

Nawierzchnie w tunelach



Prof. Antoni SZYDŁO

POLITECHNIKA WROCŁAWSKA

Prof. Tomasz SIWOWSKI

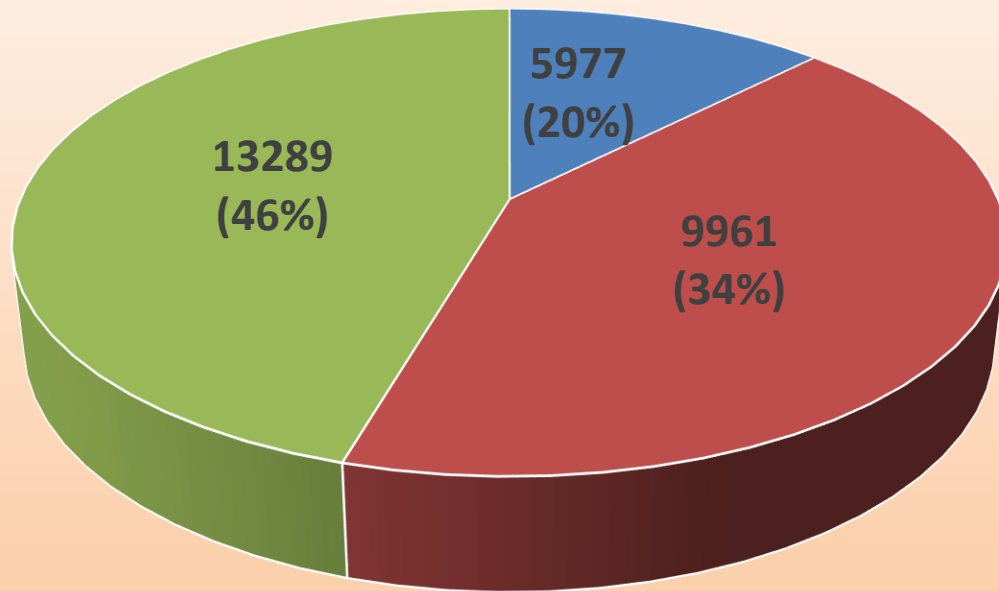
POLITECHNIKA RZESZOWSKA

Plan wystąpienia

- Statystyka tuneli w Polsce
- Podział konstrukcji nawierzchni w tunelach w zależności od zastosowanego materiału
- Rodzaj konstrukcji nawierzchni w zależności od technologii budowy tunelu
- Rodzaje konstrukcji nawierzchni w wybranych tunelach w Polsce
- Charakterystyka konstrukcji nawierzchni na płytach podjezdniowych (pomostach)
- Przykładowe obliczenia nawierzchni na płytach podjezdniowych (pomostach).

