

Vplyv výstužných prvkov na báze rastlinných vlákien na funkčné vlastnosti asfaltových zmesí



Ing. Peter Gallo, Ph.D.
ČVUT v Praze
Fakulta stavební

Článok predstavuje výťah z dizertačnej práce. Asfaltové vozovky musia neustále odolávať účinkom dopravy a vplyvom prostredia, ktoré ich kontinuálne poškodzujú. Naším cieľom je zlepšovanie vlastností asfaltových zmesí tak, aby bol dosiahnutý čo najmenší výskyt porúch a bola predĺžená životnosť vozoviek. Toto môžeme dosiahnuť napríklad pomocou rôznych prísad. Vzhľadom k nemožnosti vytvorenia dokonale odolného materiálu sa vozovky musia periodicky obnovovať. Preto je výhodné, pokiaľ sú zlepšujúce prísady vyrobené z materiálov plne v súlade s princípmi cirkulárnej ekonomiky a trvale udržateľného rozvoja. Táto práca preveruje možnosť použitia takýchto prísad – rastlinných vlákien. Cieľom bolo preveriť ich výstužnú funkciu v troch typoch asfaltových zmesí zvolených s ohľadom na preverenie v celej skladbe typickej asfaltovej vozovky. Výsledky zvolených funkčných a empirických skúšok ukázali, že rastlinné vlákna môžu slúžiť ako výstužné prvky v asfaltových zmesiach.

Kľúčové slová: asfaltová zmes, výstuž, vlákna, rastlinné vlákna, prísada

Asphalt roads must constantly withstand the effects of traffic and the effects of the environment, which continuously damage them. Our goal is to improve the properties of asphalt mixtures in such a way that the occurrence of failures is as low as possible and the life of the roads is extended. We can achieve this, for example, by using various additives. Due to the impossibility of creating a perfectly resistant material, roadways must be renewed periodically. Therefore, it is advantageous if the improving additives are made from materials fully in accordance with the principles of the circular economy and sustainable development. This work examines the possibility of using such additives - plant fibers. The goal was to check their reinforcing function in three types of asphalt mixtures chosen with regard to checking the entire composition of a typical asphalt road. The results of selected functional and empirical tests showed that plant fibers can serve as reinforcing elements in asphalt mixtures.

Keywords: asphalt mixture, reinforcement, fibers, vegetable fibers, additive

1 ÚVOD

Stavebníctvo predstavuje veľmi komplexný odbor ľudskej činnosti, kde konečným cieľom sú potreby človeka alebo spoločnosti. Spolu so strojárstvom sa rozhodujúcim spôsobom podieľa na realizácii investičnej výstavby a má zásadný vplyv na ekonomiku [1]. Cestná sieť má zásadnú rolu nielen v krajinách Európskej únie. Zo všetkých druhov dopravy jej patrí výrazné prvenstvo v preprave vecí aj v celkovom prepravnom výkone [2]. Zvyšujúce sa dopravné nároky priamo vytvárajú tlak na zabezpečenie bezpečnej a komfortnej prevádzky cestnej infraštruktúry. Okrem správneho návrhu, intenzívnejšej údržby a dodržania správnych technologických postupov pri realizácii vozoviek a ciest existuje nikdy nekončiaca snaha o zlepšovanie prevádzkových vlastností používaných materiálov. Cieľom je zvýšiť ich životnosť do tej miery, aby došlo k efektívnemu zníženiu nákladov na údržbu a opravu vozovky v čase. Prípadné zvýšené náklady na realizáciu by teda mali byť kompenzované nižšími výdajmi v dobe prevádzky vozovky. V dnešnom svete so „znovuobjaveným“ princípom dlhodobu udržateľných, opakovane využívaných materiálov a zdrojov je snaha v čo najväčšej miere používať odpadové alebo aspoň obnoviteľné materiály.

Vozovka je vrchná časť pozemnej komunikácie určená hlavne pre jazdu vozidiel. Skladá sa z jednej alebo viacerých vrstiev, ktoré môžu byť stmelené alebo nestmelené. Toto základné rozdelenie napovedá, že vo vozovkách používame buď sypké mate-

riály, ktoré po rozprestretí a zhutnení vytvoria vrstvu, alebo sa k nim pridá spojivo, čo zaisťuje súdržnosť vytvoreného kompozitného materiálu. Pokiaľ je súdržnosť narušená, dochádza k poruchám materiálu. V cestnom stavitelstve sa v zásade používajú dva druhy spojív:

- spojivá na báze organických zlúčenín, reprezentované najmä asfaltom,
- hydraulické spojivá, ktorých najvýznamnejším predstaviteľom je cement.

Ich použitím a zamiešaním s kamenivom a prísadami vzniká asfaltová zmes a cementový betón. Trhliny sú jednou zo spoločných základných porúch oboch materiálov, znižujúcich životnosť krytu a v konečnom dôsledku až celej vozovky. V prípade vozoviek s asfaltovým krytom sa k nim pridávajú trvalé deformácie, strata materiálu krytu a iné. S vyše 90% podielom sú vozovky s asfaltovým krytom suverénne najrozšírenejším typom vozoviek v Európe [3]. Aj preto bola dizertačná práca vedená smerom k asfaltovým zmesiam. Zvýšenie odolnosti voči tvorbe trvalých deformácií a šíreniu trhlin asfaltových zmesí boli hlavnou motiváciou pre realizovaný výskum. Ako však tieto charakteristiky pozitívne ovplyvniť?

1.1 Vlákna v asfaltových zmesiach

Inšpirácia sa nachádza všade okolo nás. Stavebné inžinierstvo zaznamenalo v minulom storočí rozmach používania betónu.

