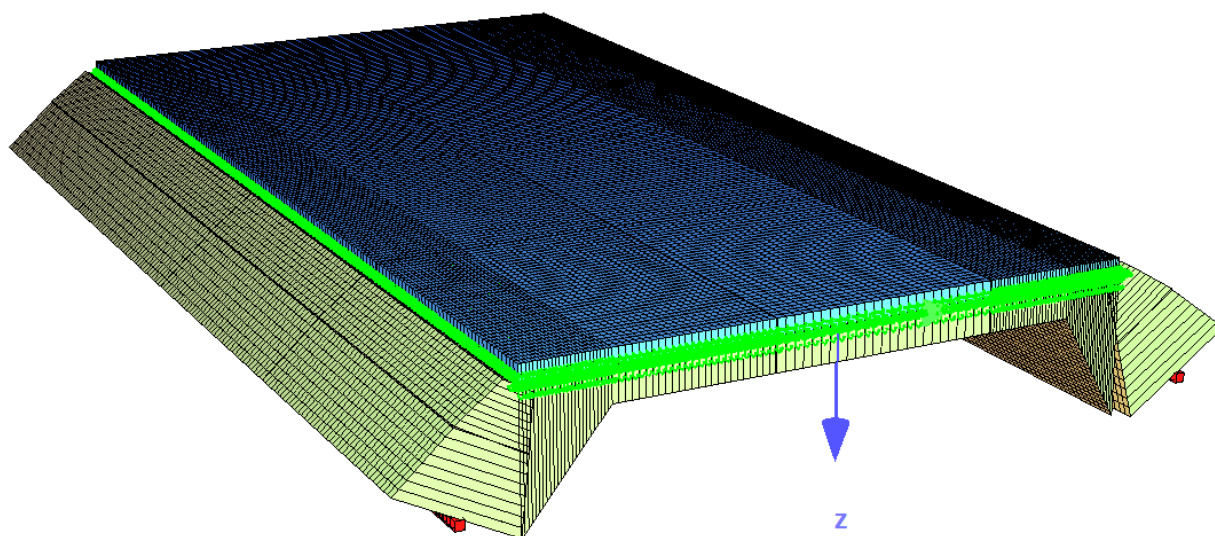
Obliczenia **betonowej** nawierzchni w tunelu - założenia

- Procedura jest oparta na zasadach przyjętych w odpowiednich **Eurokodach** oraz jest kompatybilna z procedurami przyjętymi w **Katalogu Typowych Konstrukcji Nawierzchni Sztywnych**.
- Do obliczeń przyjęto:
 - sprawdzenie **trwałości zmęczeniowej** - obciążenie ruchome pojazdami drogowymi o nacisku na oś 11,5 tony (115 kN);
 - sprawdzenie **nośności doraźnej** - obciążenie ruchome mostów drogowych modelem LM-1 według normy PN-EN 1991-2 dla klasy I.
- Konstrukcja nawierzchni została tak zaprojektowana, aby jej **trwałość zmęczeniowa** nie została wyczerpana w okresie eksploatacji krótszym niż 30 lat.

