

Odolnost asfaltových vozovek na kongresu Eurasphalt & Eurobitume

V Evropské unii se v posledních letech diskutuje o odolnosti klíčových odvětví před různými hrozbami. V roce 2023 nabyla účinnost směrnice EU o odolnosti 11 kritických subjektů „Critical Entities Resilience“ (CER). Má být implementována do července 2026. Jejím cílem je snížit zranitelnost a posílit odolnost proti hrozbám přírodního rázu, terorismu, hybridních anebo vnitřních hrozeb a sabotáže. Jedním z odvětví, uvedených v CER, je dopravní infrastruktura. Proto byla na programu kongresu také odolnost.

Odolnost (Resilience) byla tématem semináře číslo 9 ve čtvrtek 20. 6. 2024. Úvodní 5minutovou prezentaci měla paní Inge van Vilsteren z Holandska. Nejprve definovala, co pojem Resilience znamená. Její definice byla obdobná jako definice ve zprávě EAPA Defining the Resilience of Asphalt vydané v květnu 2024. Tato zpráva je dostupná na webové stránce EAPA na <https://eapa.org/download/18042/?tmstv=1711615471>.

Ve zprávě EAPA se vychází z definice odolnosti uvedené ve zprávě OSN. Obecně jde o soubor zásad, klíčových akcí a pokynů, jak zlepšit odolnost a kontinuitu kritických služeb, jako je energie, doprava, voda, odpadní voda, odpad a digitální komunikace, umožňujících jejich efektivní fungování. Odolnost silniční infrastruktury je včasná a účinná prevence, vstřebání změn, zotavení, adaptace a transformace základních struktur národní infrastruktury, které byly vystaveny rizikům.

Podobně je odolnost silniční infrastruktury proti klimatickým změnám a extrémním jevům definována ve stručném dokumentu americké státní silniční správy (Federal Highway Association FHWA) z roku 2014 (<https://www.fhwa.dot.gov/legisregs/directives/orders/5520.cfm#par6>), kde se uvádí: „Resilience je schopnost předvídat, připravit se, přizpůsobit se měnícím se podmínkám, odolat, reagovat a rychle se zotavit z narušení.“ (V roce 2023 vypracovala FHWA podrobnější zprávu o odolnosti

vozovek s názvem „Pavement resilience, State of the practice“ FHWA-HIF-23-006, která je dostupná na internetu.)

Obecně je tedy možné odolnost stručně definovat jako schopnost systému vyrovnat se se změnou a pokračovat v rozvoji. V úvodní prezentaci paní Vilsteren na semináři kongresu bylo toto přehledně znázorněno (obrázek 1).

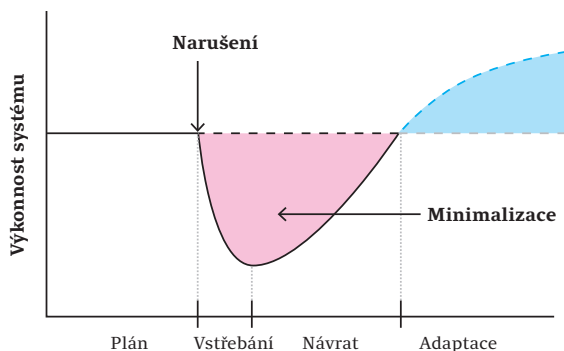
Složky odolnosti proti změně klimatu jsou zjednodušeně zobrazeny na obrázku 2, vycházejícího z prezentace paní Vilsteren. Bližší informace k tomuto schématu a k týmu „Climate resilience“, který se touto tematikou zabývá na univerzitě v holandském Wageningen, jsou dostupné na <https://www.wur.nl/en/research-results/research-institutes/environmental-research/meet-our-teams/climate-resilience.htm>.

Ve sborníku z kongresu byly do odborného tématu číslo 10 „Resilience“ zařazeny jen 2 příspěvky. Ty byly na semináři číslo 9 prezentovány. Velmi zajímavá byla prezentace i příspěvek ve sborníku o škodách na silniční síti v Turecku po zemětřesení v roce 2023 [1]. Ten obsahoval také řadu fotografií ukazujících rozsah poškození komunikací. Další turecká prezentace se zabývala vlivem zvyšování hladiny moře na silniční síť na pobřeží USA [2]. Souvisí to s tím, že jeden z autorů působí na univerzitě v Miami na Floridě. K analýze byla v [2] použita americká metoda navrhování vozovek, která se značně liší od naší návrhové metody. Proto je o tomto příspěvku zde referováno jen stručně.