Prostý betón je ľudstvu známy už viac než 2000 rokov. Jeho malá pevnosť v ťahu však limitovala širšie využitie. V minulom storočí ľudia tento nedostatok prekonalí pridaním materiálu s rádovo vyššou pevnosťou v ťahu – ocelevej výstuže. Pri prekročení maximálneho ťahového napätia betónu v ňom dôjde k iniciácii trhlín. Keď je v namáhanom mieste a kolmo na vývoj trhliny umiestnená dostatočne ukotvená výstuž, zamedzí ďalšiemu rozvoju trhlín a prenesie toto napätie ďalej do konštrukcie. Tá sa tak stáva výrazne duktilnejšou a únosnejšou. Pokiaľ chceme zvýšiť duktilitu samotného betónu, použili by sme vlákna. Ich spôsob fungovania je v princípe podobný, ako u betonárskej výstuže. Rozdiel je v tom, že vlákna po zamiešaní vytvoria rozptýlenú trojdimenzionálnu výstuž. Tento princíp je v skutočnosti ľudstvu známy už tisícky rokov [4]. Už pred naším letopočtom sa pri výrobe nepálených tehál používala slama, či iné rastlinné vlákna pre redukciu objemových zmien a trhlín z vysychania.

Aj napriek nárastu cien ropy v posledných desaťročiach ponúkajú asfaltové zmesi oproti vozovkám s cementobetónovým krytom niekoľko výhod. Medzi hlavné môžeme zaradiť ekonomickú výhodnosť, malú časovú náročnosť na zhotovenie vrstvy a jej uvedenie do prevádzky a pomerne nenáročnú možnosť opravy prípadných porúch. Asfaltová zmes je vo všeobecnosti trojfázový systém, ktorý tvoria výplň – kamenivo, asfaltové spojivo a vzduchové medzery. Na celkovej únosnosti sa samozrejme podieľajú len dve z týchto fáz, t. j. kamenivo a spojivo.

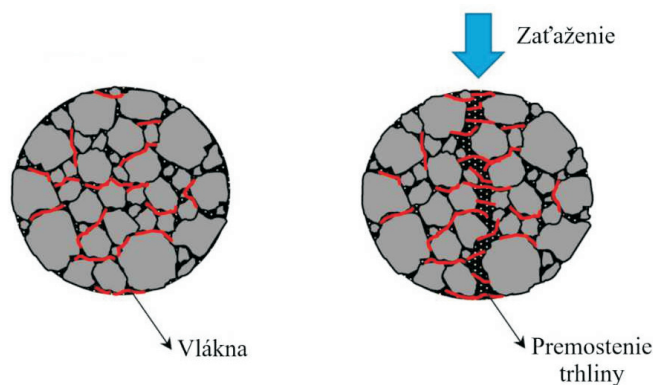
Asfalt hrá kľúčovú rolu v správaní asfaltovej zmesi a predovšetkým určuje vlastnosti vozovky a dĺžku jej životnosti. Najmä starnutie asfaltu zhoršuje nízkoteplotné a únavové vlastnosti, čo má za následok skrátenie životnosti vrstvy a celej vozovky [5]. Asfaltové spojivo determinuje viskoelastické vlastnosti asfaltovej zmesi a jej teplotnú citlivosť.

Vlákna sú jedna z najbežnejšie používaných prísad do asfaltových zmesí. Ich aplikácia bola skúmaná a vyvíjaná v oblasti výskumu vozoviek už mnoho rokov. V súčasnosti sa vláknám v cestnom staviteľstve venuje veľká pozornosť kvôli ich rozmanitosti a významným zlepšeniam na špecifické účely. Napríklad jedným z hlavných nedostatkov asfaltových zmesí je nízka pevnosť v ťahu, ktorá vedie k tvorbe a rozvoju trhlín. V tomto prípade môže byť vhodným riešením aplikácia vlákien s vysokou pevnosťou v ťahu. Vlákna po zapracovaní do asfaltových zmesí pôsobia ako stužujúci materiál, zvyšujú súdržnosť zmesi, znižujú výskyt reflexných alebo únavových trhlín a zvyšujú odolnosť proti trvalým deformáciám. Celkovo môže pridanie vlákien zmeniť viskoelasticitu asfaltu, zvýšiť dynamický modul a poddajnosť v creeze, zlepšiť odolnosť voči trvalým deformáciám, citlivosť voči účinkom vody, odolnosť voči zmrazovacím cyklom a odolnosť voči šíreniu trhlín. Okrem toho, vlákna môžeme použiť spolu s ďalšími prísadami alebo ako stabilizátory, ktoré znižujú stekavosť asfaltových zmesí. Toto platí najmä pre asfaltový koberec mastixový (SMA) a asfaltové zmesi s vysokou medzerovitosťou (napr. PA), ktoré sa tradične vyznačujú zvýšeným obsahom asfaltového spojiva. Za týchto okolností je použitie vlákien podobné ako pridávanie veľmi jemného kameniva do asfaltových zmesí. Oboje prispieva k prevencii „potenia“ vozoviek [6].

Vlákna v zásade môžu plniť v asfaltovej zmesi dve základné funkcie:

1. **stabilizačná** – zabránenie stekania asfaltového spojiva z kameniva,
2. **výstužná** – k zosilneniu, vystuženiu asfaltových zmesí, vďaka ktorému potom zmesi lepšie odolávajú tvorbe trhlín a trvalých deformácií.

Štandardne sa pre stabilizovanie asfaltovej zmesi s vyšším obsahom spojiva používajú celulóзовé vlákna získané recykláciou papiera. Celulóзовé vlákna však v makromierke vykazujú minimálnu ťahovú pevnosť. Oproti tomu majú vlákna používané k vystuženiu zmesí (napr. aramidové) vysokú pevnosť v ťahu a vysoký modul pružnosti, čím teoreticky zvyšujú modul tuhosti asfaltových zmesí a ich ťahovú pevnosť. V posledných rokoch sa s cieľom presadzovania trvalej udržateľnosti stavebných materiálov začali používať vlákna vyrobené z odpadových materiálov alebo vedľajších priemyselných produktov, ako sú odpadové pneumatiky a koberce, ohorky cigariet a zdravotnícke rúšky [6, 7].



obr. 1 Mechanizmus funkcie vlákien v asfaltovej zmesi pri namáhaní v priečnom ťahu

Pridanie vlákien s vysokou pevnosťou v ťahu môže pomôcť k zvýšeniu ťahovej pevnosti celej asfaltovej zmesi. Teoreticky môžu byť napätia prenesené do silných vlákien, čím sa znižuje namáhanie relatívne slabšej asfaltovej zmesi, ako je znázornené na obr. 1. K efektívnemu prenosu napätí musí fungovať dobrá adhézia medzi vláknom a asfaltovým spojivom. Väčšia povrchová plocha vlákien môže túto adhéziu zvýšiť. Okrem toho musia byť vlákna rovnomerne rozptýlené v zmesi, aby sa zabránilo koncentrácii napätia [4].