Obciążenia i oddziaływania

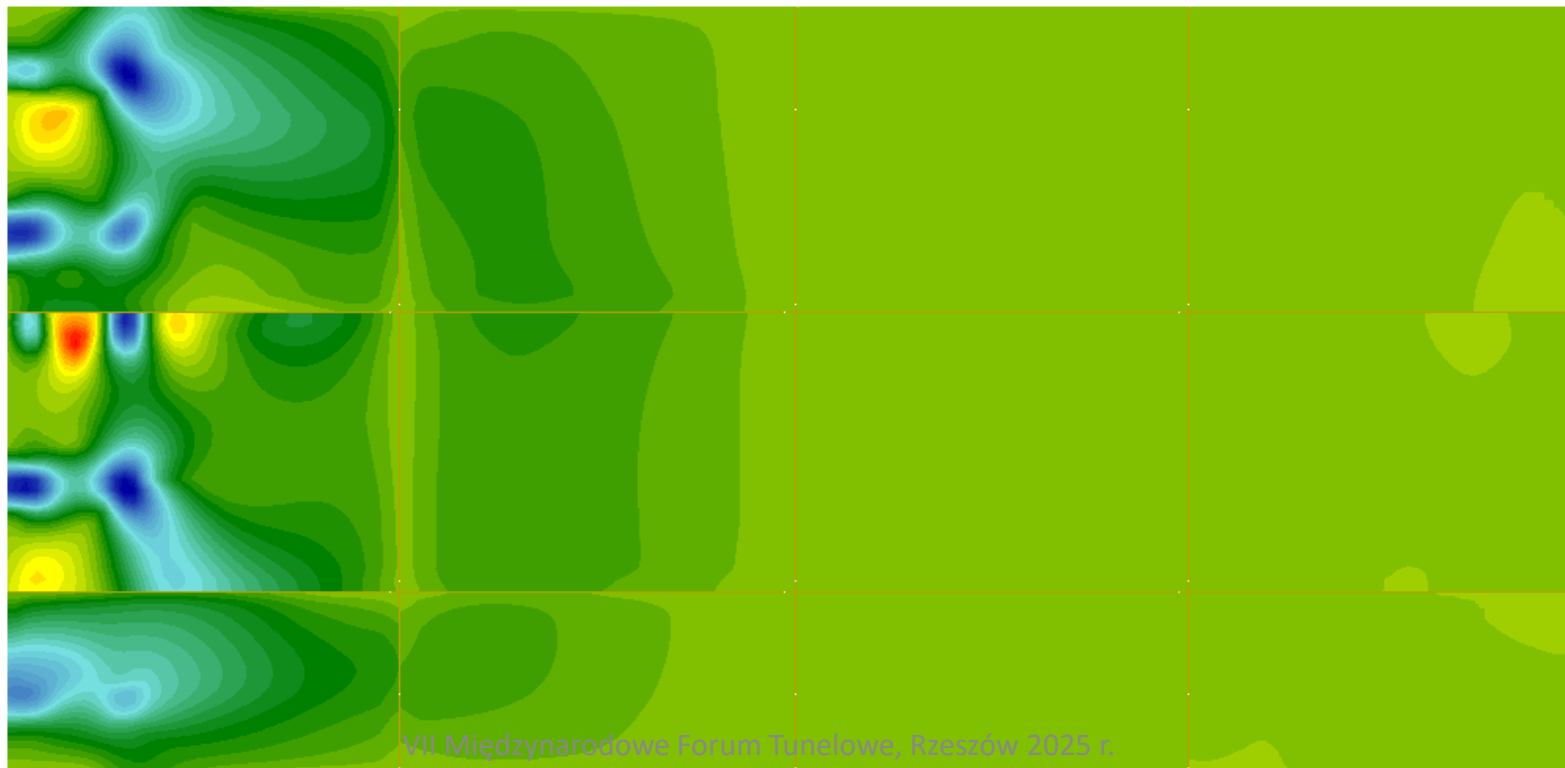
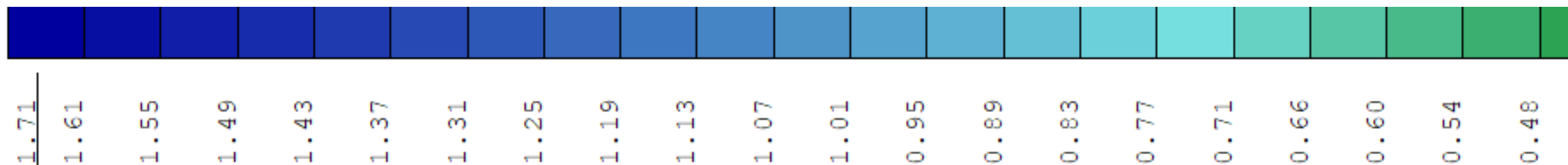
- ciężar własny konstrukcji i wyposażenia wg PN-EN 1991-1-1;
- obciążenie pionowe ruchome (**trwałość zmęczeniowa**) – pojazd drogowy o nacisku 115 kN/oś wg KTKNS;
- obciążenia pionowe ruchome (**nośność doraźna**) – model LM1 dla klasy I wg PN-EN 1991-2;
- obciążenia poziome od hamowania i przyśpieszania wg PN-EN 1991-2;
- oddziaływania termiczne : $\pm \Delta T = 10^{\circ}\text{C}$ (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;