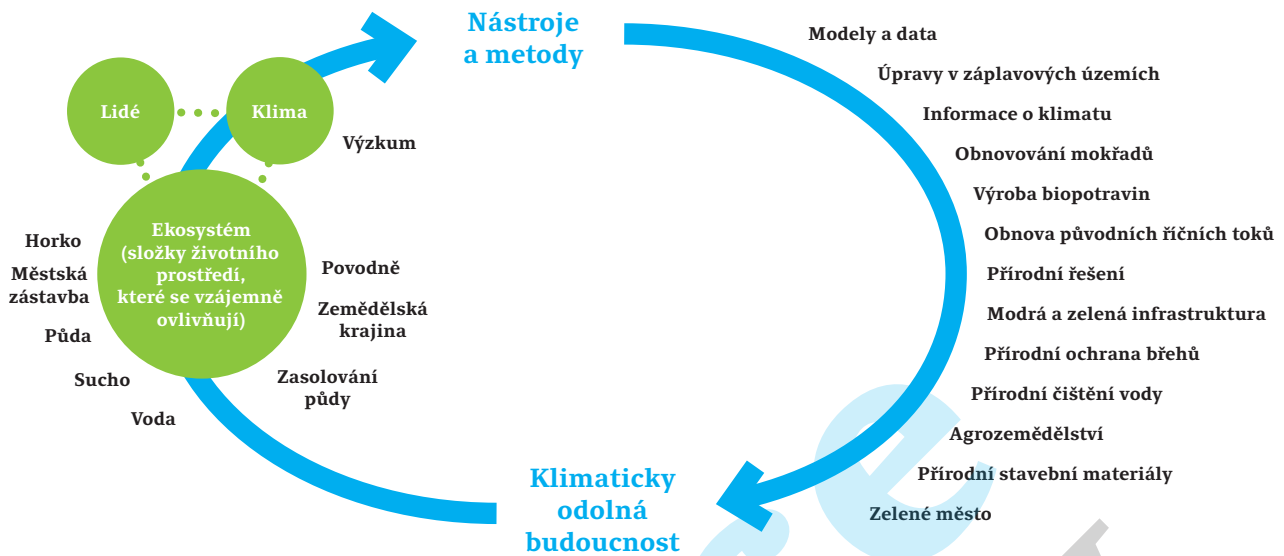
Dále byly na 9. seminář kongresu zařazeny 2 prezentace, které byly ve sborníku uvedeny v jiném odborném tématu, ale s odolností asfaltových vozovek souvisí. První z nich byl společný příspěvek 7 portugalských a španělských odborníků, zabývajících se možnostmi detekce trhlin v asfaltových směsích při opakovaném zatěžování [3]. Jejich příspěvek je ve sborníku v tématu 1 „Vlastnosti a zkoušení asfaltových směsí“. Druhý byl příspěvek polských autorů [4] o návrhu vozovek s dlouhou životností. Tento příspěvek byl ve sborníku v tématu 5 „Future roads and mobility“.

Po těchto prezentacích byla na semináři o odolnosti také diskuse, ve které vystoupilo několik účastníků, včetně pisatele tohoto textu. Jejich příspěvky byly krátké, reagovaly na předchozí vystoupení a zabývaly se některými dílčími otázkami odolnosti a navrhování vozovek.

Odolnost



Obrázek 1: Princip odolnosti systému [Vilsteren I., session 9, E&E Congress 2024]



Obrázek 2: Složky odolnosti proti klimatickým změnám, zjednodušeně dle [Vilsteren I., session 9 Resilience, E&E Congress 2024]

V článku [1] byly popsány následky dvou zemětřesení v jihovýchodním Turecku v únoru 2023, která měla magnitudo 7,8 a 7,5 podle RichtEROVY stupnice. Zemětřesení této síly vyvolává vážné škody na velkých oblastech. Druhé zemětřesení následovalo 9 hodin po prvním. Po těchto dvou velkých otřesech došlo ještě k více než 9 000 otřesům větších než magnitudo 6. Zasažena byla silniční síť asfaltových vozovek celkové délky 9 154 km v 11 provinciích. Kromě toho byly postiženy betonové vozovky na několika letištích. Naměřená zrychlení při zemětřesení byla vyšší, než je referenční špičkové zrychlení dle turecké normy pro seismické zatížení staveb. Během otřesů došlo k vodorovnému posunu terénu až o 5 metrů. Nejdelší souvislý posun byl v délce cca 300 km. Ve dvou provinciích byly trhliny a poklesy na vozovkách až do 2,5 m.