V asfaltových zmesiach sa v minulosti experimentovalo s celou škálou rôznych druhov vlákien. Podľa pôvodu či typu materiálu môžeme vlákna rozdeliť na: **prirodzené** a **syntetické**. Jedná sa o základné a logické rozdelenie, keďže typ materiálu rozhoduje o vlastnostiach vlákien a ich interakcii s matricou či okolitým prostredím.

Prirodzené vlákna sú vyrobené zo základných surovín v prírode a podľa ich pôvodu môžu byť rozdelené do troch základných skupín: rastlinné, živočíšne a minerálne. Oproti tomu sú syntetické vlákna materiály vyrobené človekom, napr. prostredníctvom zvlákňovania, polymerizácie a spracovania filamentov [9].

1.1.1 Prírodné vlákna

Minerálne vlákna prírodného pôvodu majú prakticky len jedného zástupcu. Je ním neslávne známy azbest, ktorého vlákna majú výborné mechanické vlastnosti, avšak predstavujú významné zdravotné riziko pre živočíchov.

Medzi **živočíšne vlákna** radíme srst alebo perie živočíchov. V asfaltových zmesiach bolo použité kuracie perie, kozia vlna a iné. Výzvy týkajúce sa používania živočíšnych vlákien zahŕňajú zber a recykláciu vlákien zo zvierat, opätovné použitie a kontrolu kvality, homogenitu zmesi vo veľkej mierke praxe, vysokú tepelnú stabilitu pri miešaní živočíšnych vlákien s horúcimi zmesami, efektívnosť nákladov a skutočnosť, že existuje len veľmi obmedzené množstvo štúdií, ktoré môžu preukázať realizovateľnosť a širokú použiteľnosť živočíšnych vlákien v asfaltových zmesiach [8].

Rastlinné vlákna pochádzajú z rôznych častí rastlín, ako sú ich semená, lyko, listy a plody. Niektoré bežné druhy rastlinných vlákien pochádzajú z bavlny, kokosových orechov, juty a konope. Z hľadiska chemického zloženia sa rastlinné vlákna skladajú z celulózy, lignínu, hemicelulózy a ďalších látok ako pektíny, či vosky. Celulóza je polymér, ktorý tvorí vlákna tvoriace bunkové steny. Lignín je komplexný polymér uložený v bunkových stenách, vďaka čomu sú bunkové steny pevné a drevnaté. Hlavnými zložkami rastlín sú celulóza a lignín, preto najmä tieto dva prírodné polyméry predstavujú bohatý zdroj materiálu pre asfaltové zmesi. Zo zozbieranej literatúry patria medzi hlavné rastlinné vlákna používané v asfaltových zmesiach kokosové vlákna, celulóza, lignín, stonky kukurice, bavlna, konope, juta, sisal a bambus [8].

1.1.2 Syntetické vlákna

V porovnaní s prírodnými vláknami sa syntetické vlákna vyrábajú z chemických zlúčenín. Primárny rozdiel medzi organickým vláknom a anorganickým vláknom je ten, že organické vlákno má atómy uhlíka, zatiaľ čo anorganické vlákno atómy uhlíka neobsahuje.

V asfaltovej zmesi boli použité nasledujúce typy syntetických vlákien:

- **umelé minerálne:** bazaltové (čadičové) vlákna,
- **keramické vlákna:** hliníkokremičitanové vlákno,
- **sklenené,**
- **ocelové,**
- **uhlíkové,**
- **polymérne:** aramidové, polyolefinové (polyetylénové – PE, polypropylénové – PP), polyetyléntereftalátové (PET), polyesterové (PES), acetylcelulózoové (CA).

Z uvedeného zoznamu sa v asfaltových zmesiach najčastejšie používa posledná skupina vlákien. Syntetické polyméry sú bežne používané k modifikácii asfaltových spojív a k vystuženiu asfaltových zmesí. Jedná sa o uhľovodíkové reťazce pôvodom z ropy, ktorých názov je odvodený z opakujúcej sa jednotky hlavného reťazca. Použitie spomenutých vlákien ukázalo zlepšenie vo väčšine sledovaných charakteristík. Na druhú stranu, zlepšenie (aj keď veľkej) časti funkčných a empirických vlast-

ností asfaltovej zmesi má zvyčajne za následok zhoršenie v tých zvyšných.

Zatiaľ čo väčšina štúdií o asfaltových zmesiach vystužených vláknami sa zameriava na laboratórne pripravené vzorky s krátkodobým starnutím, len málo z nich sa zameralo na zmenu ich vlastností v dlhodobom horizonte, nehovoriac o vlastnostiach v reálnej vozovke. Starnutie je komplexný a univerzálny problém asfaltových vozoviek a existuje medzera v chápaní toho, ako vlákna interagujú s ultrafialovým svetlom, teplom, kyslíkom a vlhkosťou v asfaltových zmesiach a ako sa vlákna degradujú. Len málo štúdií sa zameralo na údržbu, sanáciu a koniec životnosti asfaltových vozoviek vystužených vláknami, ktoré si zaslúžia ďalšie skúmanie. Niektoré vlákna sa môžu na konci životnosti znehodnotiť. Na čo by sa premenili, nie je isté. V prípade recyklácie asfaltovej vozovky vystuženej vláknami je ďalším zanedbávaným aspektom vo výskume recyklovateľnosť týchto zmesí. Nie je isté, ako RA s obsahom zostarnutých vlákien ovplyvní vlastnosti nových asfaltových vozoviek [8].

