

CEMENTOBETÓNOVÉ VOZOVKY V TUNELOCH – TECHNICKÉ A PREVÁDZKOVÉ ASPEKTY NÁVRHU

CEMENT CONCRETE PAVEMENTS IN TUNNELS – TECHNICAL AND OPERATIONAL DESIGN ASPECTS

ANDREA ZUZULOVÁ

ABSTRAKT

Cementobetónové vozovky predstavujú spoľahlivé a trvácne riešenie v náročných podmienkach tunelových stavieb. Návrh konštrukcie vozovky musí zohľadňovať mechanické, environmentálne a ekonomické požiadavky, zahrňujúce stavebné náklady (vrátane projekčnej činnosti), náklady na budúcu stavebnú údržbu a zabezpečenie prevádzky. Príspevok sa zameriava na špecifický návrh a požiadavky výstavby a prevádzky cementobetónových vozoviek v tunelových úsekoch cestnej infraštruktúry. Analyzované sú výhody ako dlhá životnosť, vysoká únosnosť, znížené náklady na údržbu a zároveň sú popísané možné riziká súvisiace s bezpečnostnými požiadavkami v tuneloch.

ABSTRACT

Cement concrete pavements represent a reliable and durable solution under the demanding conditions of tunnel construction. The pavement design must take into account mechanical, environmental, and economic requirements, including construction costs (including design activities), future maintenance costs, and operational safety. This paper focuses on the specific aspects of design, as well as the construction and operational requirements of cement concrete pavements in tunnel sections of road infrastructure. It analyzes advantages such as long service life, high load-bearing capacity, and reduced maintenance costs, while also describing potential risks related to safety requirements in tunnels.

POŽIADAVKY NA VOZOVKY V CESTNÝCH TUNELOCH

V tuneloch ako v špecifických dopravných objektoch sa kladú vysoké nároky na konštrukciu vozovky. Pri výbere vozovky sa často porovnávajú dva typy konštrukcií, a to asfaltobetónové a cementobetónové. Oba typy majú svoje výhody a nevýhody, ktoré je potrebné vždy zvážiť s ohľadom na okrajové podmienky. Výber medzi asfaltovou a betónovou vozovkou by mal byť založený na špecifických požiadavkách projektu, klimatických podmienkach, dopravnom zaťažení, plánovanej dobe životnosti, možnosti údržby a opráv a dostupnosti finančných zdrojov.

Na vozovku je potrebné sa pozeráť v kontexte celého jej životného cyklu. Preto je potrebné implementovať postupy s významným akcentom na trvalo udržateľnú výstavbu a najmä správu. Udržateľnosť je jedným z kľúčových kritérií pre konštrukciu vozoviek. Nenáročná údržba, vysoká spoľahlivosť, dobrá životnosť a aj nehorľavosť a netoxičita prispievajú k bezpečnosti v tuneloch ako aj k celkovej udržateľnosti cestnej siete. Optimálna voľba by mala byť založená na dôkladnej analýze prevádzkových podmienok a finančných možností počas celej životnosti vozovky. Tieto špecifické požiadavky na kvalitu a vlastnosti vozoviek v tuneloch určujú národné a európske normy a technické predpisy. Vo viacerých krajinách, vrátane Nemecka, Rakúska, Belgicka, Francúzska alebo Švédska, sú tieto požiadavky veľmi prísne nastavené, vzhľadom na možné vyššie riziká bezpečnosti v tuneloch.

Aby bola zaistená bezpečnosť a spoľahlivá dopravná dostupnosť, je pre vozovku v tuneli nutný dobrý návrh a vhodný výber materiálov. Návrh vozovky musí prihliadať na mechanické, environmentálne a ekonomické požiadavky, zahrňajúce stavebné náklady (vrátane projekčnej činnosti), náklady na budúcu stavebnú údržbu a zabezpečenie prevádzky (tab.1) [1].

Preto je potrebné pri návrhu vozovky v tuneloch jasne formulovať všetky požiadavky. Z hľadiska prevádzkovej spôsobilosti sú to najmä [2]:

- rovnosť v priečnom aj pozdĺžnom smere;
- drsnosť a odolnosť proti vyhladzovaniu povrchu.

REQUIREMENTS FOR PAVEMENTS IN ROAD TUNNELS

Tunnels, as specific types of transport structures, place high demands on pavement construction. When selecting the pavement type, two main construction types are often compared: asphalt concrete and cement concrete. Both have their advantages and disadvantages, which must always be considered in light of the boundary conditions. The choice between asphalt and concrete pavement should be based on the specific project requirements, climatic conditions, traffic load, planned service life, maintenance and repair options, and the availability of financial resources.

Pavement should be viewed in the context of its entire life cycle. Therefore, it is necessary to implement procedures with a strong emphasis on sustainable construction and especially on sustainable management. Sustainability is one of the key criteria for pavement construction. Low maintenance requirements, high reliability, good durability, as well as non-flammability and non-toxicity contribute to tunnel safety and the overall sustainability of the road network. The optimal choice should be based on a thorough analysis of operational conditions and financial possibilities throughout the pavement's life cycle.

These specific requirements for the quality and properties of tunnel pavements are defined by national and European standards and technical regulations. In several countries, including Germany, Austria, Belgium, France, and Sweden, these requirements are set very strictly due to the potentially higher safety risks in tunnels.

To ensure safety and reliable traffic accessibility, a good design and appropriate material selection are essential for tunnel pavements. The pavement design must consider mechanical, environmental, and economic requirements, including construction costs (including design activities), future maintenance costs, and operational safety (see Table 1) [1].