Ke škodám došlo na 61 km dálnic, 71 km silnic, 11,7 km tunelů a 7 km mostů, z nichž některé se zřítily. Byl implementován nou-

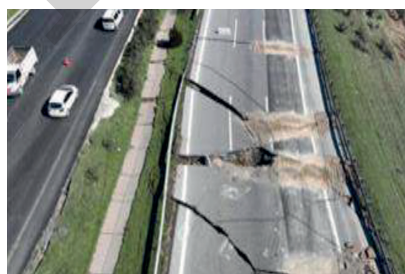
zový plán. Již po týdnu byly komunikace zprovozněny tak, aby umožnily pohyb vozidel s pomocí do postižených oblastí. Pro poškozené mosty, které nemohly být rychle uvedeny do provozu, byly vybrány náhradní objízdné trasy.

Zemětřesení vyvolalo několik druhů škod infrastruktury. Došlo k poškození vozovek i podloží, narušily nebo poškodily se odvodňovací systémy podél silnic, včetně propustků a záchytných nádrží. To vedlo k hromadění vody, promáčení podloží a k dalším škodám na vozovkách. Došlo k sesuvům svahů, posunutí nebo zhroucení mostních prvků, včetně pilířů a opěr. V tunelech popraskaly stěny. Tyto škody významně ovlivnily funkčnost, bezpečnost a provozuschopnost silniční sítě.

Způsobené škody jsou v literatuře [1] dokumentovány řadou fotografií. Zde jsou pro ilustraci převzaty 3 fotografie poruch asfaltových vozovek a 2 fotografie poškození betonových vozovek na letištích.



Obrázek 3: Sesuv násypu a porušení vozovky [1]



Obrázek 4: Potrhání asfaltové vozovky [1]



Obrázek 5: Příčná trhlina a pokles asfaltové vozovky [1]



Obrázek 6: Lokální porušení betonové vozovky [1]



Obrázek 7: Rozsáhlé porušení betonové vozovky [1]

Tabulka 1: Kritéria porušení použítá při analýze dopadů zvyšování hladiny vod na Floridě v [2]

Druh porušení	Dálnice	Hlavní	Vedlejší
IRI (in/mile)	172,0	172,0	172,0
Trvalá deformace vozovky (in)	0,40	0,50	0,65
Únavové trhliny zdola nahoru (% plochy)	10,0	20,0	35,0
Únavové trhliny shora dolů (% plochy)	10,0	20,0	35,0
Trvalá deformace asfaltových vrstev (in)	0,15	0,20	0,25

Prvním krokem při odstraňování následků zemětřesení bylo odklizení trosk blokujících silnice. Následovalo odtěžení sesutých materiálů, provedení nových násypů a podloží vozovek. Navzdory náročným zimním podmínkám byly ihned realizovány i nové asfaltové vrstvy, aby bylo možné komunikace znovu otevřít pro provoz. Přitom se využil i R-materiál z poškozených asfaltových vozovek. Pokládka nových asfaltových vrstev vozovky se prováděla i v noci. Rychlé opravy umožnily, že většina poškozených úseků vozovek byla provizorně zprovozněna do 5 dnů po zemětřesení. Koordinovaným úsilím se podařilo funkčnost silniční sítě obnovit. Poruchy na betonových vozovkách letišť byly opraveny asfaltovým materiálem, aby bylo možné rychle obnovit provoz také na letištích. Celkově je možné konstatovat, že asfaltové vozovky v oblasti postižené zemětřesením i turecká státní správa prokázaly dobrou odolnost a s následky zemětřesení se dokázaly vypořádat.

Dopad dlouhodobého zvyšování hladiny podzemních vod, způsobený klimatickou změnou, na životnost vozovek na Floridě je popsán v příspěvku [2]. Nejprve je v něm vysvětlena celková situace v tomto americkém státě. Dlouhodobé sledování stoupání průměrné hladiny moře a podzemní vody v přímořské oblasti umožnilo prognózu jejich budoucího zvýšení. To je zohledněno v předpisu pro návrh vozovek silniční správy ve státě Florida (FDOT). Do roku 2040 se má počítat se zvýšením hladiny podzemní vody o 44 cm a do roku 2070 o 102 cm. Při srovnávacích výpočtech v [2] se uvažovalo s tím, že hladina podzemní vody je v hloubce 5 ft (1,52 m). Zvýšení hladiny podzemní vody bylo uvažováno ještě o 1 inch (2,6 cm) vyšší, než je v předpise. Po zvýšení hladiny podzemní vody dojde k nasycení části zemin v podloží a snížení jeho únosnosti. Vliv zvýšení hladiny podzemní vody na životnost vozovky byl analyzován jak starší americkou návrhovou metodou, která byla čistě empirická, tak novější návrhovou metodou programem AASHTOWare. V [2] se tímto programem posoudila odolnost proti šíření únavových trhlin zdola nahoru, trhlin šířících se shora dolů, trvalé deformace celé vozovky, trvalé deformace asfaltových vrstev a index nerovnosti vozovky IRI.