1.2 Ktoré vlákna použiť?

Každý materiál má svoje výhody a nevýhody. V cestnom stavebníctve celé desaťročia panuje premisa „organiku preč“. Reč je samozrejme o prírodných materiáloch na organickej báze. Na jednu stranu majú niektoré rastlinné a živočíšne vlákna podobné, či dokonca lepšie mechanické vlastnosti než syntetické alternatívy. Pri miešaní horúcich asfaltových zmesí, vystavení teplotám nad 150 °C a následných účinkoch prostredia pri položení vrstvy vozovky však dochádza k zvýšenej miere degradácie. Predsa len sa jedná o biodegradovateľné materiály. Okrem toho ich prirodzená nasiakavosť a hydrofilnosť znamenajú zvýšenie vodnej citlivosti (zníženie pomeru priečneho ťahu za mokra a za sucha) a chemickú nekompatibilitu s asfaltovým spojivom. Predstavujú tak riziko zvýšenia výskytu porúch a predčasného konca životnosti vrstvy vozovky.

Syntetické vlákna teda na prvý pohľad vyzerajú ako lepšia voľba. Nájdeme medzi nimi dostatok druhov s vysokou pevnosťou v ťahu, ktorým nerobí problém vyššia teplota ani vplyvy prostredia. Aj tieto materiály však majú svoje negatívne stránky. Prvou z nich je nutnosť ich výroby. Na jednu stranu v zmysle investovania energie tam, kde to za nás príroda urobí sama a na stranu druhú majú tieto vlákna prakticky výlučne nečlenený prierez a takmer hladký povrch. Nie je veľmi dôležité, či má dané vlákno obrovskú pevnosť v ťahu, pokiaľ sa v praxi táto vlastnosť nedá využiť. Inými slovami, ak sa dané napätie nedokáže preniesť z matrice/spojiva na vlákno. Samozrejme, veľkú rolu hrá taktiež materiál vlákna, ktorý určuje chemickú kompatibilitu povrchu vlákna s matricou.

V zmysle cirkulárnej ekonomiky by sme mali materiály vedieť opakovane využiť. Nie všetky druhy materiálov je vôbec možné recyklovať, prípadne je nutné na ich recykláciu vynaložiť veľké množstvo energie. Ďalším problémom je degradácia vlastností materiálu po primárnom použití. Aj syntetické polyméry, ktoré patria medzi najviac recyklované syntetické materiály, menia svoje mechanické vlastnosti v čase, postupne degradujú a roz-

padávajú sa. Tým vyvstáva rovnaký problém ohľadom vlastností asfaltovej zmesi po dlhodobej prevádzke, ako v prípade prírodných vlákien. Navyše vzniká aj ďalšia otázka: čo robiť s produktami rozkladných procesov? Konečným produktom optimálneho rozkladu uhľovodíkových polymérov je CO_2 a H_2O . Syntetické však počas tohto procesu môžu navyše produkovať nebezpečné medziprodukty a môžu obsahovať aj ďalšie pridané látky ako zmäkčovadlá, stabilizátory, spomaľovače horenia a iné. Navyše, zatiaľ nie sú biodegradovateľné na rovnakej úrovni ako prírodné polyméry. Ich rozkladanie je dlhé a okrem iného vedie k vytvoreniu veľmi malých pevných častíc. V poslednom čase sa objavilo mnoho štúdií poukazujúcich na potenciálne negatívne vplyvy pre človeka aj ostatné živočíchy. Okrem iného bolo potvrdené vniknutie mikro/nanoplastov do ľudských buniek [10], sú náznaky zvýšenia výskytu kardiovaskulárnych problémov [11], je preukázané prepojenie so zápalovým ochorením čriev u ľudí [12] a morských vtákov [13].

Obalenie vlákien asfaltovým spojivom rozhodne znižuje riziko uvoľnenia látok a pevných mikro/nanočastíc do prostredia. Aj na tento aspekt sa však musíme pozeráť optikou času. Už počas prevádzky dochádza ku kontaktu s pneumatikami vozidiel a k obrusovaniu asfaltového filmu a povrchu vozovky. Navyše, asfaltové spojivo starne a eventuálne sa stáva krehkým. Spojivo je potom náchylnejšie na vznik mikrotrhlín, ktorými ďalej do vnútra vrstvy a celej konštrukcie vniká vzduch, voda a iné látky. Týmto spôsobom tak dochádza nielen k rýchlejšej degradácii vrstvy, ale potenciálne aj ku vyplavovaniu nebezpečných látok z vnútra. Na konci životnosti asfaltovej vrstvy tradične dochádza k jej mechanickému narušeniu frézovaním, pri ktorom sa spomenuté riziká ešte násobia. Získaný asfaltový recyklát (RA) býva častokrát uložený na skládkach pod holým nebom, kde môže dôjsť k ďalšiemu vyplavovaniu látok.

2 POUŽITÉ VLÁKNA

Pre výskum boli vybrané rastlinné vlákna: **konopné, lanové a jutové**. Najprv boli testované vybrané vlastnosti vlákien samotných. Jednalo sa o experimentálne zistenie transportu vody v rastlinných priadkach, nasiakavosti asfaltového spojiva vybranými rastlinnými priadkami, tepelnej degradácie a pevnosti v ťahu vybraných rastlinných vlákien. Práca sa okrajovo venuje aj starnutiu asfaltových zmesí a celulóзовých vlákien. Experimentálna časť je zameraná na testovanie troch druhov asfaltových zmesí s pridaním vybraných rastlinných vlákien.

Použitie prírodných vlákien v asfaltových zmesiach je dobrá udržateľná alternatíva kvôli nízkej spotrebe energie, ceny, obnoviteľnosti a biodegradabilite [6]. Dizertačná práca bola od začiatku vedená smerom ku vlákniatej prírase, ktorá dokáže v maximálnej miere zlepšiť funkčné a empirické charakteristiky asfaltových vrstiev a súčasne nezaťažuje životné prostredie po skončení životnosti vrstvy. Dôležitým faktorom bola preto pri výbere vhodnej prírsady obnoviteľnosť materiálu. Biodegradabilitu označujú mnohí odborníci za nevýhodu rastlinných vlákien. Jedná sa o oprávnené obavy, keďže stavebníci ani používatelia cestnej siete nechcú predčasný rozpad vozoviek. Literatúra uvádza, že medzi negatíva prírodných vlákien patrí silná hydrofilnosť, biologická odbúrateľnosť, ľahká aglomerácia, slabá dis-

perzia, zlá tepelná stabilita a mechanické zmeny [14]. Vzhľadom k realite nutnosti periodického obnovovania asfaltových vrstiev sa však na biodegradabilitu dá pozeráť pozitívnu optikou. Podmienkou však je, aby k majoritnej degradácii materiálu dochádzalo až po skončení životnosti vrstvy.