Model numeryczny podłoża i nawierzchni betonowej



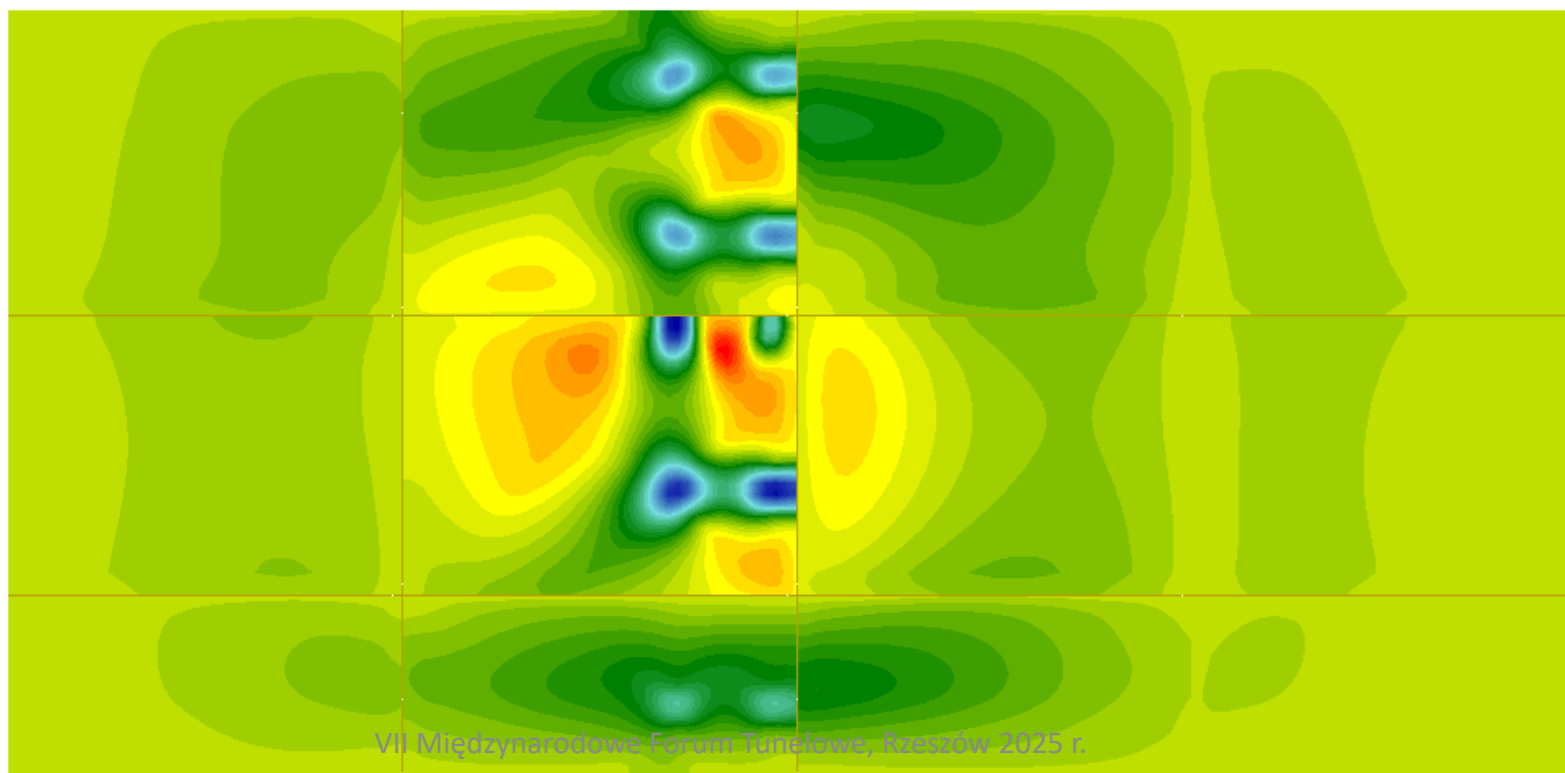
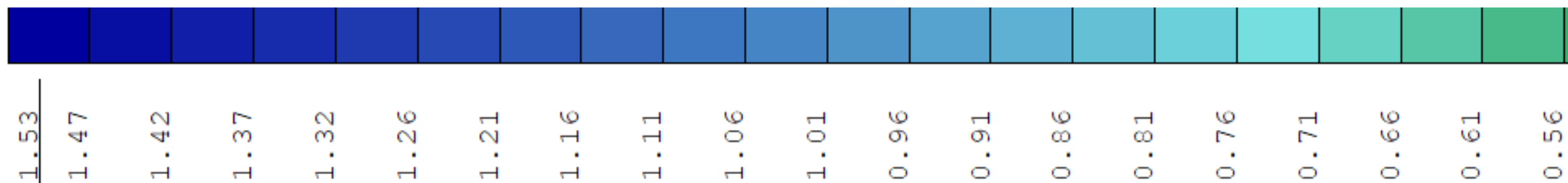
- betonowe konstrukcje nawierzchni, ścian obudowy oraz płyty podjezdniowej zamodelowano za pomocą **dwuwymiarowych elementów płytowych typu *quad***;
- elementy nawierzchni i płyty połączono za pomocą **kontaktowych elementów sprężynowych typu *spri*** o parametrach warstwy poślizgowej (mieszanki SMA-MA 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;