Zde jsou zmíněny jen výsledky provedené novou americkou návrhovou metodou. Analyzovány byly 3 typické konstrukce vozovek pro dálnice (se 6 jízdními pruhy), hlavní komunikace (se 3 jízdními pruhy) a místní komunikace (se 2 jízdními pruhy). Návrhové rychlosti pro ně byly 112 km/h, 72 km/h a 48 km/h (v programu AASHTOWare se navrhuje rychlost pohybu vozidel zadává jako vstupní parametr pro výpočet). Tloušťka asfaltových vrstev vozovek byla 165 mm na dálnicích a 76 mm na místních komunikacích. Celková tloušťka asfaltových a nestmelených

vrstev byla 450 mm na dálnicích a 280 mm na místních komunikacích. Pod nestmelenými podkladními vrstvami se vždy uvažovalo 30 cm zeminy s únosností vyjádřenou hodnotou LBR = 40, která je ve státě Florida obvykle předepisována. (LBR je zkratka pro Limerock Bearing Ratio. Jde o zkoušku zatlačení trnu do hodnoceného materiálu, obdobnou jako zkouška CBR. Zkoušky LBR se provádí podle předpisu FM 5-515, který lze nalézt na <https://www.fdot.gov/>.)

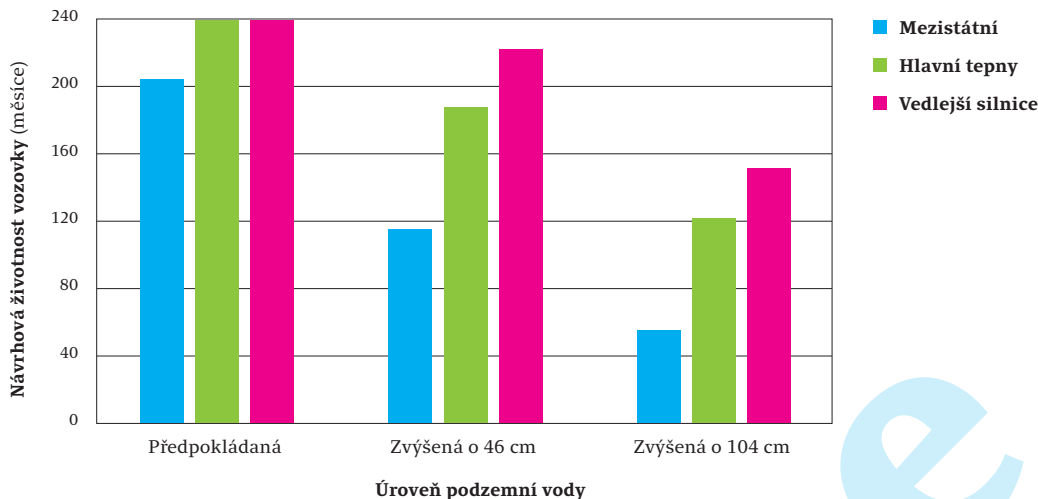
Pro tuto horní vrstvu podloží se při výpočtu uvažoval návrhový modul pružnosti 83 MPa a součinitel příčného přetvoření $\mu = 0,4$. Pro dolní vrstvu jílovitého písku tloušťky 1,5 m se uvažoval modul 74 MPa a $\mu = 0,45$. Pod jílovitým pískem se předpokládal vápencový skalní podklad. Při hladině podzemní vody v hloubce 1,5 m pod povrchem vozovky byla pro zvolená dopravní zatížení životnost vozovky větší než návrhová (20 let). Po stoupnutí hladiny vody poklesl návrhový modul pružnosti podloží (podle vzorce, použitého v programu AASHTOWare, ve kterém závisí modul pružnosti na stupni nasycení zeminy S_v). To vedlo ke zvýšení deformací vozovky, indexu nerovnosti IRI a dřívějšímu výskytu trhlin ve vozovce.

(V americké návrhové metodě se vypočítává časový průběh deformací vozovky, postupný vývoj trhlin v asfaltových vrstvách, šířících se shora i zdola a nerovnosti vozovky během celého návrhového období. Proto je výpočet velmi složitý a trvá několikánásobně déle než výpočty programy používanými pro návrhy vozovek v ČR a ve většině evropských zemí. Informace o programu AASHTOWare jsou na <https://www.aashtoware.org/products/pavement/pavement-overview/>.)