Možnosťou, ako zmierniť problémy s hydrofilnosťou, je dokonalé obalenie vlákien spojivom, ošetrovanie povrchu vlákien prírsadami na zlepšenie adhézie medzi vláknami a spojivom, či priamo hydrofobizácia vlákien. Tým sa zároveň maximálne zredukuje riziko predčasnej biodegradácie materiálov získaných z rastlín. Vždy je však treba zvoliť riešenie, ktoré je v súlade s ekologickými požiadavkami.

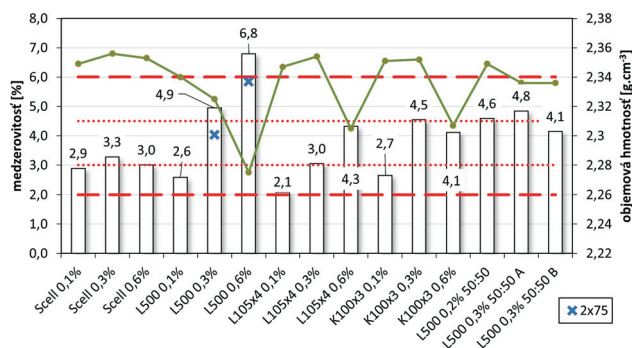
3 EXPERIMENTÁLNA ČASŤ

Díky výstužným prvkom, ich obsah a forma sa líšia v závislosti od typu zmesi a chronológie výroby. Cieľom bolo komplexné preverenie možnosti použitia rastlinných vlákien v asfaltových vozovkách, od obrusnej vrstvy až po podkladovú. Ako prvá bola vyrobená zmes typu SMA, v ktorej boli použité konopné a lanové vlákna porovnávané s komerčne dostupnými celulóзовými vláknami. Následne bola vyrobená zmes typu ACL s lanovými a jutovými vláknami. Na záver boli jutové vlákna zamiešané do zmesi typu ACP s obsahom RA a dvoch typov rejuvenátorov. V zmesiach typu ACL a ACP sa práca snaží aj o hľadanie možnosti chemickej úpravy povrchu vlákien. Prehľad všetkých testovaných zmesí je uvedený v tab. 1.

3.1 Skúšobné metódy

Vo všeobecnom prehľade skúšobných metód sú uvedené spoločné metódy pre testované asfaltové zmesi. Stanovené boli nasledujúce empirické a funkčné charakteristiky:

- Objemová hmotnosť podľa [15] a medzerovitost podľa [16].
- Stanovenie citlivosti voči účinkom vody a mrazu podľa [17] doplnené o modifikovaný postup vychádzajúci z AASHTO T283-3 (-30 °C po 24 hod., 50 °C vodná kúpeľ 24 hod., skúšanie pevnosti v priečnom ťahu pri teplote 15 °C podľa [18]).
- Tuhosť podľa [19]. Modul tuhosti bol stanovený skúškou v priečnom ťahu na valcových telesách (metóda IT-CY, Príloha C) a dynamický modul tuhosti zmesí ACP 16+ bol testovaný na trámikoch vo štvorbodovom ohybe (4PB-PR).



obr. 2 Objemová hmotnosť (zelená čiara) s medzerovitostou (biele stĺpce) zmesi SMA 11 S. Červené bodkované čiary vymedzujú limity pre skúšky typu, čiarkované pre kontrolné skúšky. Modré križky označujú medzerovitost po hutnení skúšobných telies 2x75 údermi

- Odolnosť voči šíreniu trhlin na polválcových telesách (SCB) podľa [20] s modifikovaným postupom podľa [21].
- Odolnosť proti trvalým deformáciám – skúška vyjazďovania kolesom [22].
- Pevnosť v ťahu za ohybu (3PB-PR) podľa TP 151:2010.
- Stekavosť spojiva pri zmesi SMA 11S podľa [23].

3.2 Objemová hmotnosť

Zvýšenie medzerovitosti s rastúcim množstvom vlákien sa prejavilo na prieč zmesami. Rovnaký trend bol zaznamenaný aj u zmesí s vláknami ošetrovanými roztokom NaOH. Ako príklad sú na obr. 2 uvedené výsledky medzerovitosti zmesí SMA 11 S.

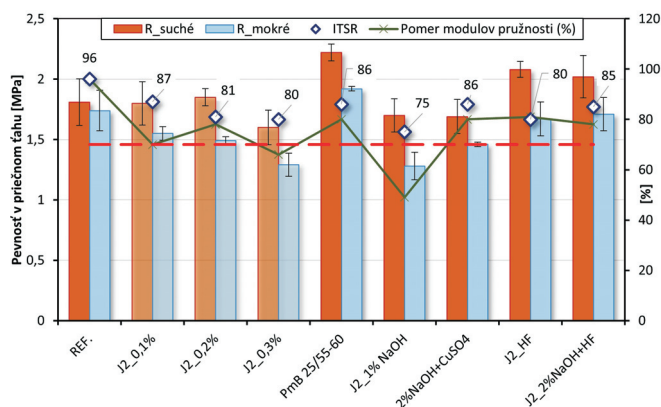
3.3 Citlivosť voči účinkom vody

Výsledky ukázali zreteľný a očakávaný pokles hodnoty pomeru pevností v priečnom ťahu (ITSR) pri zmesiach s rastlinnými priadzami. Najnižšie hodnoty v zásade dosiahli zmesi s najvyšším obsahom priadzí. Okrem toho, pri vyššom obsahu vlákien vo forme priadzí nedochádza k ich dokonalému obaleniu asfaltovým spojivom, čo len prispieva k zvýšeniu rizika penetrácie vodou a k zhoršeniu adhézie na rozhraní materiálov (matrica – vlákno). Na druhú stranu bol zaznamenaný nárast pevnosti v priečnom ťahu, ktorý v niektorých prípadoch kompenzoval stratu pevnosti za mokra. Na obr. 3 sú uvedené výsledky vybraných zmesí typu ACL 16+.