Tab.1 Porovnanie vlastností krytu vozovky

Vlastnosť	Kryt vozovky	
	cementobetónový	asfaltový
Životnosť	30–40 rokov	8–10 rokov
Odolnosť voči teplotám	vysoká	nízka
Požiarna odolnosť	vysoká	nízka
Údržba	minimálna	pravidelná
Komfort jazdy	tvrdší povrch	vyšší komfort

Z hľadiska prevádzkovej výkonnosti je to mechanická účinnosť (únosnosť). Ďalšie požiadavky na tunelové vozovky z hľadiska neštandardných podmienok sú:

- dlhá životnosť (návrhové obdobie);
- malé nároky na údržbu a dlhé cykly obnovy (tvarová stálosť);
- svetelná odrazivosť povrchu (menšia energetická náročnosť);
- kryt vozovky z nehorľavého a netoxického materiálu.

Tieto požiadavky vyplynuli najmä z dopravných nehôd s následnými požiarimi v stredne dlhých a dlhých tuneloch, pri ktorých sa prejavili negatívne vlastnosti asfaltových zmesí (prenos horenia po povrchu vozovky), energetická náročnosť na prevádzku tunela (osvetlenie a vetranie) a bilancie nákladov na obnovu vozoviek (opravy a obnova v stiesnených podmienkach). Výber typu konštrukcie vozovky je podmienený aj ďalšími faktormi a nielen protipožiarnymi:

- prítomnosť a podiel nákladnej dopravy;
- možnosť prepravy nebezpečných vecí;
- možnosti alternatívnej trasy pri odstavení tunela pri opravách.



Obr. 1 Tunel Považský Chlmec s CB krytom vozovky
Fig. 1 Považský Chlmec tunnel with cement concrete pavement

Table 1 Comparison of pavement cover properties

Property	Pavement cover	
	cement concrete	asphalt concrete
Service life	30–40 years	8–10 years
Temperature resistance	high	low
Fire resistance	high	low
Maintenance	minimal	regular
Driving comfort	harder surface	higher comfort

Therefore, it is necessary to clearly define all requirements when designing pavement in tunnels. From the perspective of operational suitability, the key aspects are [2]:

- roughness in both transverse and longitudinal directions;
- surface roughness and resistance to polishing.

From the perspective of operational performance, mechanical efficiency (load-bearing capacity) is essential. Additional requirements for tunnel pavements, considering non-standard conditions, include:

- long service life (design period);
- low maintenance needs and long renewal cycles (shape stability);
- surface light reflectivity (lower energy demand);
- pavement cover made of non-flammable and non-toxic material.

These requirements have mainly arisen from traffic accidents followed by fires in medium and long tunnels, where the negative properties of asphalt mixtures became apparent (e.g., fire propagation along the pavement cover), the high energy demands of tunnel operation (lighting and ventilation), and the cost balance of pavement renewal (repairs and reconstruction in confined conditions).

The choice of pavement structure type is also influenced by other factors beyond fire resistance, such as:

- the presence and proportion of heavy traffic;
- the possibility of transporting hazardous materials;
- the availability of alternative routes during tunnel closures for maintenance.

Based on these requirements, cement concrete pavement is preferred especially in cases of high-intensity heavy truck traffic due to its long service life, brightness, durability of skid-resistant surfaces, and minimal repair needs over its lifespan.

In many countries (e.g., Czech Republic, Austria, Germany, Belgium, Slovenia, etc.), for tunnels longer than 1km, only cement concrete pavement is permitted from a safety perspective.

Currently, all operational tunnels in Slovakia are equipped with cement concrete pavement (see Fig. 1, Fig. 2), with the exception of the oldest tunnel, Stratená (opened in 1972, 325m long), which has an asphalt pavement.

ADVANTAGES OF CEMENT CONCRETE PAVEMENT

Cement concrete pavements are one of the key types of pavement structures, particularly suitable for demanding operational conditions where minimal maintenance is required in environments with limited accessibility and operational risks especially where good evacuation and rescue options are needed in case of fire. This is a rigid pavement type, where the main load-bearing function is concentrated in the surface layer, which distributes the load to the underlying layers.

Na základe týchto požiadaviek je preferovaná vozovka s cementobetónovým krytom, najmä pri vysokej intenzite ťažkej nákladnej dopravy, z hľadiska životnosti, jej svetlosti a trvanlivosti protišmykovej úpravy a v neposlednom rade minimálnymi opravami počas životnosti. Taktiež v mnohých krajinách (Česko, Rakúsko, Nemecko, Belgicko, Slovinsko, atď.) pri dĺžke tunela nad 1 km je možné z hľadiska bezpečnosti navrhnúť iba cementobetónovú vozovku. V súčasnosti je na Slovensku vo všetkých prevádzkovaných tuneloch iba cementobetónová vozovka (obr. 1, obr. 2), s výnimkou najstaršieho tunela Stratená (rok uvedenia do prevádzky 1972, dĺžka 325 m, asfaltová vozovka).

VÝHODY CEMENTOBETÓNOVÉJ VOZOVKY

Cementobetónové vozovky predstavujú jeden z kľúčových typov konštrukcií vozoviek, ktoré majú uplatnenie najmä v náročných prevádzkových podmienkach, kde sa vyžaduje minimálna údržba v prostredí s obmedzenou prístupnosťou a prevádzkovým rizikom, najmä možnosťou dobrej evakuácie a záchrany v prípade vzniku požiaru. Je to tuhý typ konštrukcie vozovky, kde sa hlavná nosná funkcia sústreďuje do krytu, ktorý roznáša zataženie do podkladových vrstiev. Typickými vlastnosťami cementobetónového krytu sú:

- modul pružnosti betónu: 37 500 MPa;
- pevnosť v ťahu pri ohybe: $\geq 4,5$ MPa;
- hrúbka CB dosky v tuneloch: 24–30 cm.