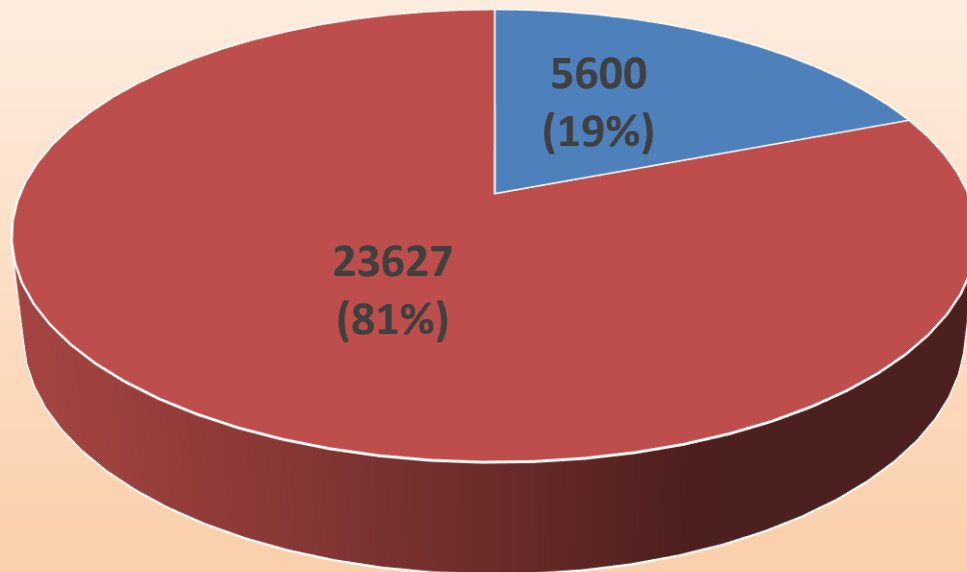
Polskie tunele drogowe - stan aktualny

Razem:
29 227 m



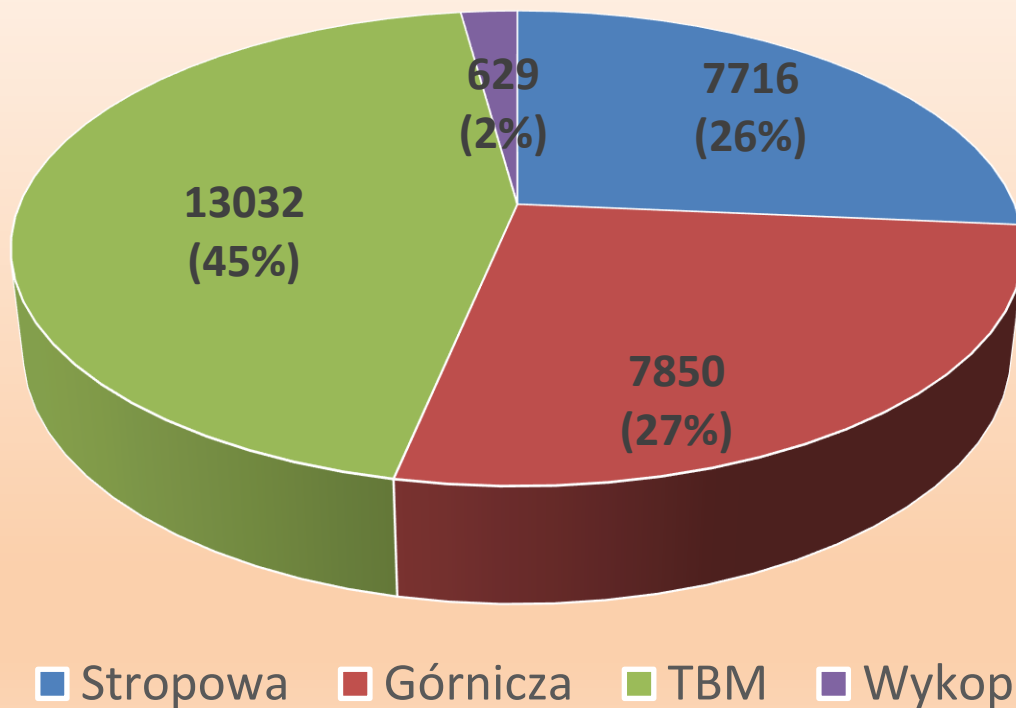
■ Eksploatacja ■ Budowa ■ Plan

Polskie tunele drogowe - inwestor



■ Miasta ■ GDDKiA

Polskie tunele drogowe - technologia budowy



Tunele - nawierzchnie

- W Polsce brak jest wymagań odnośnie nawierzchni w tunelach
- Jak do tej pory występuje dowolność w projektowaniu
- Przygotowywany jest przez Ministerstwo Infrastruktury Katalog nawierzchni mostowych
- Na wzór tego Katalogu można by stworzyć katalog nawierzchni w tunelach

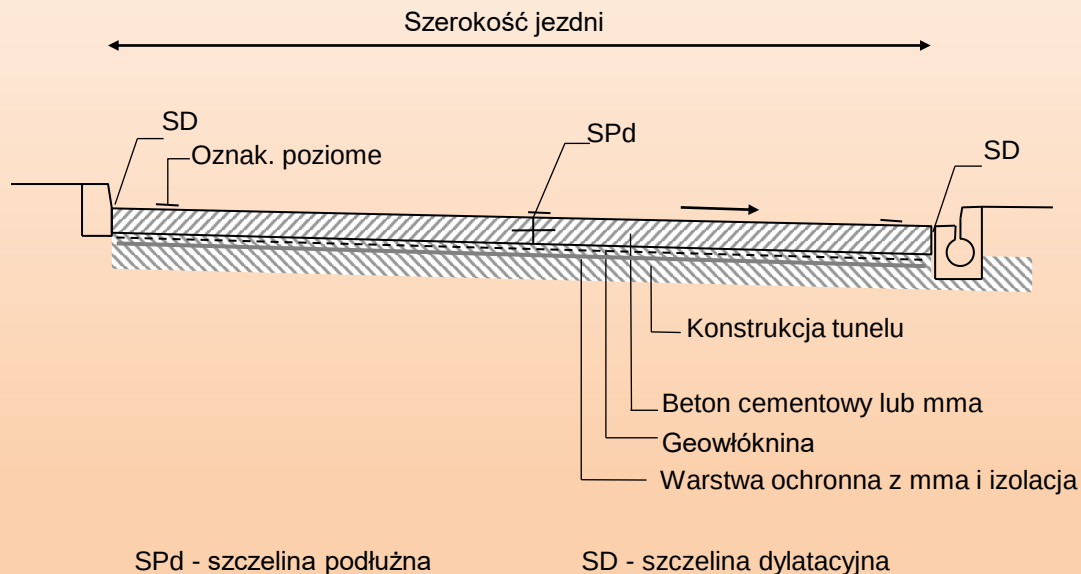
Tunele - nawierzchnie

- Podział nawierzchni w tunelach w Polsce w zależności od rodzaju materiału nawierzchni:
- Nawierzchnie asfaltowe (z mieszanek mineralno-asfaltowych)
- Nawierzchnie betonowe