tab. 1 Prehľad a popis testovaných zmesí

zmes	spojivo	materiál vlákna	obsah vlákien [% hm.]	dĺžka vlákien [mm]	označenie zmesi	poznámka
SMA 11 S	PMB 45/80-65	celulóza	0,1	20	Scell 0,1%	
			0,3	20	Scell 0,3%	
			0,6	20	Scell 0,6%	
		ľan	0,1	20	L500 0,1%	
			0,3	20	L500 0,3%	
			0,6	20	L500 0,6%	
		ľan	0,1	20	L105x4 0,1%	
			0,3	20	L105x4 0,3%	
			0,6	20	L105x4 0,6%	
		konope	0,1	20	K100x3 0,1%	
			0,3	20	K100x3 0,3%	
			0,6	20	K100x3 0,6%	
ACL 16+	50/70	ľan	0,2	20	L2_01	180 s miešanie
			0,2	40	L4_01	180 s miešanie
			0,2	20	L2_02	540 s miešanie
			0,2	40	L4_02	540 s miešanie
		juta	0,2	20	J2_01	180 s miešanie
			0,2	40	J4_01	180 s miešanie
			0,2	20	J2_02	540 s miešanie
			0,2	40	J4_02	540 s miešanie
		aramid/polyolefín	0,05	19	FORTA	
		ľan	0,2	40	L4_4,4%	viac spojiva
			0,2	40	L4_02 2X75	vyššia hutniaca E
			-	-	REF. Vol. 2	
		juta	0,1	20	J2_0,1%	element. vlákna
			0,2	20	J2_0,2%	element. vlákna
			0,3	20	J2_0,3%	element. vlákna
	PMB 25/55-60	-	-	-	PmB 25/55-60	
	50/70	juta	0,2	20	J2_1% NaOH	mercerované
			0,2	20	2%NaOH+CuSO4	mercer.+skalica
			0,2	20	J2_HF	hydrofobizované
			0,2	20	J2_2%NaOH+HF	merc.+hydrofob.
ACP 16+ 30%RA	50/70	juta	-	-	REF.	
			0,1	20	0,1% J300	
			0,2	20	0,2% J300	
			0,3	20	0,3% J300*	
		-	0,2	20	0,2% J300 0,5% NaOH	mercerované
			-	-	6%SR	rejuvenátor „SR“
		juta	0,2	20	0,2% J300 6%SR	rejuvenátor „SR“
			0,2	20	0,2% J300 0,5%NaOH 6%SR	mercer.+reju.6%
			0,2	20	0,2% J300 0,5%NaOH 9%SR	mercer.+reju.9%
		-	-	-	6%RF	rejuvenátor „RF“
		Juta	0,2	20	0,2% J300 6%RF_RA	reju. „RF“ na RA
			0,2	20	0,2% J300 6%RF_vlákna	reju. „RF“ na vlákna
			0,2	20	0,2% J300 0,5%NaOH 6%RF	mercer.+reju.6%

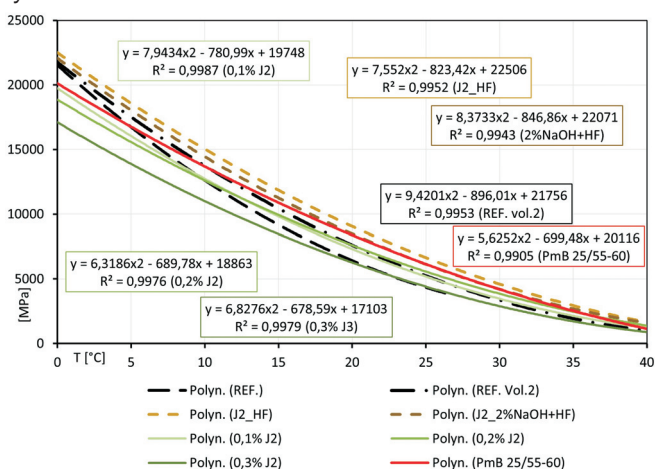
Pozn.: Mercerizácia je ošetrovanie vlákien roztokom NaOH. Elementárne vlákna predstavujú vlákna získané rozpadom prierezu na jednotlivé základné rastlinné vlákna.



obr. 3 ITSR a pevnosť v priečnom ťahu zmesí ACL 16+ v 2. fáze výskumu

3.4 Tuhosť

U zmesí s rastlinnými vláknami bol väčšinou zaznamenaný nárast modulov tuhosti oproti referenčným zmesiam. Ten je žiadúci v oblasti vyšších teplôt, čo potenciálne redukuje tvorbu trvalých deformácií. Pri nízkych teplotách je z dôvodu zníženia rizika tvorby mrazových trhlín žiadúci nárast minimálny, v ideálnom prípade by mala zmes vykázať pokles jej tuhosti. Rastlinné vlákna spôsobili zníženie teplotnej citlivosti. Tento parameter je vypočítaný ako pomer modulu tuhosti pri 0 °C k hodnote dosiahnutej pri 27 °C. Inými slovami, vlákna spôsobili zníženie reálnej konštanty „a“ kriviek modulu tuhosti v závislosti na teplote, znázornených na obr. 4. Výsledky testovania dynamickej tuhosti sú uvedené v dizertačnej práci. Pri niektorých zmesiach bola zistená korelácia s metódou IT-CY.



obr. 4 Pribeh tuhosti v závislosti od teploty vybraných zmesí ACL 16+ z 2. fázy výskumu

3.5 Odolnosť voči šíreniu trhlín

Pre zmesi typu SMA bola skúška vykonaná pri teplotách 0 °C a -10 °C, ktoré boli zvolené s ohľadom na riziko vzniku mrazových trhlín v obrusnej vrstve. Ostatné typy zmesí boli testované pri teplotách 0 °C a 25 °C. Tie boli zvolené s ohľadom na riziko vzniku mrazových trhlín a trhlín vznikajúcich pri prevádzkovej teplote po veľkú časť roka.