Životný cyklus stavby bude mať zásadný vplyv na čerpanie kapitálových nákladov pre správcu komunikácie, ako aj na ekonomické a spoločenské nároky spojené s prevádzkou stavby. Každá oprava si vyžaduje obmedzenie dopravy. V súčasnosti je možné, ako na asfaltobetónových, tak aj na cementobetónových vozovkách, robiť opravy rýchlo, ale žiadna z nich nie je finančne nenáročná. Taktiež každá oprava je v metodike hodnotenia aktuálneho stavu vozovky zafinancovaná ako porucha. Preto čím menej opráv, tým lepšia prevádzkyschopnosť vozovky. Asfaltový kryt vozovky má životnosť iba 8–10 rokov. Životnosť 25 rokov je životnosť podkladu asfaltovej vozovky, nie krytu. Cementobetónový kryt vozovky má životnosť rovnakú ako je životnosť celej vozovky, teda 30 rokov.



Obr. 2 Tunel Šibenik s CB krytom vozovky
Fig. 2 Šibenik tunnel with cement concrete pavement

Typical properties of cement concrete pavement include:

- modulus of elasticity of concrete: 37,500MPa;
- flexural tensile strength: ≥ 4.5 MPa;
- thickness of concrete slab in tunnels: 24–30cm.

The life cycle of the structure has a significant impact on capital expenditure for the road operator, as well as on the economic and social demands associated with the operation of the infrastructure. Every repair requires traffic restrictions. Today, repairs can be carried out relatively quickly on both asphalt and cement concrete pavements, but neither is inexpensive. Moreover, every repair is classified as a defect by the pavement condition assessment methodology. Therefore, the fewer the repairs, the better the operational performance of the pavement.

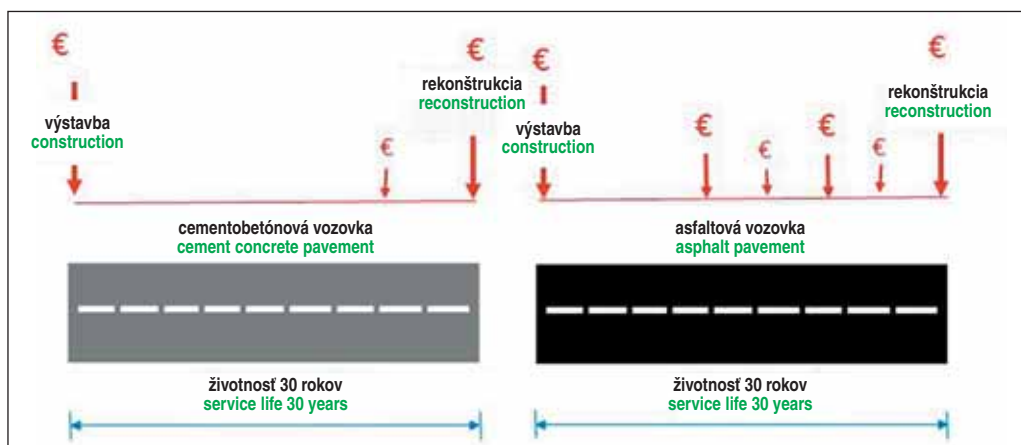
Asphalt pavement has a service life of only 8–10 years. The often-quoted 25-year lifespan refers to the base layer of the asphalt pavement, not the cover. Cement concrete pavement, on the other hand, has a service life equal to that of the entire pavement structure about 30 years.

Asphalt concrete pavements are about 15–20% less demanding in terms of technology and cost during construction compared to cement concrete. However, from an operational cost perspective, they are more expensive due to the need for at least 2 to 3 cover

replacements during their service life, each requiring traffic closures (see Fig. 3).

TECHNICAL CONDITIONS DETERMINING PAVEMENT DESIGN

The design, construction, operation, management, and maintenance of roads are governed not only by the relevant standards from the STN and STN EN systems but also by technical regulations approved by the Ministry of Transport of the Slovak Republic.



Obr. 3 Životný cyklus opráv (investícií) cementobetónovej a asfaltovej vozovky
Fig. 3 Life cycle of repairs (investments) for cement concrete and asphalt pavements

Asfaltobetónové vozovky sú pri realizácii technologicky a finančne menej náročné asi o 15–20 % v porovnaní s cementobetónovými. Z hľadiska prevádzkových nákladov sú finančne náročnejšie s nutnou uzáverou dopravy pri výmene krytu minimálne 2 až 3 krát počas životnosti (obr. 3).

TECHNICKÉ PODMIENKY ROZHODUJÚCE PRE NÁVRH VOZOVKY

Navrhovanie, realizácia, prevádzka, správa a údržba pozemných komunikácií sa okrem dotknutých noriem zo sústavy STN a STN EN riadi aj technickými predpismi rezortu, schválenými Ministerstvom dopravy SR.

Technické podmienky TP 033 „*Navrhovanie netuhých a polotuhých vozoviek*“ [2] a TP 098 „*Navrhovanie cementobetónových vozoviek na cestných komunikáciách*“ [3] obsahujú zásady návrhu konštrukčného usporiadania vozovky a postup pri posudzovaní dimenzií vrstiev a celej vozovky s uvážením zaťaženia od cestných vozidiel, únosnosti podlažia, vodného a teplotného režimu vozovky, ako aj klimatických podmienok. Základné kritériá, pomocou ktorých sa posudzujú konštrukcie vozoviek, sú diferencované podľa veľkosti dopravného zaťaženia, pričom sa rešpektujú štandardné a neštandardné vplyvy a podmienky v mieste stavby.