Wyniki – naprężenia w betonie, włókna dolne obciążenie mostowe LM1 (przy krawędzi)



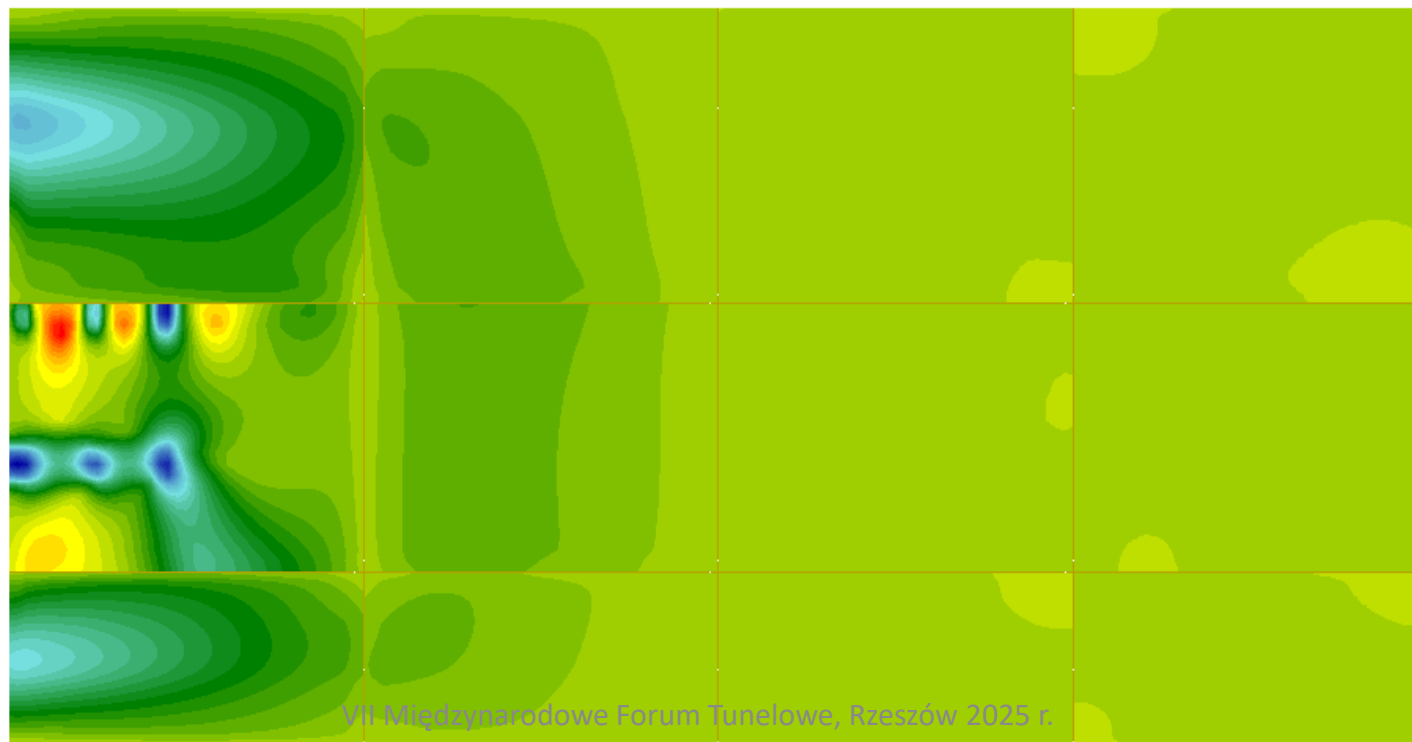
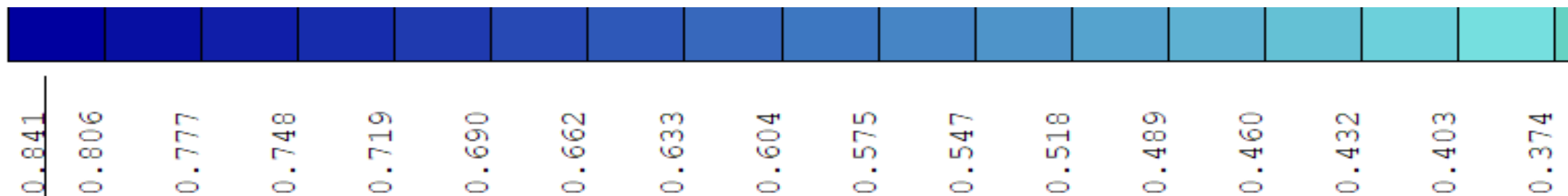
Wyniki – naprężenia w betonie, włókna dolne

obciążenie mostowe LM1 (w przęśle)



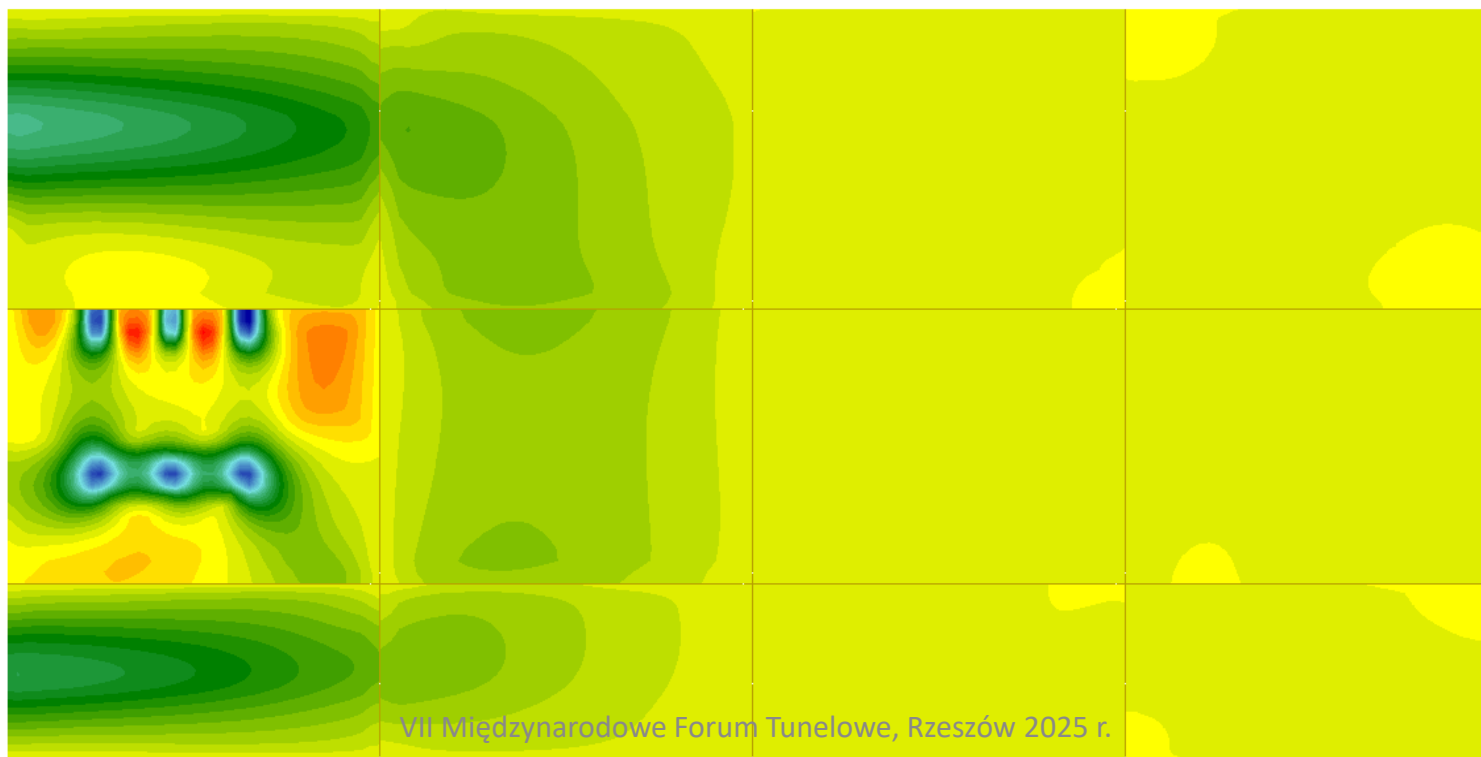
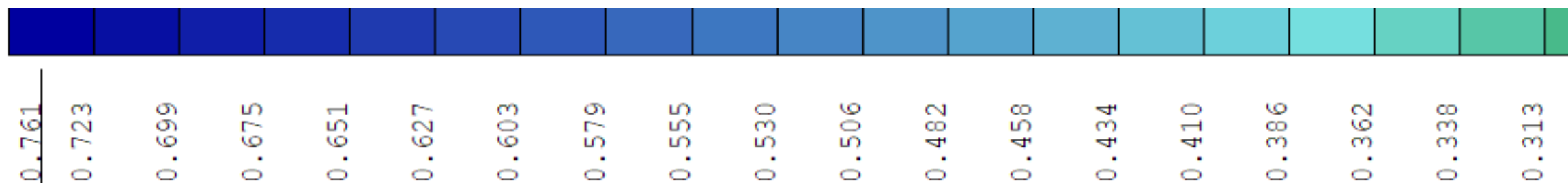
Wyniki – naprężenia w betonie, włókna dolne