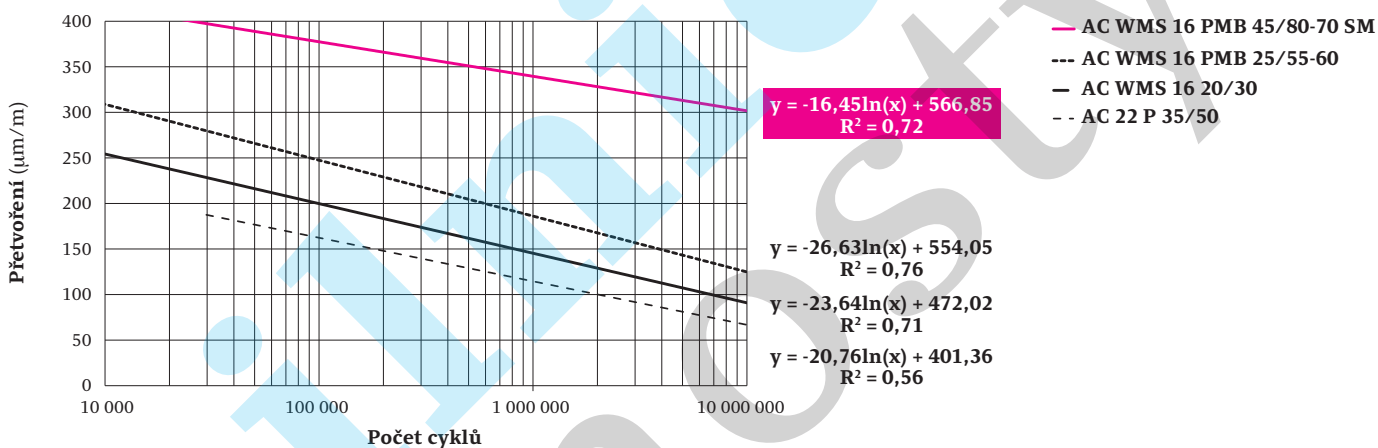
Při navrhování vozovek výpočtovými metodami je řada nejistot o skutečné velikosti různých faktorů ovlivňujících výsledky. Proto je dle mého názoru sporné, zda je velká složitost a pracnost posouzení vozovek programem AASHTOWare pro praxi vhodná. V uživatelských programů to navíc může vyvolávat iluzi, že jde o přesné vystižení působení dopravního zatížení na vozovky.

Mezní hodnoty parametrů, které byly v [2] považovány za porušení vozovky, jsou uvedeny v tabulce 1.

Protože americká návrhová metoda je velmi odlišná od české, je v tomto textu uveden na obrázku 8 pouze shrnující graf. Na něm je teoretická životnost vozovky v měsících pro dálnice, hlavní a vedlejší komunikace pro standardní návrh a dvě uvažovaná dlouhodobá zvýšení hladiny podzemní vody. Zvýšení hladiny podzemní vody vedlo k významným zkrácením teoretické životnosti vozovky. Za zmínku stojí, že téměř ve všech případech bylo větší zkrácení životnosti způsobeno deformacemi konstrukce než vývojem únavových trhlin.



Obrázek 8: Vliv dlouhodobého zvýšení hladiny podzemní vody na teoretickou životnost vozovky [2]



Obrázek 9: Únavové zkoušky směsí použitých na dálnici S8 a standardních asfaltových směsí [4]

V literatuře [2] se neuvažovalo se sezónním kolísáním hladiny podzemní vody, ale jen s jejím dlouhodobým zvyšováním. Autoři konstatovali, že v souvislosti s klimatickou změnou bude docházet také k větší četnosti intenzivních dešťů, vyvolávajících zaplavení rozsáhlých území. To způsobí dočasné promáčení podloží komunikací a tím další zhoršování odolnosti vozovky. V menší míře se vliv častějších intenzivních dešťů na odolnost vozovky může v budoucnu projevit ve všech zemích.

V literatuře [4] je podrobně popsán návrh vozovky s dlouhou životností na úseku dálnice S8 jižně od Varšavy v roce 2014 a výsledek několikaletého sledování chování vozovky. Byla to první konstrukce s pokladní vrstvou se silně modifikovaným asfaltem s vysokou odolností proti únavě na dálniční vozovce v Polsku. V ložní vrstvě byla použita asfaltová směs s vysokou tuhostí s pojivem PMB 25/55-60. V podkladní vrstvě byla použita směs se zvýšenou odolností proti únavě („antifatigue layer“) označená AC AF 16 s pojivem PMB 45/80-70 SM. Byly provedeny laboratorní únavové zkoušky typu 4PB-PR, dle přílohy D EN 12697-24, při teplotě 10 °C a frekvenci zatěžování 10 Hz. To je v Polsku referenční metoda pro zkoušky únavy. Výsledky únavových zkoušek použitých směsí a jejich srovnání s výsledky zkoušek standardních směsí jsou na obrázku 9. (U zkoušek 4PB vychází obvykle hod-