Pri procese rozhodovania v otázke výberu druhu krytu vozovky sú spracované technické podmienky TP 034 „*Metodika stanovovania finančných kritérií na výber hornej stavby vozoviek v cestnom staviteľstve*“ [5], ktoré určujú systematický postup výberu vozovky na základe objektívnych kvantifikovateľných ukazovateľov a kritérií definovaných aktuálnou úrovňou poznania v oblasti technických, ekonomických a ekologických faktorov výstavby a prevádzky cestných komunikácií. Technické podmienky určujú postup komplexného technicko-ekonomického posudzovania a porovnávania vozoviek podľa materiálno-konštrukčných charakteristík ich krytu. Postup zahŕňa:

- definovanie primárnych kritérií pre výber vozovky s cementobetónovým krytom;
- metódu a postup nákladovej analýzy životného cyklu vozoviek s rôznym typom krytu a metódu pre výpočet ekonomických indikátorov a ich spoľahlivosti;
- metódu posúdenia sekundárnych vplyvov a metódu pre výpočet ich závažnosti a spoľahlivosti;
- metódu pre konečný výber typu krytu vozovky podľa dosiahnutých výsledkov a ich spoľahlivosti.

V TP 034 je názorne spracované komplexné technicko-ekonomické posúdenie dvoch variantov a to asfaltovej a cementobetónovej vozovky. Hodnotenie je urobené dvomi spôsobmi, na základe primárnych kritérií a z hľadiska sekundárnych vplyvov.

Primárne kritériá umožňujú vybrať vozovku s cementobetónovým krytom bez ďalšieho posudzovania v prípade, ak ide sa o cestný úsek s ročným priemerom denných intenzít väčším ako 3 000 ťažkých nákladných vozidiel. Výber preferovaného typu krytu vozovky bol urobený na základe nákladovej analýzy životného cyklu stavby (LCCA – Life cycle cost analysis).

Výber preferovaného typu krytu vozovky z hľadiska sekundárnych vplyvov (PSV) je bodovým hodnotením. Vozovka s cementobetónovým krytom je preferovaná najmä pri vysokej intenzite ťažkej nákladnej dopravy, z hľadiska životnosti, jej svetlosti a trvanlivosti protišmykovej úpravy.

Ak preferovaný variant nebol vybraný na základe primárnych kritérií, LCCA a PSV poskytujú dostatok objektívnych indikátorov pre výber preferovaného variantu, keďže LCCA a PSV sú do istej miery založené na podobných vstupoch (investičné náklady, náklady na údržbu a rehabilitácie, objem dopravy, životnosť vozovky atď.).

Technical specifications TP 033 “*Design of flexible and semi-rigid pavements*” [2] and TP 098 “*Design of cement concrete pavements on roadways*” [3] contain principles for the structural design of pavements and procedures for assessing the dimensions of layers and the entire pavement structure, taking into account traffic loads, subgrade bearing capacity, water and temperature regimes, and climatic conditions. The basic criteria used to assess pavement structures are differentiated according to traffic load intensity, while also respecting standard and non-standard influences and conditions at the construction site.

In the decision-making process regarding the choice of pavement cover type, technical specification TP 034 “*Methodology for determining financial criteria for selecting pavement superstructures in road construction*” [5] provides a systematic approach to pavement selection based on objective, quantifiable indicators and criteria defined by the current level of knowledge in technical, economic, and environmental aspects of road construction and operation.

These technical specifications define the procedure for comprehensive technical-economic assessment and comparison of pavements based on the material and structural characteristics of their cover. The procedure includes:

- defining primary criteria for selecting cement concrete pavement;
- method and procedure for life-cycle cost analysis of pavements with different cover types, and the method for calculating economic indicators and their reliability;
- method for assessing secondary impacts and calculating their significance and reliability;
- method for final selection of pavement cover type based on the achieved results and their reliability.

TP 034 presents a clear and comprehensive technical-economic assessment of two pavement variants: asphalt and cement concrete. The evaluation is carried out in two ways based on primary criteria and secondary impacts.

The primary criteria allow for the selection of cement concrete pavement without further assessment if the road section has an average daily traffic volume exceeding 3,000 heavy goods vehicles. The preferred pavement type is selected based on a Life Cycle Cost Analysis (LCCA).

The selection based on secondary impacts (PSV) is done through a scoring system. Cement concrete pavement is preferred especially in cases of high heavy vehicle traffic, due to its long service life, surface brightness, and durability of skid resistance.

If the preferred variant is not selected based on primary criteria, the LCCA and PSV provide sufficient objective indicators for choosing the preferred option, as both are to some extent based on similar inputs (investment costs, maintenance and rehabilitation costs, traffic volume, pavement lifespan, etc.).

The Life Cycle Cost Analysis (LCCA) helps identify the preferred pavement type in terms of maximizing the efficiency of public spending (value for money). The Life Cycle Analysis (LCA) is the first step of LCCA and involves predicting the loss of functional performance (operational suitability and efficiency) of the pavement and planning rehabilitations that continuously extend its service life.

The methodology in TP 034 is applied to a case study comparing an asphalt pavement designed for $N_c = 27.48 \times 10^6$ standard axle passes. To maintain a 30-year service life for the asphalt pavement

Nákladová analýza životného cyklu stavby (LCCA) umožňuje identifikovať preferovaný variant realizácie typu krytu vozovky z hľadiska maximalizácie efektívnosti verejných zdrojov (hodnota za peniaze). LCA (Life Cycle Analysis) je prvým krokom LCCA a spočíva v predikcii straty funkčnej spôsobilosti (prevádzkovej spôsobilosti a prevádzkovej výkonnosti) vozovky a plánovaní rehabilitácií, ktoré kontinuálne predlžujú životnosť vozovky.