obciążenie drogowe 115 kN/oś (przy krawędzi)



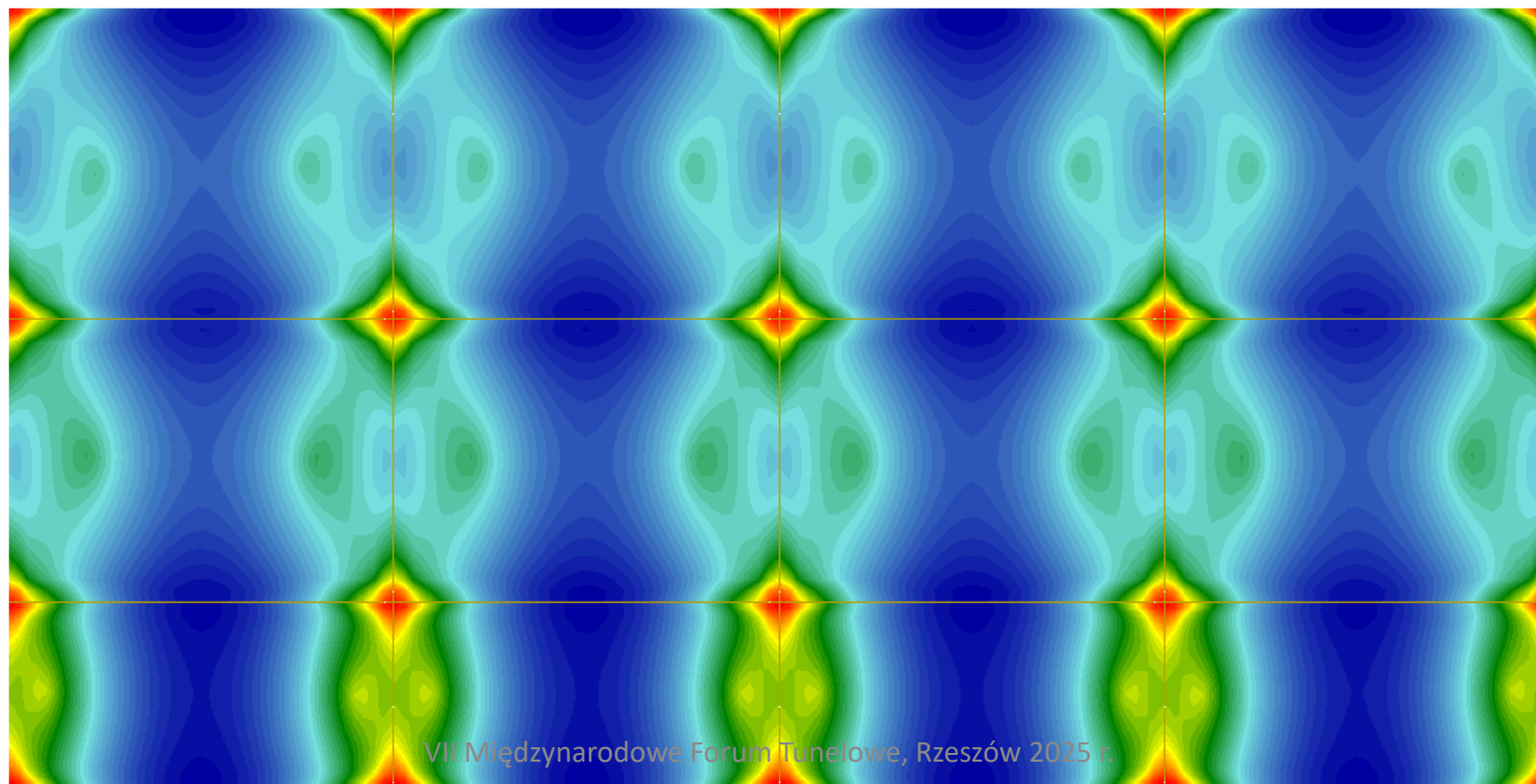
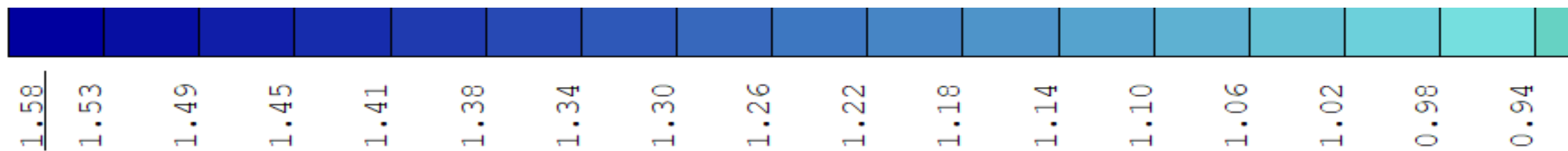
Wyniki – naprężenia w betonie, włókna dolne

obciążenie drogowe 115 kN/oś (w przęśle)



Wyniki – naprężenia w betonie, włókna dolne

oddziaływanie zmianą temperatury $\pm 10^{\circ}\text{C}$



Kryteria obliczeniowe - trwałość zmęczeniowa

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

- σ_t – główne **naprężenia rozciągające** od kombinacji charakterystycznej dla decydujących włókien górnych lub dolnych nawierzchni betonowej,
- σ_{dop} – naprężenia **dopuszczalne w betonie** nawierzchni, MPa,
- $f_{ct,fl}$ – charakterystyczna **wytrzymałość betonu na rozciąganie** przy zginaniu określona według PN-EN 12390-5, przyjęta według katalogu,
- N – powtarzalna liczba obciążeń osi standardowych o obciążeniu 115 kN.

Ocena trwałości zmęczeniowej wg KTKNS

Rodzaj obciążenia ruchomego	Przekrój	Naprężenia charakterystyczne od obciążeń ruchomych [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

Kryteria obliczeniowe - **nośność doraźna**

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

- σ_{td} – główne **naprężenia rozciągające** od kombinacji obliczeniowej dla decydujących włókien górnych lub dolnych nawierzchni betonowej,
- $\alpha_{ct} = 1,0$ – 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 według normy PN-EN 12390-5, przyjęta według katalogu,
- $\gamma_c = 1,4$ – współczynnik częściowy betonu zarówno w sytuacji trwałej, jak i przejściowej.

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

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.

Podsumowanie

- Nowy katalog jest kolejnym elementem zbioru **Wzorców i Standardów w drogownictwie (WiS)**, rekomendowanych do stosowania przez Ministra Infrastruktury.
- W katalogu zaproponowano **zunifikowana rozwiązania typowe**, stosowane na **płyce 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 na Obiektach Mostowych, 2022).



Dziękuję za uwagę