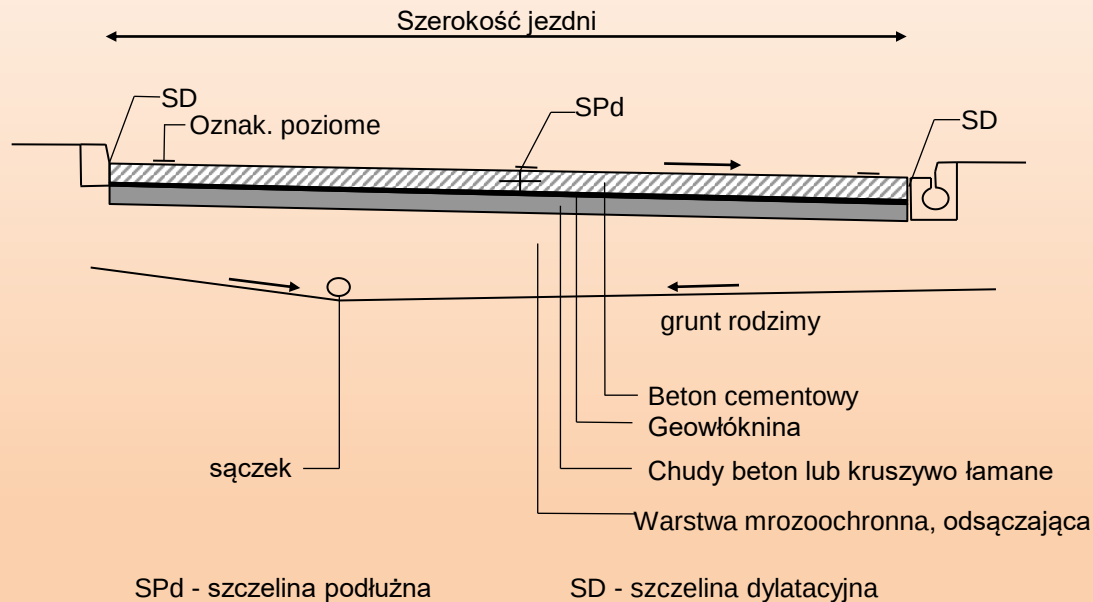
Rodzaje konstrukcji nawierzchni w zależności od konstrukcji tunelu

- Nawierzchnia ułożona na płycie dennej tunelu
- Nawierzchnia ułożona na warstwach podbudowy i odsączającej,
- Nawierzchnia betonowa na płycie podjezdniowej (pomostach),
- Nawierzchnia z mma na płycie podjezdniowej.

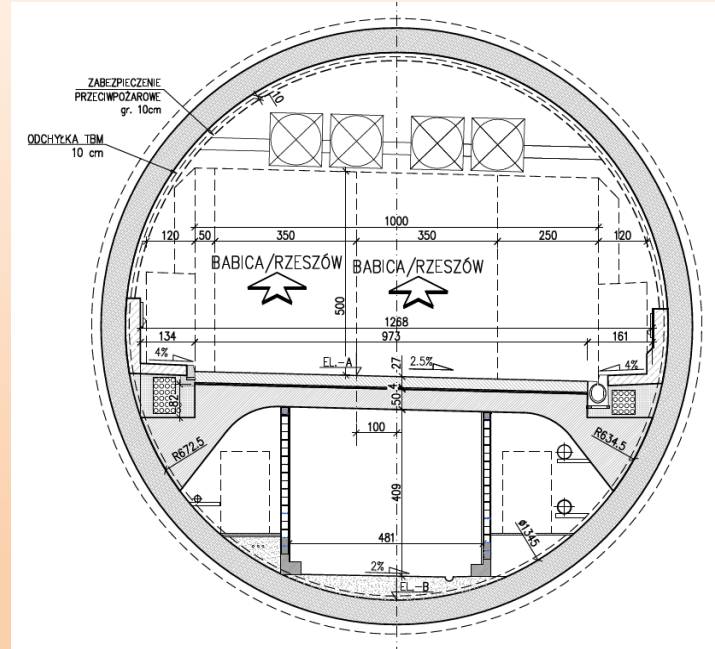
Nawierzchnia w tunelu na płycie dennej



Nawierzchnia w tunelu z podbudową i warstwą odsączającą



Nawierzchnia w tunelu na płycie podjezdniowej



Tunele w eksploatacji

	Nazwa	Lokalizacja, droga	Długość (m)	Szerokości użytkowe	Metoda budowy	Rok	Inwestor	Nawierzchnia
	Tunel Wisłostrady	Warszawa droga DK-7	930 / 889	2 nawy x 3 pasy ruchu po 3,5 m	metoda stropowa z zastosowaniem ścian szczelinowych	2003	miasto Warszawa	Nawierzchnia asfaltowa
	Tunel Katowicki	Katowice, droga DK-79	657 / 650	2 nawy x 3 pasy ruchu po 3,5 m	metoda stropowa z zastosowaniem ścian szczelinowych	2006	miasto Katowice	Nawierzchnia betonowa
	Tunel Emilia	Laliki, droga S-1	678	1 nawa x 2 pasy ruchu po 3,5 m	NATM, metoda stropowa (częściowo)	2010	GDDKiA	Nawierzchnia betonowa
	Tunel pod Martwą Wisłą	Gdańsk, Trasa Sucharskiego	1377,5	2 nawy x 2 pasy ruchu po 3,5 m	TBM	2016	miasto Gdańsk	Nawierzchnia asfaltowa

3642

Tunele w eksploatacji c.d.

Lp.	Nazwa	Lokalizacja, droga	Długość (m)	Szerokości użytkowe	Metoda budowy	Rok	Inwestor	Nawierzchnia
5	Tunel w ciągu Południowej Obwodnicy Warszawy (POW)	Warszawa, droga S-2	2335	2 nawy x 3 pasy ruchu po 3,5 m	metoda stropowa z zastosowaniem ścian szczelinowych	2021	GDDKiA	Nawierzchnia betonowa

Tunel Wiślostrady, Warszawa, 2003

Nawierzchnia:

- warstwa ścieralna, AC, 4 cm,
- warstwa ochronna, MA, 4 cm,
- izolacja, papa termozgrzewalna,
- płyta denną żelbetowa, 0,8 do 1,0 m



Tunel Katowicki, Katowice, 2006

Nawierzchnia:

- beton cementowy, C35/45, 27 cm,
- warstwa poślizgowa, mma, 3 cm
- kruszywo łamane 0/31,5, 20 cm
- kruszywo stab. mech., CBR>40%, 10 cm,
- warstwa odsączająca, 25 cm,
- geowłóknina,
- warstwa technologiczna, CBR>40%, 10 cm



Tunel Emilia, Laliki, 2010

Nawierzchnia:

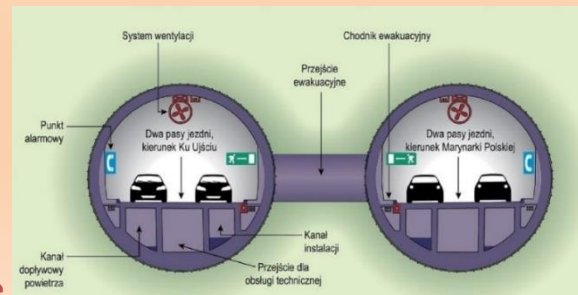
- beton cementowy, C35/45, 27 cm,
- warstwa poślizgowa, geomembrana,
- kruszywo łamane 0/31,5, 15 cm
- grunt stabilizowany cementem, $R_m=5$ MPa, 10 cm,
- warstwa odsączająca,



Tunel pod Martwą Wisłą, Gdańsk, 2016

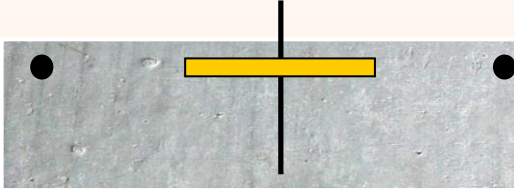
Nawierzchnia:

- warstwa ścieralna, AC, 4 cm,
- warstwa ochronna, MA, 4 cm,
- izolacja,
- płyta podjezdniowa



Tunel w ciągu POW, Warszawa, 2021





Nawierzchnia betonowa, 28 cm

Powierzchniowe utrwalenie

Chudy beton, 19 cm



Kruszywo niezwiązane, 17 cm, CBR $\geq$ 60%

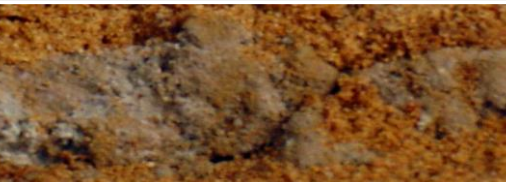


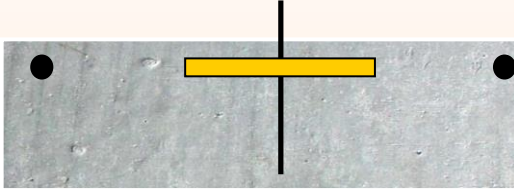
Warstwa odsączająca, 20 cm, 8 m/d



Grunt stabilizowany cementem o grubości zależnej od nośności podłoża

Grunt





Nawierzchnia betonowa, 28 cm
Powierzchniowe utwardzenie



Chudy beton, 19 cm



Kruszywo niezwiązane, 17 cm, CBR $\geq$ 60%



Warstwa odsączająca, 20 cm, 8 m/d



Płyta denną, ok. 1,1 m

Tunele w budowie – część I

Lp.	Nazwa	Lokalizacja, droga	Długość (m)	Szerokości użytkowe	Metoda budowy	Rok	Inwestor	Nawierzchnia
6	Tunel pod masywem Luboń Mały	Naprawa, droga S-7	2058	2 nawy x 3 pasy ruchu po 3,5 m	ADECO-RS	2021	GDDKiA	Nawierzchnia betonowa asfaltowa
7	Tunele w ciągu Trasy Łagiewnickiej	Kraków, III obwodnica	TD-04 626	2 nawy x 3 pasy ruchu po 3,5 m	metoda stropowa z zastosowaniem ścian szczelinowych	2022	miasto Kraków	Nawierzchnia betonowa
8			TD-10 522	2 nawy x 3 pasy ruchu po 3,5 m	betonowanie monolityczne w wykopie otwartym			

Tunele w budowie – część II

Lp.	Nazwa	Lokalizacja, droga	Długość (m)	Szerokości użytkowe	Metoda budowy	Rok	Inwestor	Nawierzchnia
9	Tunel pod Świną	Świnoujście, droga DK-3	1485	1 nawa x 2 pasy ruchu po 3,5 m	TBM	2022	miasto Świnoujście	Nawierzchnia asfaltowa
10	Tunel pod pasmem Gór Wałbrzyskich	Stare Bogaczowice, droga S-3	Tunel T-26: 2300	2 nawy x 2 pasy ruchu po 3,5 m	NATM	2023	GDDKiA	Nawierzchnia betonowa
11	Tunele w ciągu Południowej	Kraków, droga S-52	Tunel TS-04: 653	2 nawy x 3 pasy ruchu po 3,5 m	metoda stropowa z zastosowaniem ścian szczelinowych	2023	GDDKiA	Nawierzchnia betonowa
12	Obwodnicy Krakowa (POK)		Tunel TS-14: 496					
13	Tunele w ciągu obejścia	Milówka, droga S-1	Tunel TD-1: 834 / 807,08	2 nawy x 2 pasy ruchu po 3,5 m	NATM	2023	GDDKiA	Nawierzchnia betonowa
14	Węgierskiej Górki		Tunel TD-2: 984 / 974,96					

12296

Tunel pod masywem Luboń Mały, 2021

Nawierzchnia:

Pierwotnie:

- betonowa zbrojona, grubości 10 cm,
- płyta podjezdniowa, żelbetowa.

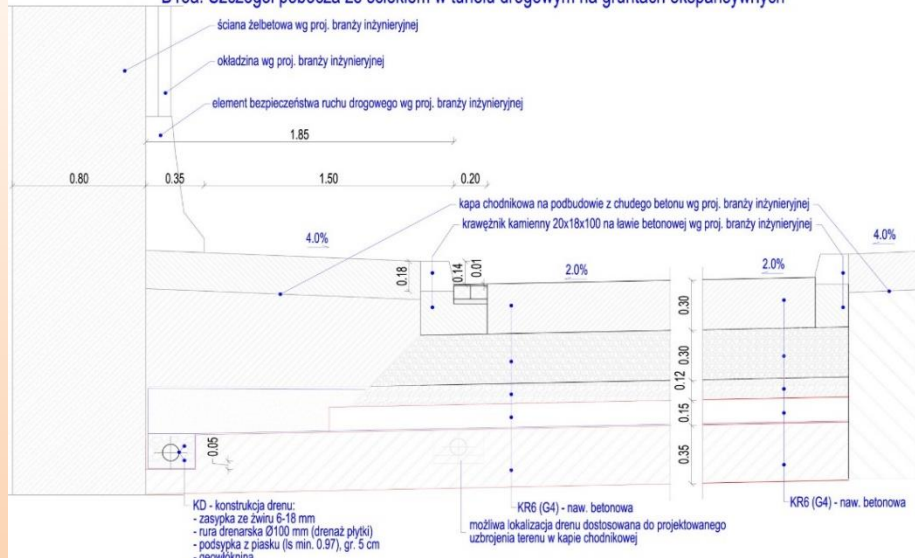
Aktualnie:

- warstwa ścieralna, AC, 4 cm,
- warstwa ochronna, 5-6 cm,
- płyta podjezdniowa, żelbetowa



Tunele w ciągu Trasy Łagiewnickiej, Kraków, 2022

B13a. Szczegół pobocza ze ściekiem w tunelu drogowym na gruntach ekspansywnych

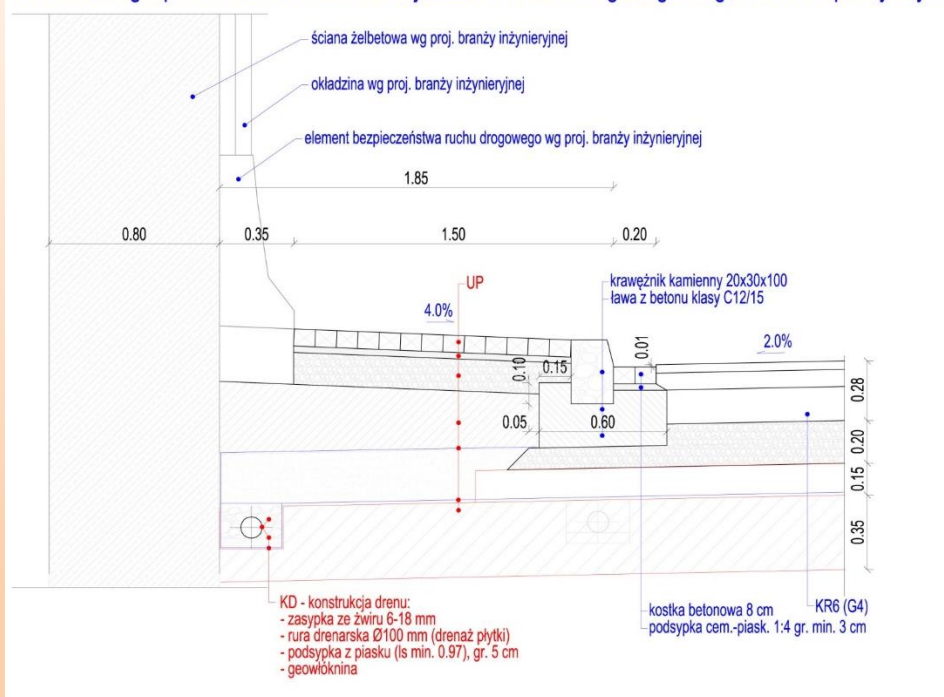


KR6 (G4) - nawierzchnia betonowa:

- warstwa nawierzchniowa z betonu cementowego, gr. 30cm
- warstwa podbudowy zasadniczej z mieszanki niezwiązanej z kruszywa C_{800} o module $E_{\geq 180}$ MPa, gr. 30 cm
- podbudowa pomocnicza z mieszanki niezwiązanej z kruszywa C_{800} o module $E_{\geq 120}$ MPa, gr. 12cm
- warstwa chudego betonu C6/9 (pełniąca również funkcję warstwy mrozochronnej), gr. 15cm
- warstwa odcinająca z geowłókniny
- warstwa ulepszonego podłoża z gruntu stabilizowanego spoiwem hydraulicznym wymagany $E_2 > 80$ MPa, gr. 35cm

Nawierzchnia w tunelu w Krakowie

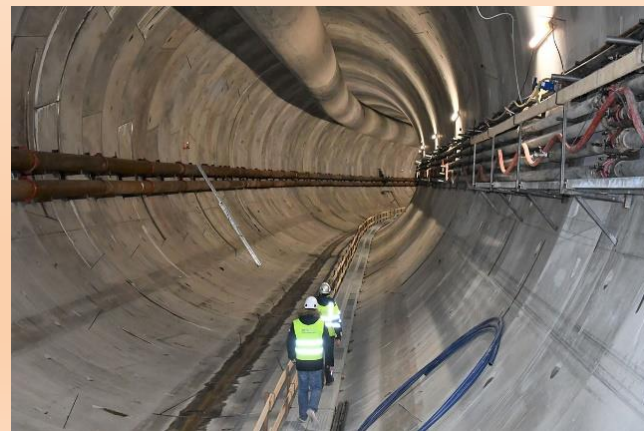
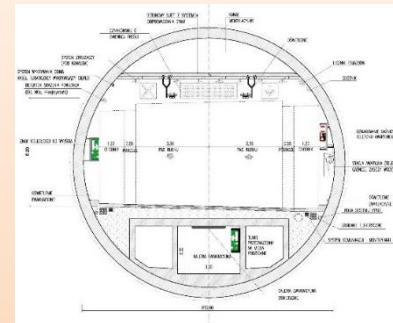
B14a. Szczegół pobocza ze ściekiem na dojeździe do tunelu drogowego na gruntach ekspansywnych



Tunel pod Świną, Świnoujście, 2023

Nawierzchnia:

- warstwa ściernalna, AC, 4 cm,
- warstwa ochronna, MA, 4 cm,
- izolacja,
- płyta podjezdniowa, 30 cm



Tunel pod pasmem Gór Wałbrzyskich, 2023

Nawierzchnia:

- beton cementowy, C35/45, 29 cm,
- warstwa poślizgowa, geowłóknina
- mieszanka związana cementem, C8/10, 20 cm
- mieszanka niezwiązana, CBR > 60%, 17 cm,
- warstwa odsączająca,
- doprowadzenie podłoża do G1.



Tunele w ciągu obejścia Węgierskiej Górki, 2023

Nawierzchnia:

- beton cementowy, C35/45, 27 cm,
- warstwa poślizgowa, geowłóknina
- mieszanka związana cementem, C8/10, 18 cm
- mieszanka niezwiązana, CBR > 40%, 17 cm,
- warstwa odsączająca, min. 19 cm

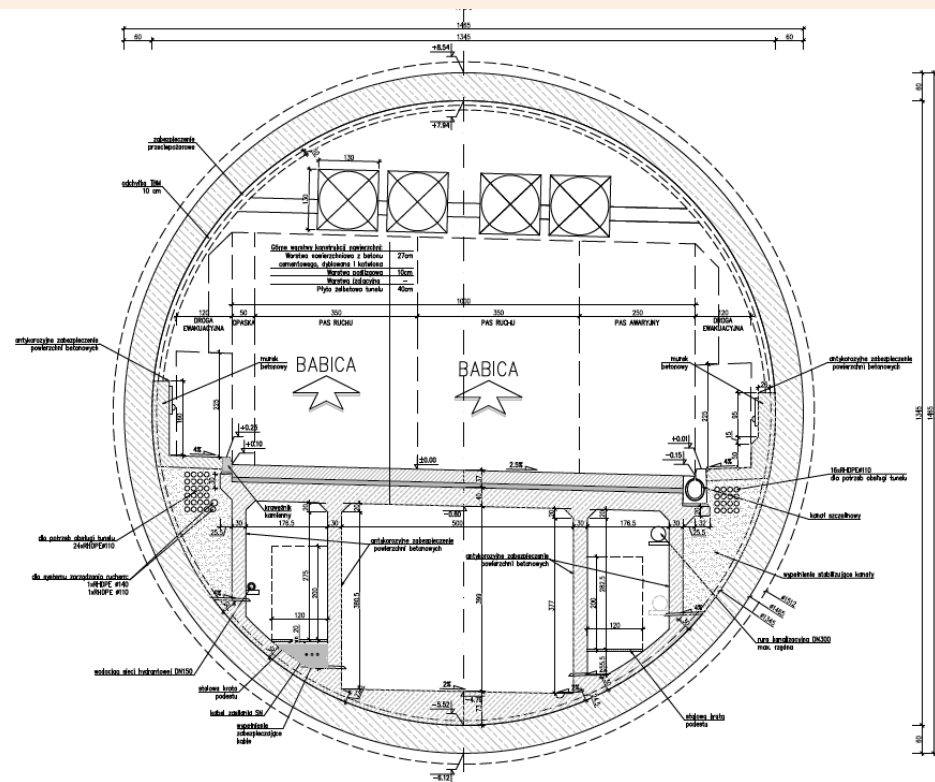
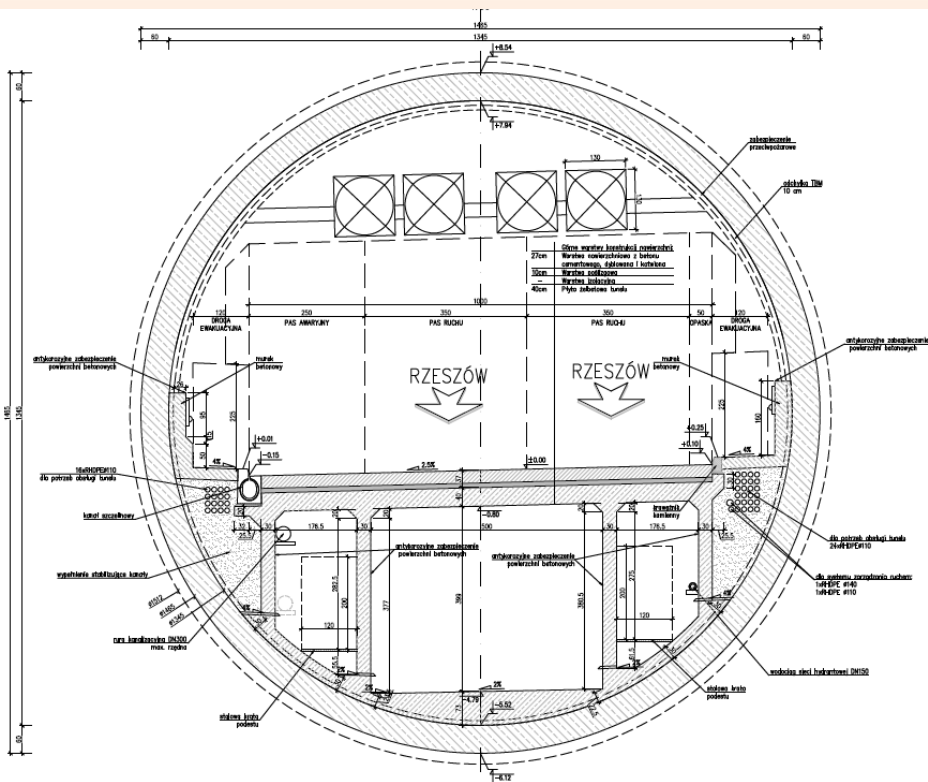


Tunele planowane (do 2026 r.)

Lp.	Nazwa	Lokalizacja, droga	Długość (m)	Szerokości użytkowe	Metoda budowy	Rok	Inwestor	Nawierzchnia
15	Tunel w ciągu Via Carpatii	Babica, droga S19	2255	2 nawy x 2 pasy ruchu po 3,5 m	TBM	2025	GDDKiA	Nawierzchnia betonowa
16	Tunele w ciągu Via Carpatii	Domaradz, droga S19	Tunel T2: 2 910	2 nawy x 2 pasy ruchu po 3,5 m	TBM	2026	GDDKiA	Nawierzchnia betonowa
17			Tunel T3: 988		NATM			
18	Tunele w Warszawie	Warszawa, droga S7	Tunel Bielany: 1000	2 nawy x 4 pasy ruchu po 3,5 m	metoda stropowa z zastosowaniem ścian szczelinowych	2026	GDDKiA	
19			Tunel Bemowo: 1123					
20	Tunel w ciągu Zachodniej Obwodnicy Szczecina	Szczecin, droga S6	~ 5000	2 nawy x 2 pasy ruchu po 3,5 m	TBM	2026	GDDKiA	

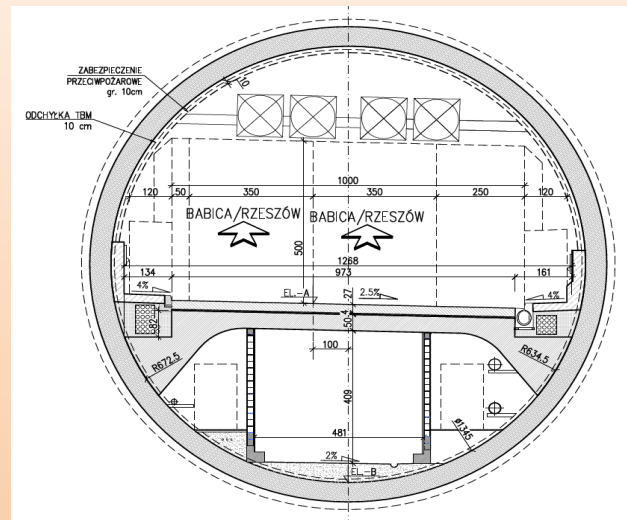
13289

Tunel T-1 w ciągu Via Carpatii, Babica, 2025



Tunel w ciągu Via Carpatii, Babica, 2025

- 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)
- Wniosek: konieczność ukształtowania płyty podjezdniowej



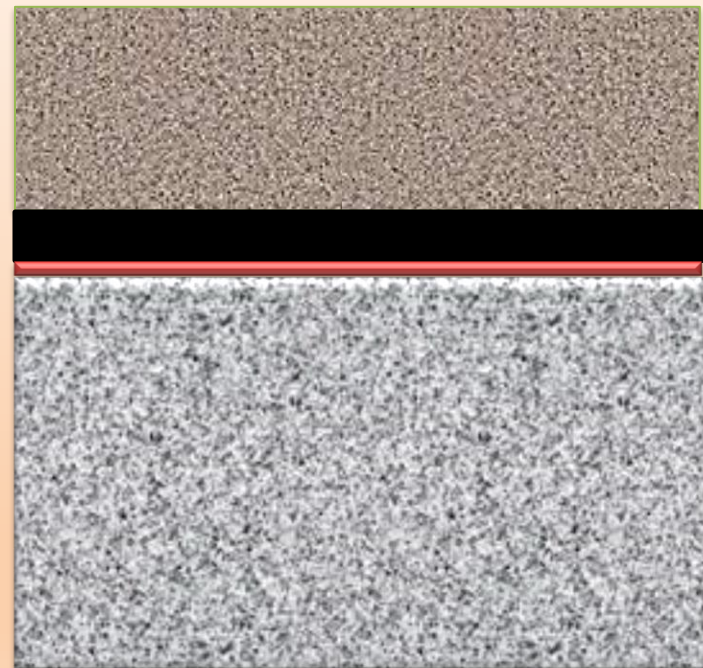
Tunel w ciągu Via Carpatii, Babica, 2025

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.

Tunel w ciągu Via Carpatii, Babica, 2025

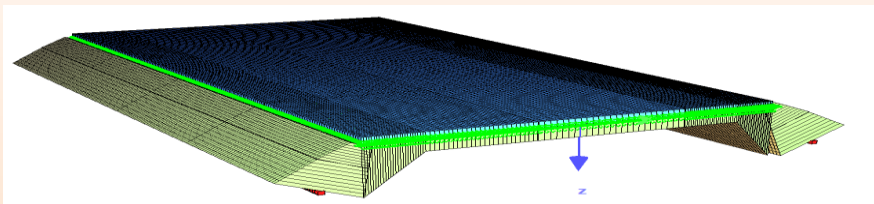
- I. **Warstwa nawierzchniowa:** beton cementowy, dyblowany i kotwiony, grubość 27 cm.
- II. **Warstwa poślizgowa:** mieszanka SMA-MA o uziarnieniu do 8 mm, grubość 4 cm.
- III. **Izolacja płyty podjezdniowej:** warstwa MMA, grubość 0,5 cm.
- IV. **Podłoże, płyta podjezdniowa:** beton cementowy, zbrojony, grubość 50 cm.



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

Model MES



- 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;

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 : $\pm \Delta T = 10^{\circ}\text{C}$ (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;

Ocena nośności doraźnej wg PN-EN-1991-2

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

$$\sigma_{td} < \alpha_{ct} \cdot f_{ct,fl} / \gamma_c \quad (1)$$

- 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 wg PN-EN 12390 - 5;
- $\gamma_c = 1,4$ – częściowy współczynnik materiałowy dla betonu dla sytuacji trwałej;

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)	Przęstowy	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)	Przęstowy	0,76	1,58	2,448		62,3
	Krawędziowy	0,84	1,46	2,448		62,3

Ocena trwałości zmęczeniowej wg KTKNS

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

$$\sigma_t < \sigma_{dop} = f_{ct,fl} \times (1 - 0,078 \log N) \quad (2)$$

- 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);

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

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

- 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** (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

Dziękuję za uwagę



Założenia do przeglądu