Metodika je aplikovaná v TP 034 na príklade asfaltovej vozovky namimenzovanej na počet prejazdov návrhovej nápravy $N_c = 27,48 \cdot 10^6$. Aby bolo možné zachovať životnosť asfaltovej vozovky (AC) na 30 rokov, je potrebná dôsledná aplikácia údržby a dve rehabilitácie (výmena asfaltového krytu) v priebehu životného cyklu (obr. 4). Analýza životného cyklu stavby LCA bola spracovaná na základe výstupov programu HDM-4 (Highway Development and Management) [7].

Metodika bola tiež aplikovaná na nevystuženú cementobetónovú vozovku (JPCP) s klznými ocelovými tržmi s počtom prejazdov návrhovej nápravy $N_c = 31,93 \cdot 10^6$. Počas životného cyklu sú nutné iba opravy sanačnou hmotou a výmena zálievok škár, kryt ostáva počas celej životnosti vozovky (obr. 5).

Vyššie uvedené typy vozoviek (asfaltobetónovej a cementobetónovej) na diaľnici boli umiestnené v tuneli, čo predstavuje neštandardné podmienky. Z hľadiska LCCA sú prepočítané dané typy konštrukcií vozoviek a z ich porovnania je preferovaný variant cementobetónovej vozovky. Čistá súčasná hodnota zníženia nákladov životného cyklu pri výbere cementobetónovej vozovky je 31 374 028 mil. € (obr. 6). Vnútorne výnosové percento je 53,49 %.

Technické podmienky TP 115 „Osvetlenie cestných tunelov“ [6] definujú zásady a požiadavky pre osvetlenie tunela. Pri potrebe osvetlenia cestného tunela sa rozlišuje krátky tunel alebo dlhý tunel. Požiadavky na osvetlenie dlhých a krátkych tunelov sa líšia podľa schopnosti prichádzajúcich vodičov vidieť cez tunel zo vzdialenosti rovnajúcej sa celkovej brzdnéj dráhe pred vstupným portálom. V TP sa odporúča, aby sa pri vjazde obmedzili svetlé povrchy a povrch vozovky pred portálmi by mal byť čím tmavší (využitie tieňu) a povrch

(AC), consistent maintenance and two rehabilitations (replacement of the asphalt cover) are required during its life cycle (see Fig. 4). The Life Cycle Analysis (LCA) was conducted using outputs from the HDM-4 (Highway Development and Management) program [7].

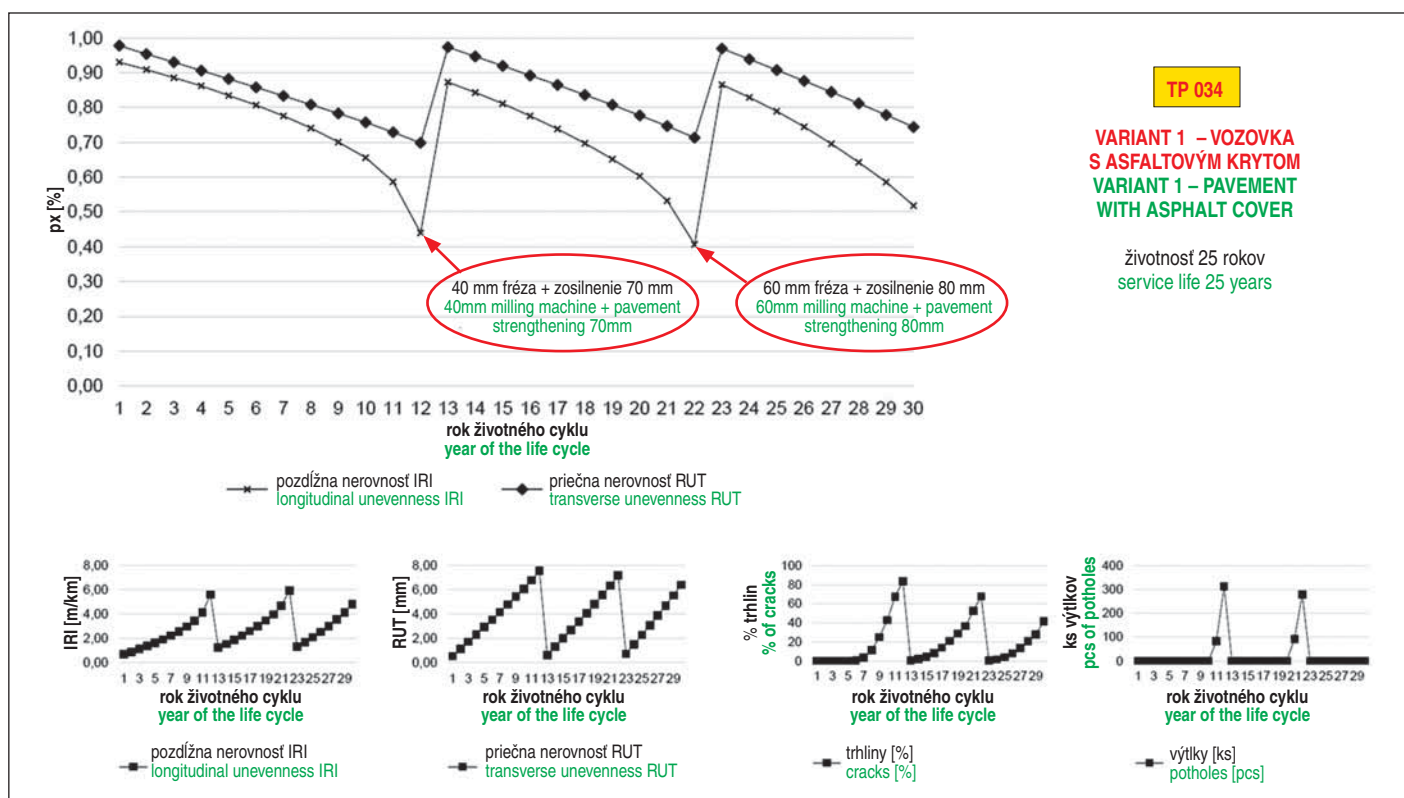
The methodology was also applied to an unreinforced cement concrete pavement (JPCP) with sliding steel dowels, designed for $N_c = 31.93 \times 10^6$ axle passes. Over its life cycle, only minor repairs with patching material and joint sealant replacements are needed, while the pavement cover remains intact throughout its entire service life (see Fig. 5).

Both pavement types (asphalt and cement concrete) were considered in a tunnel environment, which represents non-standard conditions. From the LCCA perspective, the recalculated pavement structures show a preference for cement concrete pavement. The net present value (NPV) of life cycle cost savings when choosing cement concrete pavement is €31,374,028 million (see Fig. 6), with an internal rate of return (IRR) of 53.49%.

Technical specification TP 115 “Lighting of Road Tunnels” [6] defines the principles and requirements for tunnel lighting. It distinguishes between short and long tunnels, with lighting requirements based on the driver’s ability to see through the tunnel from a distance equal to the total braking distance before the entrance portal. TP 115 recommends limiting bright surfaces at the tunnel entrance, using darker pavement before the portal (to benefit from shading), and light-colored pavement inside the tunnel.

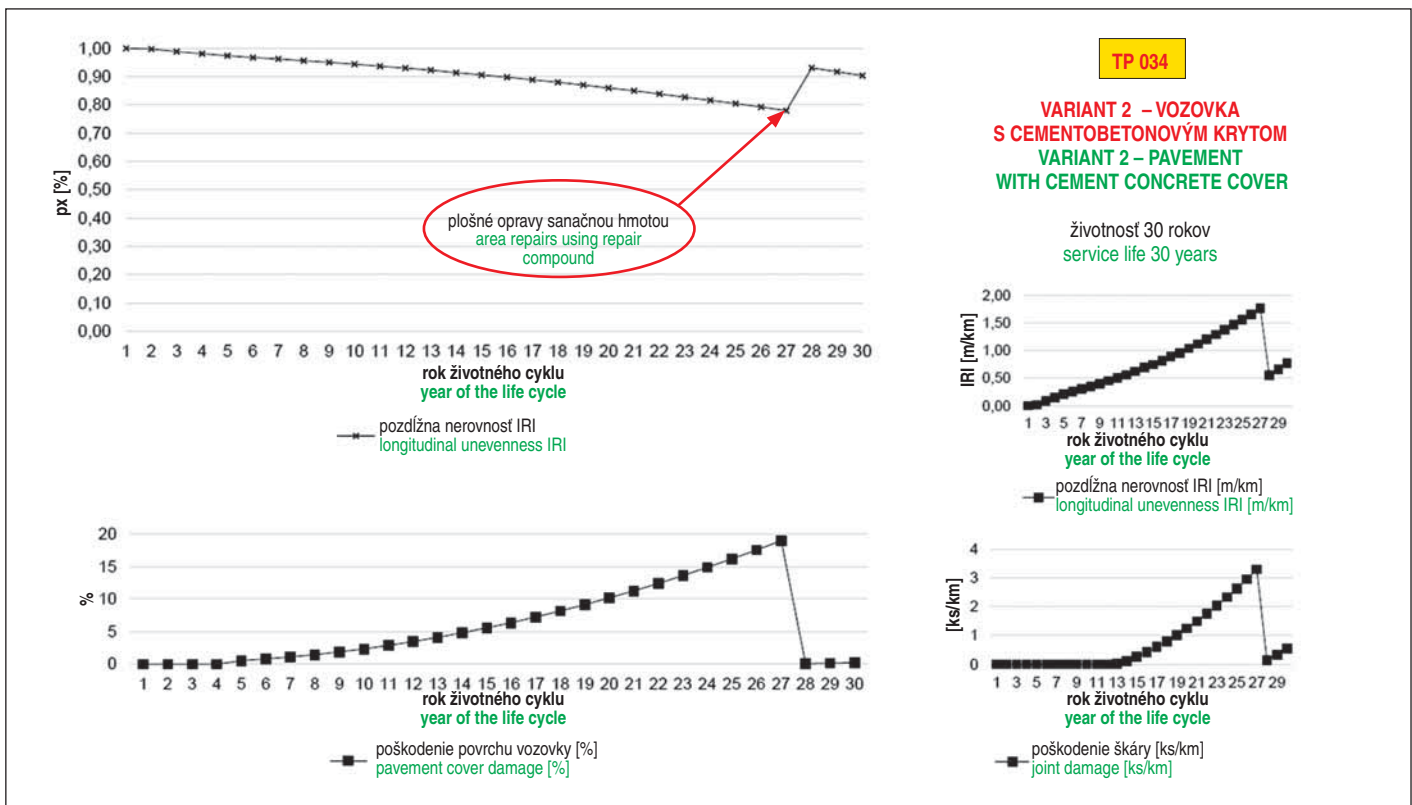
This highlights a key advantage of cement concrete, which is naturally light in color, has favorable optical surface properties, improves visibility, and reduces energy consumption for tunnel lighting.

TP 024 “Pavement Management System” [4] is a tool for effective budget allocation in pavement management, including



Obr. 4 Vývoj premenných parametrov vozovky v priebehu životného cyklu – Variant AC (TP 034)

Fig. 4 Development of variable pavement parameters over the life cycle – AC Variant (TP 034)



Obr. 5 Vývoj premenných parametrov vozovky v priebehu životného cyklu – Variant CB (TP 034)
 Fig. 5 Development of variable pavement parameters over the life cycle – CB Variant (TP 034)

vozovky vo vnútri tunela má byť svetlý. Z uvedeného vyplýva, že cementobetón je prirodzene svetlej farby a má priaznivé optické vlastnosti povrchu, lepšiu viditeľnosť a vyžaduje menej energií na verejné osvetlenie.

Technické podmienky TP 024 „Systém hospodárenia s vozovkami“ [4] sú nástrojom na efektívne delenie rozpočtu pri správe vozoviek,

maintenance, repair, and reconstruction. The system ensures efficient use of financial resources by road administrators. It provides information on the operational suitability and performance parameters of road pavements, taking into account technical, traffic, and economic factors, and defines the processes for maintenance and repair.

Z hľadiska LCCA je preferovaný Variant 2 – cementobetónová vozovka, JPCP
 From the perspective of LCCA (Life-Cycle Cost Analysis), Variant 2 – cement concrete pavement, JPCP is preferred
 Čistá súčasná hodnota zníženia nákladov životného cyklu pri výbere Variantu 2 je 31 374,028 mil. €
 The net present value of life-cycle cost savings when choosing Variant 2 is €31,374.028 million
 Vnútorne výnosové percento pri výbere Variantu 2 je 53,49 %
 The internal rate of return for Variant 2 is 53.49%

Tabuľka 35 – Posúdenie sekundárnych vplyvov
 Table 35 – Assessment of secondary impacts

Sekundárne vplyvy Secondary impacts	Vozovky s asfaltovým krytom Pavements with asphalt cover	Vozovky s cementobetónovým krytom Pavements with cement concrete cover
1a geotechnické a hydrogeologické pomery geotechnical and hydrogeological conditions stabilné podložie stable subgrade	0	0
2b stredné intenzity ťažkej nákladnej dopravy medium intensity of heavy freight traffic	2	1
5 uplatnenie v tuneloch use in tunnels	0	0
6 skúsenosť s výstavbou a údržbou cesty experience with road construction and maintenance	2	1
7 nezávislosť na surovinách dovážaných zo zahraničia independence from raw materials imported from abroad	1	3
8 životnosť vozovky pavement service life	1	4
9a časová a technologická náročnosť opráv lokálnych time and technological demands of local repairs	2	1
9b v súvislých úsekoch in continuous sections	3	1
10 nezávislosť výstavby a opráv konštrukcie na meteorologických vplyvoch independence of construction and repairs from weather conditions	2	1
11 možnosť recyklácie pri rekonštrukcii vozovky possibility of recycling during pavement reconstruction	0	0
12 komfort jazdy ride comfort	0	0
13 protismykové vlastnosti povrchu po uvedení do prevádzky skid resistance of the cover after commissioning	2	1
14 trvanlivosť protismykovej úpravy povrchu durability of skid-resistant surface treatment	1	3
15 svetlosť povrchu vozovky pavement cover brightness	1	3
16 hlučnosť povrchu na novo budovaných pozemných komunikáciách noise level of the cover on newly built roads	3	2
17a dopad na životné prostredie v súvislosti s výstavbou environmental impact related to construction	0	0
17b počas životnosti environmental impact during service life	1	3
bodová hodnota posúdenia sekundárnych vplyvov point score for secondary impact assessment	CBHSV _{as} 21	CBHSV _{cb} 24

TP 034

IDSV = 30.61

Tabuľka 36 – Hodnotenie spoľahlivosti výsledku LCCA
 Table 36 – Reliability assessment of LCCA results

VVP _o [%]	(ČSHZ _o / SHNZ _o) 100, [%]	Spôľahlivosť výsledku LCCA Reliability of LCCA results
45 – 60	1 – 3	vysoká high

Tabuľka 37 – Hodnotenie spoľahlivosti výsledku LPSV
 Table 37 – Reliability assessment of LPSV results

IDSV	Závažnosť a spoľahlivosť výsledku PSV Severity and reliability of PSV results
30 – 40	vysoká high

Tabuľka 38 – Výber variantu typu krytu vozovky
 Table 38 – Selection of pavement cover type variant

Spôľahlivosť výsledku LCCA Reliability of LCCA results	Závažnosť a spoľahlivosť výsledku PSV Severity and reliability of PSV results	Výber variantu typu krytu vozovky Selection of variant of pavement cover type
vysoká high	veľmi nízka very low	výber podľa záverov LCCA a PSV selection based on LCCA and PSV conclusions
	nízka low	
	primerená adequate	
	vysoká high	
	veľmi vysoká very high	

je vybraný Variant 2 – vozovka s cementobetónovým krytom, JPCP
 the selected variant 2 is the pavement with cement concrete cover, JPCP

Obr. 6 Posúdenie sekundárnych vplyvov pre vozovky na diaľnici v tuneli (TP 034)
 Fig. 6 Assessment of secondary impacts for highway pavements in a tunnel (TP 034)

so zahrnutím údržby, opravy a rekonštrukcie vozovky. Systém zabezpečuje efektívne čerpanie finančných prostriedkov pre správcov komunikácií. Obsahuje informácie o parametroch prevádzkovej spôsobilosti a prevádzkovej výkonnosti cestnej vozovky pri zohľadnení technických, dopravných a ekonomických činiteľov a určuje proces údržby a opráv. Preto je dôležité už v návrhu konštrukcie vozovky zapracovať aj hľadisko analýzy nákladov životného cyklu spojených so správou vozoviek počas celej životnosti a tiež triedu dopravného zaťaženia a počet prejazdov návrhových náprav počas celej životnosti vozovky.

Možnosť použitia asfaltových zmesí do tunela umožňuje dodatok k technicko-kvalitatívnym podmienkam TKP 26, podložený rozborovou úlohou (RÚ) „Analýza možností použitia asfaltových zmesí v cestných tuneloch z hľadiska ich protipožiarnej bezpečnosti“ [8]. Cieľom RÚ bolo preukázať možnosť použitia asfaltových zmesí v cestných tuneloch bez zníženia ich bezpečnosti z hľadiska požiarnej ochrany. Rozborová úloha poukazuje na to, že horenie asfaltu je mimoriadne komplikovaný fyzikálno-chemický dej, pri ktorom postupne dochádza k zahrievaniu, rozkladu, vznieteniu a spaľovaniu, za vzniku dymu, ako následok nedokonalého spaľovania jednotlivých zložiek asfaltu. Ale nevylučuje jeho horenie. Horenie asfaltu rozdeľuje do troch fáz v závislosti od zvýšenia teploty.

Rozborová úloha rieši iba jedno hľadisko, a to horľavosť asfaltu (asfaltových zmesí), nezaobrá sa komplexne hľadiskom mechaniky a navrhovania vozoviek. Nie je možné iba na základe horľavosti asfaltu stanoviť vhodnosť použitia daného typu krytu do tunelov. RÚ nerieši ani ekonomickú efektívnosť, preto tvrdenie o znížení finančných nákladov je nepodložené a mylné.

ZÁVER

Cementobetónové vozovky v tuneloch predstavujú spoľahlivé, trvácne a udržateľné riešenie pre moderné dopravné projekty s vysokou životnosťou, pevnosťou a odolnosťou voči extrémnym podmienkam. Ich využitie má opodstatnenie najmä v tunelových úsekoch, kde sú prevádzkové, bezpečnostné a údržbové požiadavky mimoriadne prísne.

K návrhu konštrukcií vozoviek treba pristupovať systémovo a komplexne. Preto je dôležité už pri návrhu vozovky zapracovať aj hľadisko analýzy nákladov životného cyklu spojených so správou vozoviek počas celej životnosti. V platných predpisoch a normách je nastavený systém zabezpečujúci efektívne čerpanie finančných prostriedkov pre správcov komunikácií, ktorým je potrebné sa riadiť.

Príspevok vznikol s podporou projektu VEGA 1/0463/24 „Implementácia inovatívnych riešení a technológií v systémovom prístupe navrhovania vozoviek“.

doc. Ing. ANDREA ZUZULOVÁ, PhD.,
andrea.zuzulova@stuba.sk,
STU v Bratislave, Stavebná fakulta

Recenzoval *Reviewed:* Ing. Miloslav Frankovský

Therefore, it is important to incorporate life cycle cost analysis into the pavement design phase, considering the entire lifespan of the pavement, the traffic load class, and the number of standard axle passes over its lifetime.

The possibility of using asphalt mixtures in tunnels is addressed in an addendum to the technical-quality conditions TKP 26, supported by the analytical study (RÚ) “*Analysis of the Possibility of Using Asphalt Mixtures in Road Tunnels from the Perspective of Fire Safety*” [8]. The aim of this study was to demonstrate that asphalt mixtures can be used in road tunnels without compromising fire safety.

The study points out that asphalt combustion is a highly complex physico-chemical process, involving gradual heating, decomposition, ignition, and burning, accompanied by smoke due to incomplete combustion of asphalt components. However, it does not rule out the possibility of asphalt burning. The combustion process is divided into three phases, depending on the temperature increase.

Importantly, the study addresses only the flammability of asphalt (and asphalt mixtures) and does not comprehensively consider pavement mechanics or structural design. Therefore, it is not sufficient to determine the suitability of asphalt pavement in tunnels based solely on flammability. The study also does not evaluate economic efficiency, making any claims about cost savings are unsupported and misleading.

CONCLUSION

Cement concrete pavements in tunnels represent a reliable, durable, and sustainable solution for modern transport projects, offering high service life, strength, and resistance to extreme conditions. Their use is particularly justified in tunnel sections, where operational, safety, and maintenance requirements are exceptionally strict.

Pavement structure design must be approached systematically and comprehensively. Therefore, it is essential to incorporate life cycle cost analysis already at the design stage, considering the full lifespan of the pavement. Existing regulations and standards provide a framework that ensures the efficient use of financial resources by road administrators and should be followed accordingly.

This paper was developed with the support of the VEGA project 1/0463/24: “*Implementation of Innovative Solutions and Technologies in a Systemic Approach to Pavement Design*.”

doc. Ing. ANDREA ZUZULOVÁ, PhD.,
andrea.zuzulova@stuba.sk,
STU v Bratislave, Stavebná fakulta

LITERATURA / REFERENCES

- [1] TP 033 Navrhovanie netuhých a polotuhých vozoviek, MD SR, 2009.
- [2] ŠRÁMEK, J., DECKÝ, M., ZUZULOVÁ, A. a kol. *Trvaloudržateľná výstavba a správa tunelových vozoviek*, EDIS ŽU, 2021, ISBN 978-80-554-1791-2.
- [3] TP 098 Navrhovanie cementobetónových vozoviek na cestných komunikáciách, MD SR, 2015.
- [4] TP 024 Systém hospodárenia s vozovkami, MD SR, 2006.
- [5] TP 034 Metodika stanovenia finančných kritérií na výber hornej stavby vozoviek v cestnom staviteľstve, MD SR, 2023.
- [6] TP 115 Osvetlenie cestných tunelov, MD SR, 2020.
- [7] TP 057 Metodika pre používanie HDM v podmienkach SR, MD SR 2018.
- [8] VUIS – CESTI, *Rozborová úloha – Analýza možností použitia asfaltových zmesí v cestných tuneloch z hľadiska ich protipožiarnej bezpečnosti*, Slovenskej správy ciest, Bratislava 2021.