Predpoklad zníženia rizika tvorby mrazových trhlín zmesí s rastlinnými vláknami potvrdzujú výsledky testu zmesi SMA 11 S pri teplote -10 °C. Zvýšenie teploty na 0 °C viedlo k nejednoznačnosti výsledkov. Pri bežne používanom obsahu vlákien 0,3 %

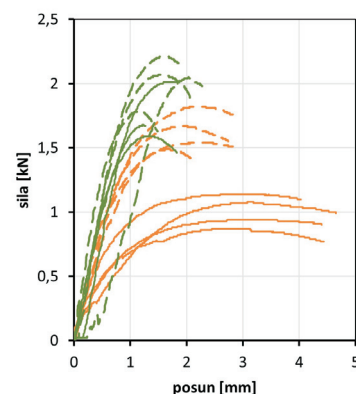
dosiahli zlepšenie len základné zmesi s ľanovými priadzami. U zmesi ACL 16+ bol v prvej časti výskumu pri 0 °C zaznamenaný pokles kritickej hodnoty lomovej húževnatosti a lomovej energie do maximálnej sily. Lomová energia trhliny a celková lomová energia boli však vyššie než u zmesi bez vlákien. Jedným z dôvodov je strata adhézie medzi spojivom a vláknom. Druhá fáza študovania tejto zmesi priniesla, až na výnimky, všeobecné zlepšenie sledovaných parametrov odolnosti voči šíreniu trhlín. Výsledky testovania zmesi ACP 16+ s 30 % RA ukázali na rozdiely medzi testovacími zmesami bez rejuvenátorov a s nimi. Pri teplote 0 °C mali zmesi s rastlinnými vláknami a bez rejuvenátorov rovnakú lomovú húževnatosť, avšak nižšiu lomovú energiu trhliny a celkovú lomovú energiu. Prídanie rejuvenátorov viedlo k zvýšeniu sledovaných charakteristík, avšak lomová energia trhliny ostala stále pod úrovňou referenčnej zmesi. Vyššia skúšobná teplota 25 °C znamenala, až na výnimky, zvýšenie sledovaných parametrov zmesí s rastlinnými vláknami.

3.6 Odolnosť proti trvalým deformáciám

Zaznamenané boli nízke hodnoty parametrov odolnosti proti trvalým deformáciám u zmesi SMA 11 S. Pri zmesi ACL 16+ došlo k zníženiu priemernej hĺbky koľaje po 10 000 cykloch a pomernú hĺbku koľaje (PRD_{AIR}) v porovnaní s referenčnou zmesou. Testovanie dynamickeho modulu tuhosti zmesi ACP 16+ taktiež indikovalo zlepšenie odolnosti proti trvalým deformáciám niektorých zmesí s rastlinnými vláknami.

3.7 Pevnosť v ťahu za ohybu

Skúška trojbodového ohybu, znázornená na obr. 5, ukázala zvýšenie pevnosti v ťahu za ohybu a modulu pružnosti zmesí s rastlinnými vláknami pri zmesi SMA 11 S. V ložnej vrstve a zmesi ACL 16+ bol zaznamenaný nárast sledovaných parametrov len u jednej zmesi s rastlinnými vláknami. Zmesi s ľanovými priadzami dosiahli vyššie parametre, než tie s jutovými. U zmesí s rastlinnými vláknami bol zaznamenaný nárast lomovej energie na zostarnutých telesách. Zvýšenie modulu pružnosti a pevnosti v ťahu za ohybu bolo zaznamenané na zostarnutých vzorkách v zmesiach ACP 16+ 30 % RA s vláknami ošetrovanými NaOH. Naopak, prídanie neošetrených rastlinných vlákien a rejuvenátorov viedlo k najhorším výsledkom.



obr. 5 Záznam sily a posunu skúšky 3PB zmesi SMA a 0,3 % vlákien: K100×3 (zelená) a Scell (oranžová). Čiarkovanou čiarou je zobrazený test zostarnutých telies

3.8 Stekavosť spojiva

Keďže zmes typu SMA okrem prerušenej čiary zrnitosti charakterizuje aj vyšší obsah asfaltového spojiva, bola preverená funkcia rastlinných vlákien ako prvkov znižujúcich, či zabraňujúcich stekaniu asfaltového spojiva. Priemerná steka-

vost' spojiva zmesi L500 0,3% dosiahla hodnotu BD = 0,08 %, pri zmesi K100×3 0,3% bola D = 0,07 %. Referenčná zmes Scell 0,3% mala stekavosť BD = 0,08 %. Všetky testované zmesi teda dosiahli veľmi nízke hodnoty stekavosti asfaltového spojiva BD < 0,1 %.

4 ZÁVER

Asfaltové vozovky sú celosvetovo najrozšírenejším druhom stmelených vozoviek, čím si vysluhujú zaslúženú pozornosť nielen vo vedeckej komunite. Potenciálne sa jedná o 100% recyklovateľný materiál, a preto veľmi dobre zapadá do koncepcie politiky trvale udržateľného rozvoja a cirkulárnej ekonomiky. Je treba zdôrazniť, že tento materiál má potenciál úplnej recyklácie tzv. upcycling spôsobom, kedy je po úprave využitý na originálny účel. O to dôležitejšie je nehatiť túto možnosť prídávaním zlepšujúcich prísad, ktoré na konci životného cyklu nebude možné efektívne recyklovať.