nota ϵ_6 mírně vyšší než u zkoušek 2PB, které se používají v ČR.) U standardní směsi s PMB (s hodnotou $\epsilon_6 = 186 \mu\text{m/m}$) byl počet cyklů do porušení téměř 4x větší než u směsi s nemodifikovaným asfaltem ($\epsilon_6 = 146 \mu\text{m/m}$). U směsi se zvýšenou odolností proti únavě (s hodnotou $\epsilon_6 = 340 \mu\text{m/m}$) byla pro milion zatěžovacích cyklů deformace při porušení 1,8 x větší než u standardní směsi s PMB, takže počet cyklů do porušení byl řádově vyšší.

Skladba asfaltových vozovky je uvedena v tabulce 2. Pod ní byla vrstva drceného kameniva 200 mm a cementem stmelená vrstva 200 mm.

Návrh vozovky byl proveden podle zásad ve francouzské návrhové metodě. Proto byly únavové zkoušky provedeny také zkouškou v dvoubodovém ohybu na komolém klínu při frekvenci 25 Hz, která je referenční metodou ve Francii i v ČR. Při návrhu vozovky se uvažovalo, v souladu s francouzskou normou pro návrhování vozovky NF P98-086, koeficient rizika 2 % (tj. předpokládá se jen 2% riziko porušení na konci životnosti).

Vozovka byla navržena na 50letou životnost bez oprav podkladní vrstvy, jen s výměnou obrusné vrstvy po cca 10 letech a výměnou ložní vrstvy po přibližně 35 letech. Celkové dopravní zatížení po dobu 50 let se uvažovalo 95 milionů návrhových náprav 100 kN.

Chování vozovky je dlouhodobě sledováno. V letech 2015, 2018 a 2021 byly na vozovce provedeny rázové zkoušky FWD. Měřené průhyby byly v souladu s polskými předpisy přepočteny na hodnoty pro zatížení 50 kN a teplotu 20 °C. Jako kritérium byl zvolen průhyb pod středem desky (D0) a rozdíl průhybu pod středem a pod geofonem ve vzdálenosti 300 mm (SCI300). Za reprezentativní hodnoty pro hodnocení stavu vozovky byly považovány hodnoty průměrné zvýšené o dvě směrodatné odchylky. Průhyby v roce 2015 byly větší než v následujících letech. Celkově je možné říci, že reprezentativní hodnoty průhybů byly zhruba poloviční než předepsané mezní hodnoty. (Ty byly D0 = 350 mikronů a SCI300 = 120 mikronů.) Na vozovce nejsou zatím žádné stopy po porušení.

Sledování dopravního zatížení umožnilo porovnat jeho prognózu se skutečností. Pro období 2016 až 2022 odpovídala na jednom úseku prognóza skutečnosti, na druhém bylo skutečné zatížení vyšší a na úseku Opacz-Sokolowska bylo zhruba 2x vyšší než uvažované. Autoři uvádí, že hlavní příčinou velkého rozdílu v dopravním zatížení v tomto úseku byly změny v plánech výstavby dalších komunikací v oblasti. V článku je stručně zmíněno, že v Polsku bylo provedeno několik dalších vozovek s dlouhou životností s podkladní vrstvou se silně modifikovaným asfaltem.

Príspevek [3] se zabýval možností sledování šíření trhlin od opakovaného zatěžování pomocí senzorů (snímačů) rozptýlených v asfaltové směsi. (*Materiály s rozptýlenými senzory se někdy v anglické literatuře označují jako „selfsensing mate-*

rials“.) Je zapotřebí, aby senzory vytvořily v tělese souvislou síť, která reaguje na vnější podněty.

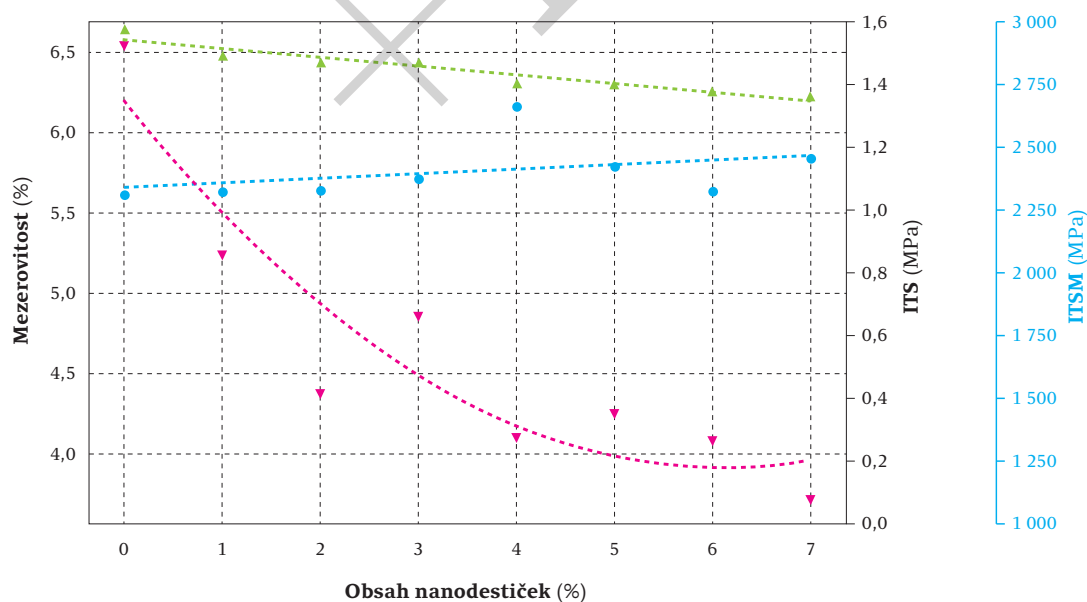
Do asfaltové směsi se v [3] přidaly grafenové nanodestičky (graphene nanoplates GNP). Grafen je ultratenká vrstva uhlíkových atomů. Byl poprvé vyroben až v roce 2004, ale jeho použití v různých oborech se v posledním desetiletí velmi rychle rozšířilo. Autoři příspěvku [3] podrobněji popsali svůj výzkum v literatuře [5]. Tam mohou zájemci získat o této technologii a výsledcích zkoušek bližší informace. Proto je v tomto textu příspěvek [3] popsán jen stručně. Při šíření trhlin ve vzorku asfaltové směsi dochází ke změnám elektrického odporu. To může indikovat porušování asfaltové směsi trhlinami.

Asfaltová směs použitá ve výzkumu v [3] byl SMA 0/11 s polymerem modifikovaným pojivem PMB 45/80-65. Grafenové nanodestičky byly dodány španělskou firmou Nanoinnova Technologies. Měly 5 až 10 vrstev. Obsahovaly 96,4 % uhlíku. (Firma Nanoinnova vyrábí různé přísady do asfaltových směsí s obchodní značkou asphaltnit <https://sites.google.com/nanoinnova.com/asphaltnit/home>.)

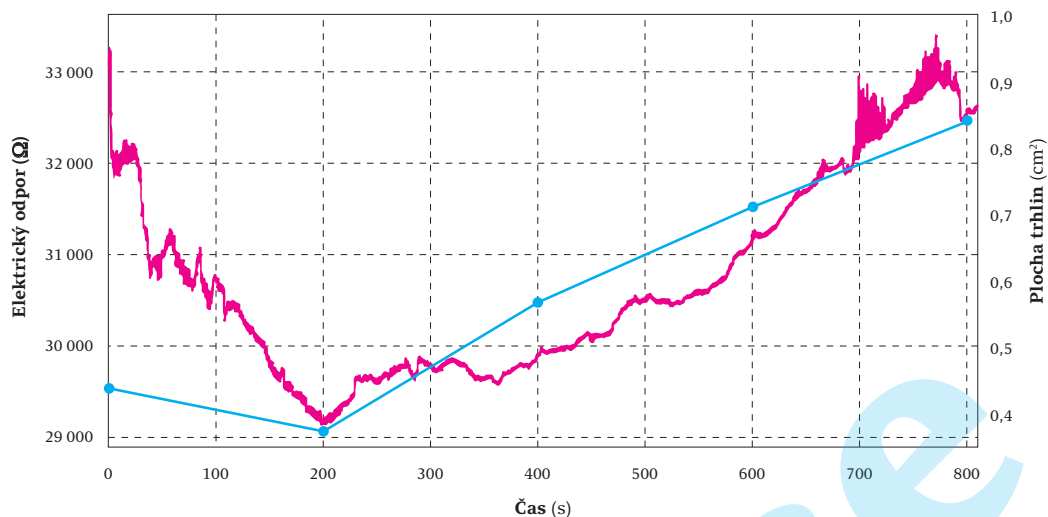
Grafenové nanodestičky snižují mezerovitost směsi. Laboratorními zkouškami byl v [3] nejprve zkoumán vliv obsahu nanodestiček ve směsi na její mechanické vlastnosti. Při zkoušce v příčném tahu s rostoucím obsahem grafenových nanodestiček rostl modul tuhosti ITSM (dle EN-12697-26 z roku 2012), ale snižovala se pevnost v příčném tahu ITS (dle EN 12697-23 z roku 2018). Závislost mezerovitosti a vlastností při zkoušce v příčném tahu na obsahu nanodestiček je znázorněna na obrázku 10.

Tabulka 2: Skladba asfaltových vrstev vozovky na dálnici S8 v Polsku [4]

Vrstva	Materiál	Tloušťka (mm)
Obrusná	SMA 8 PMB 45/80-55	30
Ložní	VMT 16 PMB 25/55-60	150
Spodní asfaltová	AC AF 16 PMB 45/80-70 SM	80



Obrázek 10: Vliv dávkování grafenových nanodestiček [3]



Obrázek 11: Elektrický odpor a plocha trhlin během zkoušky opakovaným zatěžováním [3]

Kritériem pro stanovení vhodného podílu nanodestiček je to, aby byly rozptýleny tak, že se již vzájemně ovlivňují z hlediska elektrických vlastností. To se projeví tím, že elektrický odpor zkušební tělesa náhle prudce klesne o několik řádů, protože grafen je extrémně vodivý materiál. U zkušební směsi k tomu došlo při obsahu nanodestiček 1,5 %. Při obsahu nanodestiček ≥ 2 % se již odpor měnil jen málo. Jako vhodné dávkování byl proto zvolen podíl 3 %. Pro něj pak byly prováděny další zkoušky.

Při zkoušce s velkým počtem zatěžovacích cyklů docházelo nejprve k snižování elektrického odporu. Po cca 200 cyklech se tendence obrátila. Až do konce zkoušky již elektrický odpor stále rostl. To bylo interpretováno tak, že v první fázi docházelo zatěžováním ke zmenšení mezerovitosti. Poté již začalo opakovaným zatěžováním docházet k porušování vzorku. Vytvářely se v něm mikrotrhliny, které přerušovaly kontakty mezi grafenovými nanodestičkami a elektrický odpor postupně rostl. Zkušební těleso bylo během zkoušky fotografováno a snímky byly vyhodnoceny metodou digitálního zpracování a analýzou obrazů. To umožnilo dokumentovat vývoj trhlin na povrchu zkušební tělesa při opakovaném zatěžování. Mezi průběhem elektrického odporu a množstvím trhlin z digitálního zpracování byla jasná korelace, jak je vidět na obrázku 11.

V příspěvku [3] jsou popsány jen výsledky laboratorních zkoušek. V dalším příspěvku několika autorů, v časopise *Sensors* [6] z roku 2024, jsou uvedeny i další látky, které se mohou použít jako senzory v asfaltových směsích. V literatuře [6] je shrnutí současného stavu technologie rozptýlených sensorů. Jsou tam zmíněny i aplikace přímo ve vozovce. Zatím tato technologie zůstává ve stadiu ověřování, ale je možné, že v budoucnu se při sledování stavu asfaltových vozovek uplatní. Vozovky, u kterých bude možné zjistit počínající porušování ještě předtím, než se trhliny objeví na povrchu, mohou být preventivně opraveny. Mohou tak mít delší životnost a být odolnější. Proto byl tento příspěvek organizátory kongresu zařazen do semináře o odolnosti.

Ing. Jiří Fiedler

Literatura

- [1] Temren Z., Yildirim M., Macit G., An assessment of road failures due to the earthquake and resilience of asphalt pavement, *E&E Congress 2024*, p. 835–847
- [2] Göçmez M.G., Hesham A., Unseen climate change threat on flexible pavement resilience: high groundwater table levels, *E&E Congress 2024*, p. 825–834
- [3] Gulisano F., Abedi M., Roshan M. J., Apaza F.R., Figueiro R., Correia A.G. 2, Juan Gallego J., Early detection of cracks propagation with resistance-based self-sensing asphalt mixtures, *E&E Congress 2024*, p. 96–105
- [4] Pelczyńska K., Grajewska A., Hering M., Ruttmar I., Design and exploitation of the perpetual pavement in Poland, *E&E Congress 2024*, p. 705–714
- [5] Gulisano F., et al, Stress and damage-sensing capabilities of asphalt mixtures incorporating graphene nanoplatelets, *Sensors and Actuators: A. Physical.* (2023). <https://doi.org/10.1016/j.sna.2023.114494>
- [6] Gulisano, F.; Jimenez-Bermejo, D.; Castano-Solís, S.; Sánchez Diez, L.A.; Gallego, J., Development of Self-Sensing Asphalt Pavements: Review and Perspectives. *Sensors* 2024, 24, 792. <https://doi.org/10.3390/s24030792>