ZDROJE

- [1] STAVEBNICTVÍ ČESKÉ REPUBLIKY 2024. Praha 1: Odbor ekonomických analýz, 2024, s. 52. Ministerstvo průmyslu a obchodu .
- [2] KONCEPCE NÁKLADNÍ DOPRAVY PRO OBDOBÍ 2024 – 2035. 2023. Vyhodnocení a analytická část. Ministerstvo dopravy ČR.
- [3] AL., Björn. Re-road – End of life strategies of asphalt pavements – Summary Report. European Commission, 2012.
- [4] MCDANIEL, Rebecca. Fiber additives in asphalt mixtures. 1. Washington, DC: Transportation Research Board of the National Academies, 2015, pages cm. ISBN 9780309271776.
- [5] BEHNOOD, Ali. Application of rejuvenators to improve the rheological and mechanical properties of asphalt binders and mixtures: A review. Journal of Cleaner Production [online]. 2019, 231, 171–182 [cit. 2023-06-23]. ISSN 09596526. Dostupné z: [doi:10.1016/j.jclepro.2019.05.209](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.05.209)
- [6] GUO, Yunfei, Piergiorgio TATARANNI a Cesare SANGIORGI. The use of fibres in asphalt mixtures: A state of the art review. Construction and Building Materials [online]. 2023, 390 [cit. 2023-06-23]. ISSN 09500618. Dostupné z: [doi:10.1016/j.conbuildmat.2023.131754](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131754)
- [7] GORDON, Scot, Darrel HOLMQUIST a Thomas KENNEDY. Use of Recycled and Waste Fibers in Asphalt Concrete. In: Smartech.gatech.edu [online]. Atlanta: Georgia Institute of Technology, 1997, 1997-05-20 [cit. 2015-12-07]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/1853/10323>
- [8] WU, Shenghua, Ara HAJI a Ian ADKINS. State of art review on the incorporation of fibres in asphalt pavements. Road Materials and Pavement Design [online]. 2023, 24(6), 1559–1594 [cit. 2023-06-25]. ISSN 1468-0629. Dostupné z: [doi:10.1080/14680629.2022.2092022](https://doi.org/10.1080/14680629.2022.2092022)
- [9] KARIMAH, Azizatul, Muhammad RIDHO, Sasa MUNAWAR et al. A Comprehensive Review on Natural Fibers: Technological and Socio-Economical Aspects. Polymers [online]. 2021, 13(24) [cit. 2023-06-25]. ISSN 2073-4360. Dostupné z: [doi:10.3390/polym13244280](https://doi.org/10.3390/polym13244280)
- [10] GOOYA BANAEI ET AL. Teabag-derived micro/nanoplastics (true-to-life MNPLs) as a surrogate for real-life exposure scenarios. Chemosphere. 2024, 368. Dostupné z: [doi:10.1016/j.chemosphere.2024.143736](https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.143736)
- [11] RAFFAELE MARFELLA ET AL. Microplastics and Nanoplastics in Atheromas and Cardiovascular Events. N Engl J Med. 2024, 390(10), 900–910. Dostupné z: [doi:10.1056/NEJMoa2309822](https://doi.org/10.1056/NEJMoa2309822)
- [12] YING CHEN ET AL. Biological effects of polystyrene micro- and nano-plastics on human intestinal organoid-derived epithelial tissue models without and with M cells. Nanomedicine: Nanotechnology, Biology and Medicine. 2023, 50. Dostupné z: [doi:10.1016/j.nano.2023.102680](https://doi.org/10.1016/j.nano.2023.102680)
- [13] FACKELMANN, G., Urrut levels of microplastic pollution impact wild seabird gut microbiomes. Nat Ecol Evol. 2023, (7), 698–703. Dostupné z: [doi:10.1038/s41559-023-02013-z](https://doi.org/10.1038/s41559-023-02013-z)
- [14] LI, Jing, Ling YANG, Lu HE, Ruiwen GUO, Xinyu LI, Youchao CHEN, Yaseen MUHAMMAD a Yu LIU. Research progresses of fibers in asphalt and cement materials: A review. Journal of Road Engineering [online]. 2023, 3(1), 35–70 [cit. 2023-07-02]. ISSN 20970498. Dostupné z: [doi:10.1016/j.jreng.2022.09.002](https://doi.org/10.1016/j.jreng.2022.09.002)
- [15] ČSN EN 12697 – 6. Asfaltové směsi – Zkušební metody – Část 6: Stanovení objemové hmotnosti asfaltového zkušebního tělesa. Praha: Česká agentura pro standardizaci, 2012.
- [16] ČSN EN 12697–8. Asfaltové směsi – Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka – Část 8: Stanovení mezerovitosti asfaltových směsí. Praha: Česká Agentura pro Standardizaci , 2020.
- [17] ČSN EN 12697 – 12. Asfaltové směsi – Zkušební metody – Část 12: Stanovení odolnosti zkušebního tělesa vůči vodě. Praha: Česká agentura pro standardizaci, 2009.
- [18] ČSN EN 12697 – 23. Asfaltové směsi – Zkušební metody – Část 23: Stanovení pevnosti v příčném tahu. Praha: Česká agentura pro standardizaci, 2007.
- [19] ČSN EN 12697–26. Asfaltové směsi – Zkušební metody – Část 26: Tuhost. Česká agentura pro standardizaci, 2019.

Lektorský komentář

Článek se zabývá využitím přírodních výztužných vláken do asfaltových směsí s ohledem na dosažení srovnatelných parametrů těchto směsí se směsmi se syntetickými vlákny. Jedná se tedy o ekologickou alternativu, která by měla vést k nižší zátěži životního prostředí. To je bezpochyby současný trend, který je sledován u většiny stavebních látek.

Článek představuje jednu z prvních prací na toto téma v České republice. Výsledky jednotlivých zkoušek nevycházejí vždy příznivě pro rostlinná vlákna a jejich modifikace, ale to je u takto experimentálních prací běžné. Rostlinná vlákna vykazují vyšší stekavost u směsí SMA a sníženou citlivost na účinky vody. Negativní vlastností je též jejich zvýšená nasákavost a riziko předčasné degradace. Na druhé straně je srovnatelná odolnost proti tvorbě trvalých deformací. Z výše uvedeného vyplývá, že této oblasti bude muset být v budoucnu věnována ještě velká pozornost a experimentální úsilí.

Prof. Dr. Ing. Michal Varas, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební