

## PodĎakovanie

Chcem sa poĎakovať všetkým svojim vedúcim: in memoriam prof. Františku Lehovcovi, doc. Františku Luxemburkovi a doc. Ludvíkovi Věbrovi, že ma prijali pod svoje krídla a umožnili vznik tejto práce. Taktiež chcem poĎakovať Ing. Petrovi Mondscheinovi, Ph.D. a Ing. Janovi Valentinovi Ph.D., ktorí ma viedli po praktickej stránke na ceste hlbšieho poznania vedy a problematiky vozoviek a asfaltových zmesí. Ďalej si poĎakovanie zaslúžia starší súčasní, či minulí kolegovia z laboratória: Jakub Šedina, Jan Suda, Pája Vacková, Lucka Soukupová a Terka Valentová, ktorí boli vždy nápomocní a ochotní porozprávať sa a poradiť. Z vrstovníkov sa chcem poĎakovať Majde Belhaj pre jej ochotu, obetavosť a spoluprácu na výskume a ďalším jej krajanom z Tuniska, najmä dvojici Seif Rhouma a Baha Oueaslati za skvelé zimné tri mesiace ich stáže. Veľkú vĎaku si taktiež zaslúži doc. Ing. Pavel Padevĕt, Ph.D. z Katedry mechaniky za testovanie ťahovej pevnosti priadzí. Na záver sa chcem poĎakovať svojej rodine, bratovi a hlavne mojím rodičom za ich celoživotnú podporu, trpezlivosť a gramatickú korektúru tejto práce.





## Abstrakt

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 napr. pomocou rôznych prísad. Vzhľadom k nemožnosti vytvoreniu 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

## Abstract

Asphalt pavements 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 defects is as small as possible, and the service life of pavements is extended. We can achieve this e.g., using various additives. Due to the impossibility of creating a perfectly resistant material, pavements must be renewed periodically. Therefore, it is advantageous if the additives are made of materials fully in accordance with the principles of the circular economy and sustainable development. This work examines the possibility of using such additives – vegetable fibers. The goal was to investigate their reinforcing function in three types of asphalt mixtures, chosen regarding the entire composition of a typical asphalt pavement. The results of selected functional and empirical tests showed that vegetable fibers can serve as reinforcing elements in asphalt mixtures.

**Key words:** bitumen mixture, reinforcement, fibres, vegetable fibres, additive



## Prehľad akronymov a skratiek

RA	Reclaimed Asphalt – asfaltový recyklát, ekvivalent R-materiálu
CF	cigaretové filtre
SMA	Stone Mastic Asphalt – asfaltový koberec mastixový
PA	Porous Asphalt – asfaltový koberec drenážny
ACL	Asfaltový betón pre ložné vrstvy
ACP	Asfaltový betón pre podkladové vrstvy
PMB	Polymer Modified Bitumen – polymérom modifikovaný asfalt
PAV	Pressure Ageing Vessel – test dlhodobého starnutia
hm.	hmotnosť/hmotnosti
3D	troj-dimenzionálny
ITSR	Indirect Tensile Strength Ratio – pomer pevností v priečnom ťahu [%]
IT-CY	Indirect Tension to Cylindrical – metóda merania tuhosti na válcových telesách
4PB-PR	4 Point Bending – Prism – metóda merania dynamickej tuhosti na trámikoch
MSCR	Multiple Stress Creep Recovery test
G, G <sub>f</sub>	Lomová energia [J/m <sup>2</sup> ]
E	Energia testu [J]
K <sub>cr</sub>	Kritická hodnota lomovej húževnatosti [N/mm <sup>3/2</sup> ]
E*	Dynamický komplexný modul tuhosti [MPa]



# OBSAH

1. ÚVOD.....	4
1.1 Cieľ práce .....	6
1.2 Asfaltová zmes.....	7
1.3 Konštrukcia asfaltovej vozovky.....	7
1.3.1 Obrusná vrstva .....	7
1.3.2 Ložná vrstva.....	7
1.3.3 Podkladové vrstvy .....	8
1.3.4 Zemná pláň.....	8
1.4 Poruchy asfaltových vrstiev .....	8
1.4.1 Trhliny.....	9
1.4.2 Trvalé deformácie krytu .....	13
2. VLÁKNA V ASFALTOVÝCH ZMESIACH .....	14
2.1 Typy používaných vlákien .....	16
2.2 Prírodné vlákna v asfaltových zmesiach .....	16
2.2.1 Minerálne vlákna.....	16
2.2.2 Živočíšne vlákna.....	16
2.2.3 Rastlinné vlákna.....	17
2.3 Syntetické vlákna v asfaltových zmesiach .....	19
2.2.2 Minerálne vlákna.....	20
2.2.3 Keramické vlákna.....	20
2.2.4 Sklenené vlákna.....	21
2.2.5 Oceľové vlákna .....	21
2.2.6 Uhlíkové vlákna .....	21
2.2.7 Polymérne vlákna .....	22



2.3	Efektivita použitia vlákien v reálnom svete .....	24
3.	VYBRANÉ RASTLINNÉ VLÁKNA .....	27
3.1	Prečo nepoužiť syntetické vlákna? .....	27
3.2	Stavba rastlinných vlákien .....	28
3.3	Negatíva použitia rastlinných vlákien .....	31
3.3.1	Transport vody vo vybraných rastlinných priadkach .....	31
3.3.2	Nasiakavosť asfaltového spojiva vybranými rastlinnými priadkami .....	34
3.3.3	Termálna degradácia a pevnosť v ťahu vybraných rastlinných vlákien .....	35
3.4	Lignocelulóзовé vlákna a starnutie asfaltových zmesí .....	42
3.4.1	Starnutie celulóзовých vlákien .....	45
3.5	Rastlinné vlákna použité v rámci vlastného výskumu .....	46
3.5.1	Konope .....	47
3.5.2	Ľan .....	48
3.5.3	Juta .....	49
3.6	Prehľad vlastností vybraných textilných vlákien .....	50
4.	EXPERIMENTÁLNA ČASŤ .....	52
4.1	Skúšobné metódy .....	52
4.1.1	Objemová hmotnosť a medzerovitosť .....	52
4.1.2	Stanovenie citlivosti voči účinkom vody a mrazu .....	53
4.1.3	Tuhosť .....	53
4.1.4	Odolnosť voči šíreniu trhlín .....	54
4.1.5	Odolnosť proti trvalým deformáciám - skúška vyjazďovania kolesom .....	55
4.1.6	Pevnosť v ťahu za ohybu .....	56
4.2	Obrusná vrstva – SMA 11S PMB 45/80-65 .....	56
4.2.1	Objemová hmotnosť a medzerovitosť .....	58
4.2.2	Citlivosť voči účinkom vody .....	59



4.2.3	Tuhosť.....	61
4.2.4	Odolnosť voči šíreniu trhĺín .....	63
4.2.5	Odolnosť proti trvalým deformáciám .....	65
4.2.6	Pevnosť v ťahu za ohybu .....	66
4.2.7	Stekavosť spojiva .....	67
4.3	Ložná vrstva – ACL 16+ 50/70.....	67
4.3.1	Objemová hmotnosť a medzerovitosť .....	69
4.3.2	Citlivosť voči účinkom vody.....	71
4.3.3	Tuhosť.....	73
4.3.4	Odolnosť voči šíreniu trhĺín .....	76
4.3.5	Odolnosť proti trvalým deformáciám .....	81
4.3.6	Pevnosť v ťahu za ohybu .....	82
4.4	Podkladová vrstva – ACP 16+ 50/70 30 % RA.....	83
4.4.1	Objemová hmotnosť a medzerovitosť .....	85
4.4.2	Citlivosť voči účinkom vody a mrazu .....	87
4.4.3	Tuhosť.....	89
4.4.4	Odolnosť voči šíreniu trhĺín .....	91
4.4.5	Dynamický modul tuhosti .....	94
4.4.6	Pevnosť v ťahu za ohybu .....	102
5.	ZÁVER .....	104
	Literatúra.....	108
	Zoznam obrázkov .....	118
	Zoznam tabuliek .....	122



# 1. ÚVOD

Príslušníci rodu Homo sa už po milióny rokov snažili nájsť si svoje miesto na tejto planéte a prísť nato, ako zabezpečiť svoje prežitie. Aj napriek fyzickým nedostatkom, oproti vtedajším živočíchom sediacim na pomyselných pyramíde potravinového reťazca, sa dokázali etablovať a zveľadiť svoje silné stránky. Táto cesta vedie až do dneška, kedy druh Homo sapiens prakticky ovládol planétu Zem. Stopy po jeho činnosti sú badateľné už aj v najodľahlejších kútoch Zeme. V posledných dekádach došlo k výraznému technologickému pokroku. Čo sa ešte pred niekoľkými rokmi zdalo nemožné, je dnes samozrejmé. Okrem iného, pokrok umožnil za posledných 100 rokov prudký nárast populácie ľudí (viac, než štvornásobne [1]) a predĺženie dĺžky ich života (v priemere 2,5x [2]). Priamy súvis s predošlými faktami má vyššia spotreba surovín a iných látok, potrebných pre zabezpečenie súčasného životného štandardu a jeho rastu. Logicky sa potom priamoúmerne navyšuje produkcia odpadov. Tie sa hromadia v atmosfére, vo vode aj na súši. V minulosti sa s nimi dokázala vysporiadať príroda. Dnes jej však musíme pomôcť. Ako najinteligentnejšie stvorenia na planéte Zem by sme to mali byť schopní dokázať.

Stavebný priemysel prispieva k produkcii odpadov významnou mierou. Jedná sa o prirodzený proces, keďže žiadna stavba nevydrží v používaní schopnom stave večne. Klimatické vplyvy, dynamické a statické silové zaťaženie, či procesy spojené so zmenou materiálu a jeho vlastností v čase sa skôr či neskôr podpíšu na každej stavebnej konštrukcii. Periodicky teda musí dochádzať k ich obnove. Cestné staviteľstvo nie je výnimkou. Vozovky ciest sú po celom svete denne vystavené oxidačným procesom atmosféry, slnečnému žiareniu, dažďu, nízkej a vysokej teplote. Keď sa k nim pridá neustále zvyšujúce sa dopravné zaťaženie, nemajú to ľahké. Podobne sú na tom odborníci pôsobiaci v oblasti cestného staviteľstva. Na jednu stranu je v nich dlho zakorenená požiadavka na čo najtrvanlivejšie materiály a konštrukcie, ktoré v ideálnom prípade prežijú celé návrhové obdobie (20 – 25 rokov) bez väčšej údržby. Na stranu druhú je z praxe jasné, že vrchné vrstvy vozoviek majú problém vydržať aj polovicu návrhového obdobia. Asfaltové vozovky sú na tom z tohto hľadiska horšie, ako betónové. Ani jednému materiálu krytu sa však poruchy počas návrhového obdobia nevyhýbajú. V končnom dôsledku totiž výsledné správanie vozovky neovplyvnia len externé faktory ale celý výrobný proces zvoleného materiálu, od zamiešania zmesi až po položenie vrstvy.



Ideálny materiál pre vozovky pozemných komunikácií by mal teda vydržať čo najdlhšie bez porušenia alebo výrazných objemových zmien. Vzhľadom k spomínaným vplyvom a zaťaženiu vozoviek však k poruche a následnej výmene materiálu skôr, či neskôr dôjde. Materiál vozoviek by mal byť teda recyklovateľný. Navyše, z pohľadu stavebného priemyslu by taký materiál mal byť aj ekonomicky výhodný, aby sa na trhu dobre etabloval. Ako sa teda k vyššie uvedeným, tak trochu antagonistickým požiadavkám postaviť?

Po uplynulé dekády sa cestní inžinieri venovali najmä otázke maximálneho predĺženia životnosti. V druhej polovici 20. storočia prišli nemeckí inžinieri s nápadom zvýšiť obsah asfaltového spojiva v zmesi za súčasnej úpravy (prerušenia) krivky zrnitosti. Vznikla tak zmes typu asfaltový koberec mastixový (SMA), ktorá vykazuje vyššiu odolnosť voči trvalým deformáciám a trhlinám. Bežnou praxou sa tiež stala modifikácia asfaltového spojiva rôznymi syntetickými polymérmi a kaučukmi. Disipujúce asfaltové zmesi potom predstavujú vrchol snaženia v oblasti modifikácie spojiva. Zavedenie syntetických polymérov do spojiva prinieslo okrem predĺženia životnosti možnosť zníženia hrúbky asfaltovej vrstvy, či dokonca vznik nových typov zmesí. Jedná sa napr. o asfaltový koberec drenážny, kde sú veľké zrná kameniva do seba zakliesnené a spojené pomocou malých kontaktných plôšok. Takýto systém vytvára vzájomne spojené medzery, do ktorých môže voľne vnikáť vzduch aj voda a tak sú na spojivo kladené najvyššie nároky. Oxidácia tenkého asfaltového filmu a prípadná expanzia ľadu pri teplotách pod bodom mrazu môže ľahko spôsobiť uvoľnenie jednotlivých zrn, čo môže viesť až k rozpadu celej vrstvy. V posledných rokoch sa potom objavili pokusy o modifikáciu spojiva drvenou gumou pochádzajúcou z použitých pneumatík vozidiel. Takéto zmesi majú prirodzene protihlukové vlastnosti a vyššiu elasticitu spojiva. Problémom však býva vysoká teplota miešania a hutnenia.

Ďalším spôsobom, ako predĺžiť životnosť asfaltových zmesí je použitie prísad. Môžu to byť prísady na zlepšenie príľnavosti spojiva ku kamenivu, vedúcemu k zvýšeniu adhézie medzi týmito základnými prvkami zmesi. Má význam ich aplikovať hlavne v prípade, že máme k dispozícii kamenivo kyslého charakteru (žuly, ruly, svory, kremence a pod.). Nasledujúce prísady síce životnosť vrstvy priamo nezlepšujú, avšak umožňujú znovu použitie zdegradovaného materiálu. Jedná sa o tzv. rejuvenátory, ktoré zabezpečia obnovu vlastností zostarnutého asfaltového spojiva z asfaltového recyklátu (RA). Umožňujú tým jeho použitie





do nových vrstiev vozovky. Teoreticky tak menia asfaltové vozovky na 100% recyklovateľný materiál.

Okrem ďalších okrajových možností zlepšenia vlastností asfaltových zmesí, pod ktoré môžeme zaradiť napr. úpravu alebo náhradu štandardného vápencového fileru, existuje ešte jeden druh bežne používanej prísady. Jedná sa o vlákna. Tie môžu mať rôznu funkciu a táto v zásade rozhoduje aj o materiáli, z ktorého sú vyrobené. Ďalšie časti dizertačnej práce prinesú na vlákna detailnejší pohľad. Vzhľadom k uvedenému na predchádzajúcich stránkach sa práca zameria na vlákna rastlinného pôvodu, s primárne výstužnou funkciou.

## 1.1 Cieľ práce

Cieľom tejto dizertačnej práce je rozpracovanie problematiky okolo vplyvu rastlinných vlákien ako výstužných prvkov na funkčné vlastnosti asfaltových zmesí. Dôraz je kladený na preverenie možnosti ich uplatnenia v praxi. Zároveň sa práca snaží ukázať ďalšie vývojové smery v rámci tejto oblasti.

Výstužné prvky sú vo všeobecnosti charakterizované svojou dĺžkou, plochou (priemerom) a členitosťou prierezu a materiálom, z ktorého sú vyrobené. Čo sa týka aplikácie v asfaltovej zmesi, jedným zo základných parametrov je obsah prísad. Cieľom práce bolo preveriť vplyv rôznych materiálov vlákien, ich dĺžky, prierezu, úpravy povrchu a obsahu v zmesi na vybrané funkčné a empirické vlastnosti v troch typoch asfaltových zmesí tak, aby boli vlákna otestované v typickej skladbe asfaltových vozoviek (*Obrázok 1*).

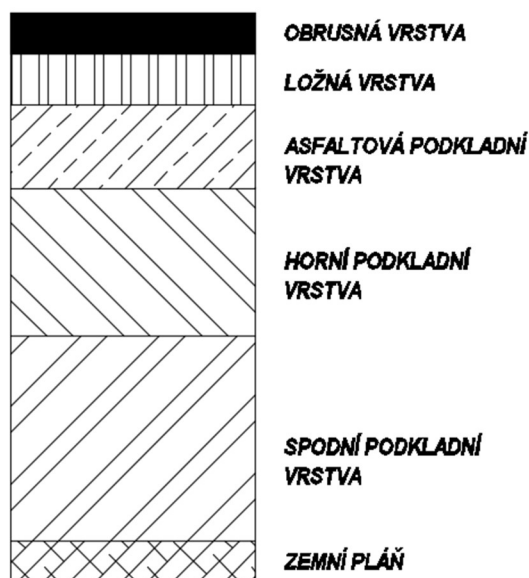
Rastlinné vlákna sa v stavebníctve postupne využívajú stále vo väčšej miere. V pozemnom staviteľstve sa v súčasnosti tieto prírodné materiály využívajú najmä ako izolácie budov. Tieto vlákna však majú väčší potenciál, než len jednoduché izolanty. V automobilovom priemysle sa napríklad využívajú ako výstuž plastových dielcov, pričom vzniká kompozitná štruktúra s vyššou pevnosťou a nižšou váhou, než majú klasické plastové dielce. Do inžinierskych konštrukcií sa však rastlinné vlákna ako výstužný prvok aplikujú len experimentálne, či v obmedzenej miere. Preveruje sa napríklad možnosť aplikácie rastlinných vlákien ako výstužnej prísady do betónu. V oblasti asfaltových vozoviek je situácia podobná. V praxi sa do asfaltových zmesí s vyšším obsahom spojiva bežne pridávajú len celulózové vlákna, pochádzajúce majoritne z recyklácie papiera. Ich primárnou funkciou však nie je zmes vystužovať.



## 1.2 Asfaltová zmes

Asfaltová zmes je zmesou kameniva a asfaltového spojiva, prípadne ďalších prísad a prímiesí. Asfaltovým spojivom môže byť asfalt, asfaltová emulzia alebo riedený asfalt. Kamenivo vytvára kostru celej zmesi tým, že sa jednotlivé zrná vzájomne dotýkajú a zakliňujú. Asfaltové spojivo tieto zrná len spája, t. j. „stmeľuje“ dohromady. Rozhodujúce pre správnu voľbu týchto dvoch vstupných materiálov a voľbu druhu asfaltovej zmesi sú požadované funkcie vo vozovke hlavne s ohľadom na dopravné zaťaženie, návrhovú úroveň porušenia a charakteristiky klímy. [3]

## 1.3 Konštrukcia asfaltovej vozovky



Konštrukcia vozovky sa skladá z niekoľkých častí. Horná časť je označovaná ako vrstva krytu. Tá býva zložená z vrstvy obrusnej a ložnej. Pod vrstvou krytu sa nachádzajú podkladové vrstvy, delené na asfaltovú podkladovú, hornú a spodnú podkladovú vrstvu. Celú konštrukciu uzatvára zemná pláň (Obr. 1), pod ktorou je aktívna zóna (zvyčajne hr. 0,5 m) a parapláň. [4]

### 1.3.1 Obrusná vrstva

Obrusná vrstva je v priamom kontakte s kolesami vozidiel. Preto je veľmi dôležité, aby mala správne povrchové vlastnosti, bola dostatočne rovná,

**Obrázok 1: Konštrukcia asfaltovej vozovky**

nevznikali na nej trvalé deformácie, dobre odvádzala vodu a zároveň bola čo najmenej hlučná. Dôležitým faktorom pri navrhovaní obrusnej vrstvy sú taktiež klimatické podmienky, ktorým je vystavená. V súčasnosti je snaha o znižovanie hrúbky tejto vrstvy. [4]

### 1.3.2 Ložná vrstva

Ložná vrstva slúži ako podklad pre vrstvu obrusnú. Prenáša dopravné zaťaženie do podkladových vrstiev, a preto je veľmi dôležité, aby bola dostatočne tuhá a nevznikali na nej trvalé deformácie – koľaje. Jej hrúbka sa pohybuje v rozsahu od 50 mm do 90 mm. [4]



### 1.3.3 Podkladové vrstvy

Podkladové vrstvy majú v konštrukcii vozovky dôležitú nosnú funkciu. Prenášajú zaťaženie z vrstiev krytu do podložia. Rovnako ako u ložnej vrstvy je dôležité, aby aj asfaltová podkladová vrstva bola veľmi tuhá a odolávala vzniku trvalých deformácií. Z hľadiska životného cyklu vozovky a s ním spojených nákladov je na podkladové vrstvy kladená požiadavka dlhej životnosti. Ak sa začnú tvoriť trhliny v obrusnej či ložnej vrstve, ale podkladová vrstva zostane neporušená, bude oprava nielen finančne, ale aj časovo menej náročná. Z tohto dôvodu je dôležité, aby podkladové vrstvy vykazovali vysokú pevnosť v ťahu za ohybu a vysokú pevnosť v šmyku. [4] Horná a spodná podkladová vrstva býva zhotovená buď z cementom stmelených materiálov alebo zo štrkodrviny, či mechanicky spevnenej zeminy.

### 1.3.4 Zemná pláň

Zemná pláň je horná plocha zemného telesa, ktorá tvorí hornú lícnu stranu aktívnej zóny. Táto plocha by mala byť pred začiatkom výstavby vozovky dobre urovnaná v požadovanom priečnom aj pozdĺžnom smere a zhutnená na predpísanú úroveň. [4]

## 1.4 Poruchy asfaltových vrstiev

Každá hmota účinkami zaťaženia prevádzkou, klimatickými vplyvmi prostredia a teplotnými zmenami podlieha poškodzovaniu a porušovaniu. Taktiež obrusná vrstva a konštrukcia vozovky vplyvom zaťaženia a rôznych klimatických podmienok vykazuje podľa svojich vlastností mechanizmy porušovania. Tieto poškodzovania a porušovania sa vyskytujú zákonite a náhodne, možno ich však výberom stavebných materiálov, ich zložením a prevedením ovplyvniť, obmedziť nežiadúce vlastnosti a znížiť pravdepodobnosť ich výskytu. Tým sa ovplyvní rýchlosť vývoja porušovania čo do významu a plošného rozsahu, ale porušeniu sa nezabráni. Je potrebné vždy počítať s bežnou údržbou, s údržbou povrchu vozovky a opravou vozovky. [5]

V rámci tejto práce sa jedná o poruchy asfaltových vrstiev. Je teda potrebné zdôrazniť základné vlastnosti spojiva, čiže asfaltu. Vlastnosti asfaltu sú výrazne závislé od teploty. Pri nízkych teplotách (podľa druhu asfaltu – pri teplote 5 °C až -10 °C) a vysokých rýchlostiach zaťaženia (potom môže byť teplota o 10 °C vyššia) sú asfaltové zmesi pružné (možno ich prirovnať k betónu). Pri vysokých teplotách (podľa druhu asfaltu - pri teplote 40 °C až 65 °C)



a dlhodobom zaťažení (pomalé rýchlosti a státia vozidiel) sa chová ako hustá kvapalina. Dochádza k vzájomnému posunu zŕn kameniva a asfaltová zmes sa pohybuje z miest sústredeného tlaku do miest mimo jeho pôsobenia (možno ju prirovnať k hustému cestu). Táto základná vlastnosť asfaltu potom ovplyvňuje správanie vrstvy a následne aj porušovanie vrstvy a celej vozovky stratou hmoty, trhlinami a deformáciami. [5]

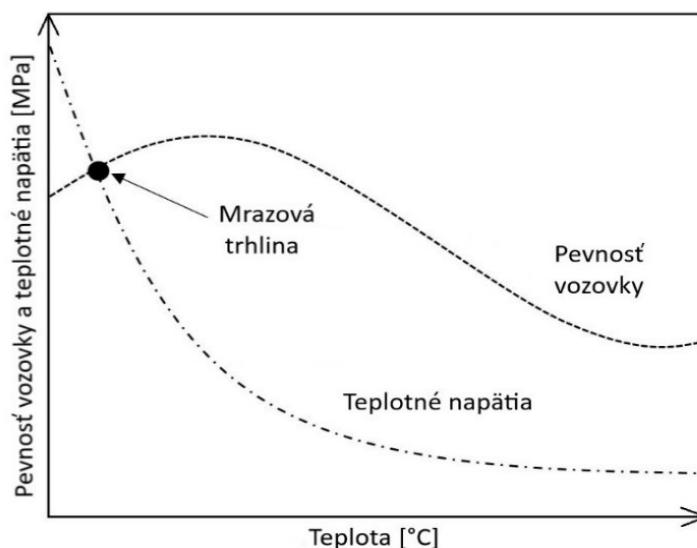
Vznik porúch má zvyčajne za následok skrátenie životnosti vozovky a zníženie komfortu a bezpečnosti jazdy. Ich potlačením teda prispievame k predĺženiu životnosti vozoviek, k znižovaniu celkových nákladov cestnej siete, vrátane nákladov na údržbu vozového parku, k zníženiu stresu vodičov a k efektívnemu hospodáreniu s materiálmi a energiami.

Vlákná v asfaltových zmesiach majú potenciál potlačiť širokú škálu porúch asfaltových vozoviek. Keďže sa táto práca zaoberá výstužnými prvkami, ďalej sa venuje poruchám spôsobených ťahovými napätiami.

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. 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. [6]

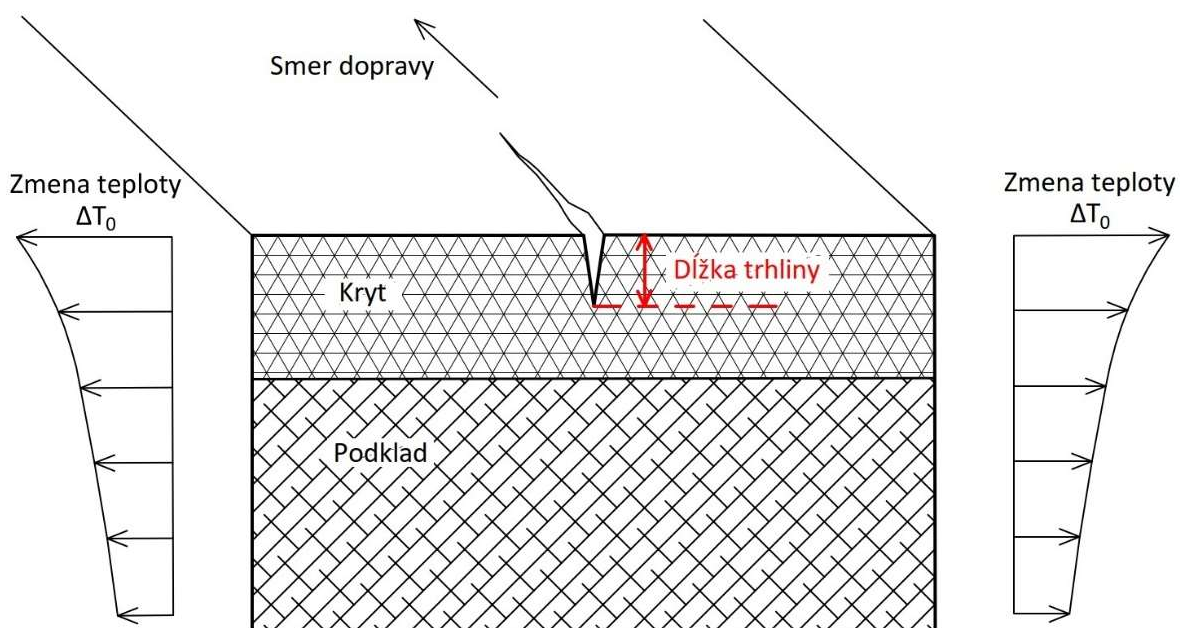
#### **1.4.1 Trhliny**

Asfaltová vozovka je vystavená priamo okolitému prostrediu a neustálemu cyklovaniu teploty. Prudký pokles teploty môže spôsobiť obrovské zmrašťovacie napätie. Pretože je asfaltové súvrstvie spojené s podkladom, nebude sa môcť voľne ohýbať. V dôsledku toho môže teplota vytvárať rôzne napätia pri povrchu a na spodku súvrstvia. Pri opakovanom pôsobení dopravného zaťaženia a napätia od teploty sa mikrotrhliny na povrchu a spodku rozšíria, zhustnú a spoja sa, aby sa nakoniec vytvorili makrotrhliny, ktoré potom spôsobujú poškodenie konštrukcie vozovky. [7] [8] Tepelná citlivosť asfaltových zmesí je príčinou, prečo je tento typ trhlín jedným z najčastejších problémov na asfaltových vozovkách. [9]

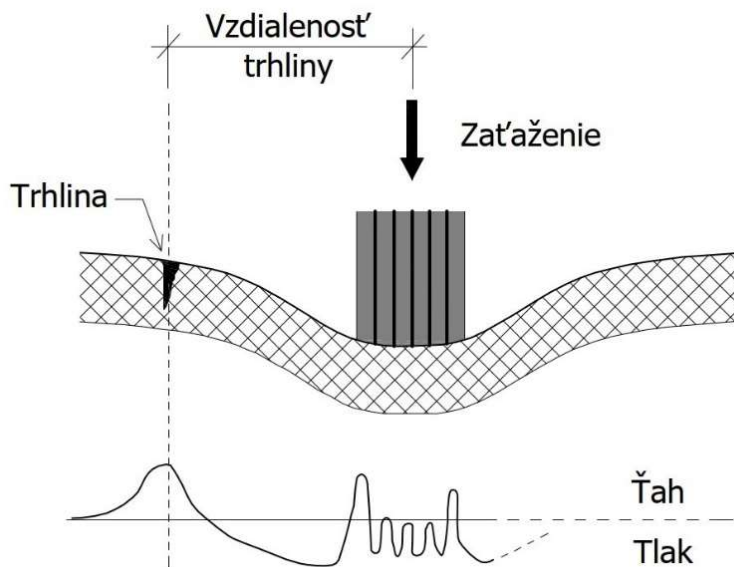


**Obrázok 2: Vznik mrazovej trhliny v závislosti od teploty a ťahovej pevnosti vozovky [10]**

Takýmto trhlinám hovoríme **mrazové trhliny**. Okrem prudkého poklesu teploty môžu byť spôsobené veľmi nízkymi teplotami ( $-10\text{ °C}$  a menej), pri ktorých spojivo síce vykazuje vysokú tuhosť, avšak úmerne narastá aj jeho krehkosť. Tento druh trhlín sa radí do typu „top-down“, kedy sa trhlina šíri z povrchu vozovky do spodných vrstiev. Opačným smerom (bottom-up) sa šíria reflexné, mozaikové a sieťové trhliny.



**Obrázok 3: Mechanizmus vzniku mrazovej trhliny vo vozovke [8]**

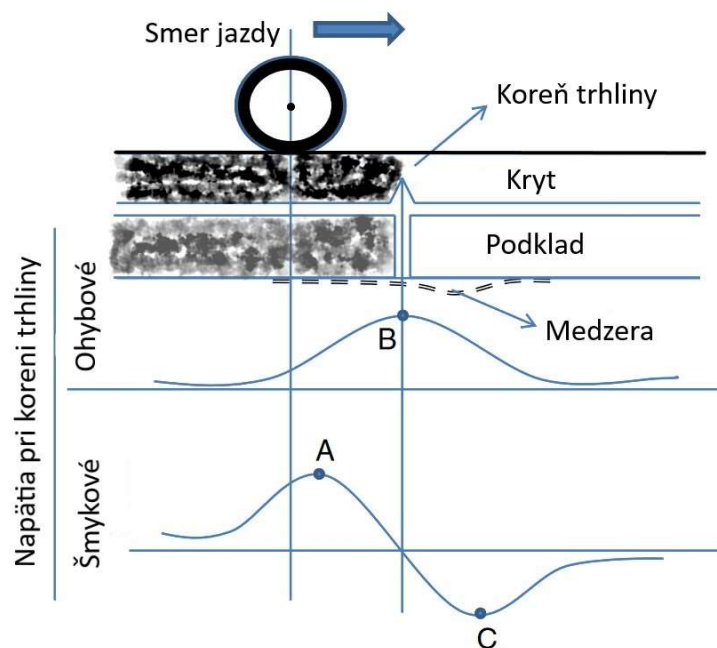


Obrázok 4: Trhlina typu „top-down“ od zaťaženia dopravou [11]

**Reflexné trhliny** sa vyskytujú len vo vozovkách s hydraulicky stmelenou podkladovou vrstvou. Pri výstavbe podkladov stmelených hydraulickými spojivami, rovnako ako pri betóne, dochádza pri tvrdnutí vrstvy k zmršťovaniu, ktoré pokiaľ vyvolá vo vrstve ťahové napätie vyššie, než je pevnosť materiálu vrstvy. Dôjde tak k vzniku priečných trhlín cez celú šírku vrstvy. Po vzniku zmršťovacích trhlín dochádza k ich roztváraniu a uzatváraniu teplotnou rozťažnosťou v závislosti od teploty vrstvy. Pokiaľ je vrstva prekrytá asfaltovými vrstvami, spojením vrstiev tohto podkladu sa pohyby teplotnej rozťažnosti prenášajú do asfaltových vrstiev a trhlina začne prerastať až na povrch vozovky. Rozširovanie a uzatváranie trhlín pokračuje, trhlinami preniká voda a trhliny sú vyplňované pieskom a nečistotami. [5]

**Mozaikové trhliny** sú charakteristické pre nedodržanie technologickej disciplíny pri kladení vrstiev. Príčinou ich vzniku môže byť nedokonalé spojenie vrstiev krytu, nepoužitie celoplošne prevedeného spojovacieho postreku alebo znečistenie vrstvy pred kladením novej asfaltovej vrstvy. [12]

Opakovaným zaťažovaním v mieste najvyššieho namáhania na spodnej lícnej strane asfaltových vrstiev dôjde k vzniku narušenia spojenia medzi zrnami a k zárodku trhliny. Trhlina sa šíri k povrchu vozovky a do dĺžky. [5] **Sieťové trhliny** teda zasahujú všetky stmelené vrstvy vozovky, pričom oprava tejto poruchy si vyžaduje zásah do všetkých konštrukčných vrstiev vozovky.



**Obrázok 5: Schéma vzniku trhlín typu „bottom-up“ [13]**

Posledným druhom trhlín sú tie, ktoré vzniknú na krajoch vozovky. Príčin vzniku tejto poruchy je hneď niekoľko. Môže to byť nedostatočne zhutnené podložie na okraji vozovky, nesprávne prevedené rozšírenie, či podmáčanie okrajov vozovky. Taktiež je častý ich výskyt pri cudzích telesách vo vozovke, napríklad pri kanalizačných vpustoch. [12]



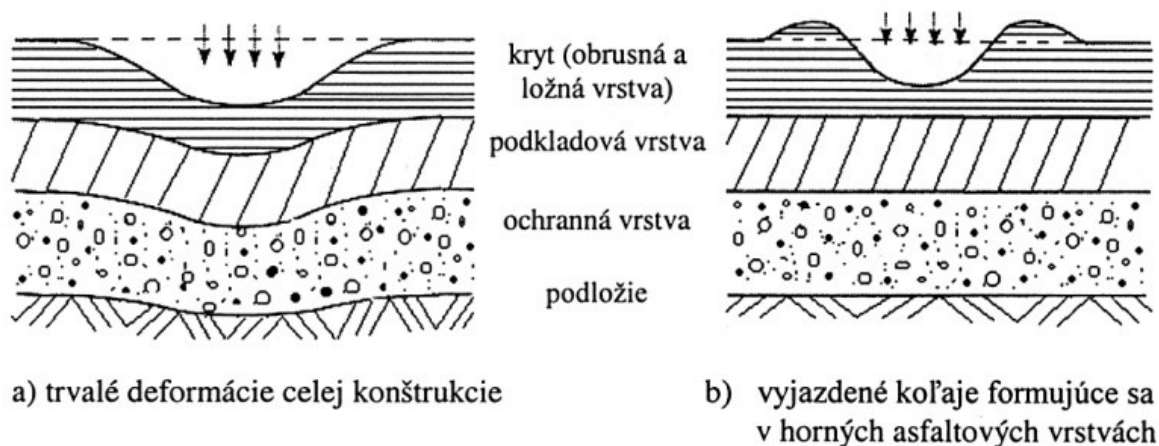
**Obrázok 6: Sieťové trhliny [10]**



### 1.4.2 Trvalé deformácie krytu

Zmeny v morfológii povrchu vozovky nazývame trvalé deformácie. Výstuž v asfaltových zmesiach nemusí primárne slúžiť len k zachytávaniu rozvíjajúcich sa trhlin. Keďže sú vlákna v zmesi rozptýlené rovnomerne a náhodne, teoreticky zvyšujú ťahovú pevnosť a modul tuhosti asfaltovej zmesi vo všetkých smeroch. Preto sa jedná o tzv. 3D vystuženie zmesi. Tento efekt, spolu so stabilizáciou spojiva, má potom vplyv aj na tvorbu trvalých deformácií. Vďaka nemu dochádza k roznášaniu zaťaženia z povrchu vozovky na väčšiu plochu spodných vrstiev, čím dochádza k redukcii napätia.

Trvalé deformácie krytu vznikajú pri vysokých teplotách, v miestach s pomalou dopravou, so zaťažením sústredeným do jazdných stôp alebo tam, kde je veľká frekvencia dopravného zaťaženia. Taktiež sú tieto poruchy časté v križovatkách, kde dochádza k brzdeniu a rozbiehaniu vozidiel, t. j. vnášaniu vodorovných síl do vozovky, koncentrovaných vo vrstvách krytu. Môžu byť spôsobené nedostatočnou únosnosťou podložia alebo podkladových vrstiev (*Obrázok 7a*), či nedostatočnou tuhosťou horných, krytových vrstiev (*Obrázok 7b*).



Obrázok 7: Trvalé deformácie vozovky s asfaltovým krytom - koľaje [14]





## 2. VLÁKNA V ASFALTOVÝCH ZMESIACH

Vozovky s asfaltovým krytom sú jednoznačne najrozšírenejším druhom vozoviek v Európe. Odhaduje sa, že viac, než 90 % z 5,2 miliónov km dlhej siete európsky spevnených ciest tvorí tento druh vozoviek [15]. 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, ktorý hrá kľúčovú rolu v správaní asfaltovej zmesi, predovšetkým určuje vlastnosti vozovky a dĺžku jej životnosti. Najmä starnutie asfaltu počas životnosti vrstvy zhoršuje nízkoteplotné a únavové vlastnosti, čo má za následok skrátenie životnosti vrstvy a celej vozovky. [16] Asfaltové spojivo determinuje viskoelastické vlastnosti asfaltovej zmesi a jej teplotnú citlivosť. Pre zlepšenie prevádzkových vlastností je možné použiť napr. spôsoby uvedené v úvode tejto práce, z ktorých je ďalej rozpracovaná oblasť vlákien.

Vlákná 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 stále 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 a zvyšujú súdržnosť zmesi, znižujú výskyt reflexných alebo únavových trhlín a zvyšujú odolnosť proti trvalým deformáciám. Vlákna možno použiť aj ako stabilizátory, ktoré znižujú stekavosť asfaltových zmesí. Toto platí najmä pre asfaltový koberec mastixový 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. To tiež prispieva k prevencii „potenia“ vozoviek. [17]

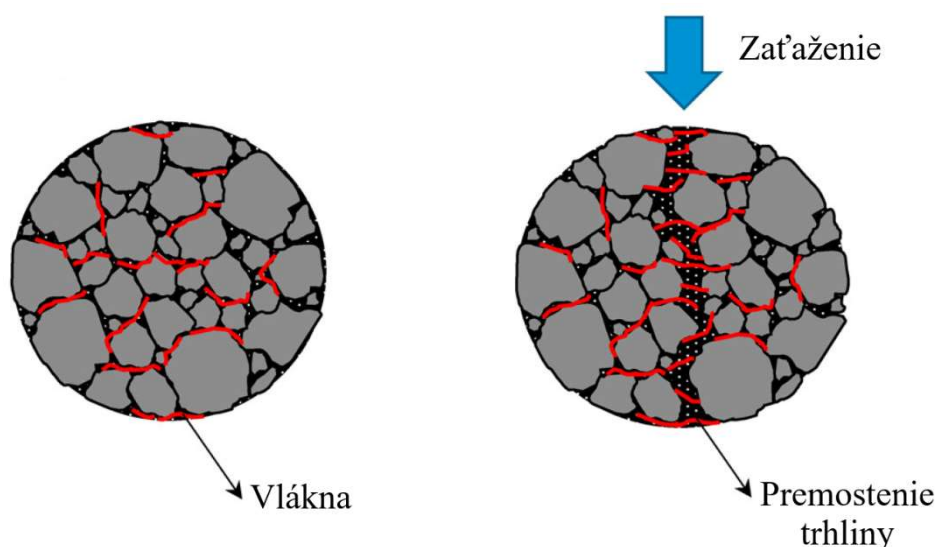


Vlákná teda v zásade môžu plniť v asfaltovej zmesi dve základné funkcie:

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.

Použitie vlákien pre zníženie stekavosti asfaltového spojiva sa využíva v zmesiach s vyšším obsahom asfaltu, kde vlákna (napr. celulózoové) absorbujú asfaltové spojivo. Celulózoové 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.

Celkovo môže pridanie vlákien zmeniť viskoelasticitu asfaltu, zvýšiť dynamický modul a poddajnosť v creepe, zlepšiť odolnosť voči trvalým deformáciám, citlivosť voči účinkom vody, odolnosť voči zmrazovacím cyklom a odolnosť voči šíreniu trhlín. Okrem toho sa vlákna môžu použiť spolu s ďalšími prísadami. Niektoré výskumné práce prezentovali kombinované použitie vlákien so styrén-butadiénstyrén elastomérom (SBS), s gumou/kaučukom, nanomateriálmi a prostriedkami proti trvalým deformáciám (čierne častice s priemerom 3 mm). [17] 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 rúška. [17] [18]



Obrázok 8: Mechanizmus funkcie vlákien v asfaltovej zmesi pri namáhaní v priečnom ťahu [19]



## 2.1 Typy používaných vlákien

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

Prírodné 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. [20]

## 2.2 Prírodné vlákna v asfaltových zmesiach

### 2.2.1 Minerálne vlákna

Minerálne vlákna sa delia na dve podskupiny podľa pôvodu. Buď môžu byť prírodného pôvodu, ako napríklad azbest, alebo môžu byť umelo vyrobené. Obidve podskupiny môžu byť použité v asfaltových zmesiach. [6] Vzhľadom na zdravotné riziká spojené s azbestovými vláknami je v súčasnosti snaha o ich stiahnutie a izolovanie z prostredia okolo nás. Aj keď boli v minulosti spracované vedecké práce o ich možnosti použitia v asfaltových zmesiach [21], nebolo by rozumné tieto vlákna začať opäť rozširovať do životného prostredia.

### 2.2.2 Živočíšne vlákna

Ako už názov napovedá, pôvodcami týchto vlákien sú živočíchy. Môže sa jednať o srst' alebo perie.

Kuracie perie, oddelené od ostňa a kostrnky bolo použité v horúcej asfaltovej zmesi pri teplote 160 °C. Termogravimetrická analýza ukázala, že k dekompozícii dochádza až pri teplotách nad 220 °C. Priemerná pevnosť v ťahu takýchto vlákien bola  $200 \pm 70$  MPa, pri Youngovom module 2,5 GPa. Pridanie peria zlepšilo odolnosť voči trvalým deformáciám a citlivosť voči účinkom vody. Oproti štandardnej zmesi však muselo dôjsť na vyššie dávkovanie spojiva do zmesi. Kvôli potenciálnej biodegradácii musia byť pri aplikácii kuracieho peria brané na zreteľ podmienky s extrémne vysokou vlhkosťou. [19]



Vyšetrenie vplyvu vlákien kožež vlny na nízkoteplotné vlastnosti asfaltovej zmesi viedlo k zisteniu, že tieto vlákna zvyšujú lomovú pevnosť pri  $-15^{\circ}\text{C}$ . Kozia vlna má objemovú hmotnosť  $1,28\text{ g/cm}^3$  modul pružnosti  $19\text{ GPa}$  a pevnosť v ťahu  $1580\text{ MPa}$ . Najlepšie výsledky boli dosiahnuté pri dĺžke vlákien  $4\text{ mm}$  a obsahu v zmesi  $0,3\%$  hm. Zlepšenie nastalo nielen vďaka vysokej pevnosti vlákien, ale aj kvôli ich nerovnomernému povrchu a následnému lepšiemu spolupôsobeniu s matricou. [19]

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 teplotnú 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. [19]

### 2.2.3 Rastlinné vlákna

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. Pre nás exotickým druhom vlákna sú morské riasy, ktorých aplikácia ukázala na zlepšenie niektorých mechanických vlastností asfaltovej zmesi. Taktiež však boli zistené problémy so stekaním spojiva. [19]

**Kokosové vlákno** je vlákno na báze lignocelulózy, extrahované zo šupiek kokosového orecha, druhu ovocia pestovaného v tropických oblastiach, najmä v juhovýchodnej Ázii. Obsahuje celulózu ( $32$  až  $50\%$ ), hemicelulóza ( $0,15$  –  $15\%$ ), lignín ( $30$  –  $46\%$ ) a pektín ( $3$  –  $4\%$ ). To znamená že celulóza a lignín sú hlavnými zložkami tohto prírodného vlákna. Vďaka vysokému obsahu lignínu je tento materiál trvácny, odolný voči poveternostným vplyvom a vodeodolný. Okrem toho vykazuje kokosové vlákno jasné výhody: nízku cenu, nízku objemovú hmotnosť, veľké pretvorenie pri porušení a biologickú odbúrateľnosť. [17] Priemer



vlákna je v rozmedzí od 18  $\mu\text{m}$  do 600  $\mu\text{m}$  a jeho dĺžka je 10 mm až 40 mm. Pevnosť v ťahu sa pohybuje v rozmedzí od 71 do 176 MPa a zvyčajné dávkovanie v asfaltovej zmesi je 0,15 % až 0,7 % hm. Vo všeobecnosti možno povedať, že pridanie kokosových vlákien môže zlepšiť modul, odolnosť proti trvalým deformáciám a odolnosť voči účinkom vody. Avšak, doteraz nie je jasné, či pridanie kokosových vlákien zlepšuje alebo nezlepšuje odolnosť proti únave. [19]

**Lignínové vlákna** sú rastlinné vlákna s veľkým počtom intersticiálnych priestorov, veľkou špecifickou plochou a silnou schopnosťou absorbovať asfalt. Typický priemer je 19 – 43  $\mu\text{m}$  a dĺžka 1 mm až 5 mm. Špecifická hmotnosť sa pohybuje od 0,8 do 1,28. Bod topenia je pri teplote viac, než 200 °C. Hlásené zmeny vlastností asfaltových zmesí po zamiešaní týchto vlákien zahŕňajú vysokú absorpciu asfaltového spojiva, najlepšiu odolnosť proti trvalým deformáciám (v porovnaní s čadičovými a polyesterovými vláknami), zvýšenú tuhosť spojiva, zvýšenie dynamického a komplexného modulu, zvýšenie bodu mäknutia spojiva a zvýšenie šmykovej pevnosti. Lignínové vlákna rovnako prispeli k zlepšeniu nízkoteplotných vlastností, pevnosti v ťahu za ohybu a citlivosti voči účinkom vody. [19]

**Celulózové vlákna** sú široko používané a komerčne dostupné. Z toho dôvodu sú často ako kontrolné vzorky pre štúdium nových vlákien. Celulóza je komplexný sacharid, ktorý tvorí hlavnú zložku bunkovej steny väčšiny rastlín. Je dôležitý pri výrobe mnohých produktov, ako je papier, textil, liečivá a výbušniny. Ako už bolo spomenuté, tieto vlákna sa používajú zvyčajne v zmesiach s vyšším obsahom asfaltu (SMA, PA). Celulózové vlákna v týchto zmesiach slúžia na zlepšenie väzby a vzájomného spojenia v štruktúre kameniva a na zmiernenie stekania spojiva. Okrem toho bol hlásený nárast komplexného modulu a pokles fázového uhla pri vyšších teplotách, vedúceho k zlepšeniu odolnosti proti trvalým deformáciám. [19]

**Sisalové vlákna** sú prírodné vlákna získavané z listov. Táto rastlina pochádza z južného Mexika a teraz ju možno nájsť v mnohých tropických a subtropických krajinách. Hlavné zložky vlákna sú celulóza (47 – 78 %), lignín (7 – 11 %) a hemicelulóza (10 -24 %). Vzhľadom na svoje výhody (nízku cenu, nízku hustotu, dobrú pevnosť v ťahu a vysoký modul) majú sisalové vlákna rôzne využitie, vrátane použitia na papier, látky, koberce, laná a geotextílie. Okrem toho je dôležitým výstužným materiálom v kompozitnom a stavebnom priemysle. Zistené účinky vlákien v asfaltových zmesiach bolo zlepšenie únavových vlastností a citlivosti voči



účinkom vody, pri obsahu vlákien 0,05 % hm. a dĺžke vlákien 15 mm. Hodnota Marshallovej stability klesala pri náraste obsahu vlákien. V zmesi typu SMA bol zistený optimálny obsah vlákien 0,3 % hm., ktorý viedol k nárastu Marshallovej stability a pevnosti v ťahu, za súčasného poklesu medzerovitosti a stekavosti. Tieto hodnoty však boli horšie, než pri kokosových vláknach. Na druhú stranu, oba druhy rastlinných vlákien ukázali lepší potenciál zlepšenia mechanických vlastností, než zmesi s polyesterovými a celulóзовými vláknami. [17]

**Bambus** je obrovská drevina, ktorá patrí do čeľade lipnicovité (Poaceae). Táto rastlina má prekvapujúcu rýchlosť rastu a môže rásť nepretržite aj po odrezaní. Väčšina bambusov sa nachádza v tropických, subtropických a miernych oblastiach, ako je juhovýchodná Ázia a Južná Amerika. Hlavnými zložkami bambusu sú celulóza (26 – 73,8 %), hemicelulóza (12,5 - 31 %) a lignín (10,2 – 36,9 %), ktoré zaberajú viac ako 90 % celkovej hmotnosti. Z výsledkov mechanických testov vykázali zmesi bambusových vlákien uspokojivé hodnoty Marshallovej stability po vlhkosti a cyklickému zaťaženiu mrazom, podobné alebo dokonca lepšie vlastnosti v porovnaní so zmesami s polyesterovými alebo lignínovými vláknami. Zlepšila sa aj odolnosť proti trvalým deformáciám a odolnosť proti trhlinám pri nízkych teplotách. [17] Ďalší výskumníci skúmali vplyv laboratórneho starnutia na tuhosť a únavové trhliny asfaltového betónu vyrobeného z bambusových vlákien. V porovnaní so zmesami polyesterových vlákien sa dosiahli podobné výsledky. Zistilo sa tiež, že medzifázová adhézia medzi bambusovými vláknami a asfaltovou matricou bola slabá v dôsledku vysokej hydrofilnosti tohto vlákna a hydrofóbnosti asfaltu. [22] Pre zlepšenie medzifázovej adhézie modifikoval Yu a kol. [23] bambusové vlákna kopolymérom melamín-formaldehyd. Okrem zvýšenej stability a pevnosti v ťahu zmesí bola prostredníctvom snímkov skenovacieho elektrónového mikroskopu pozorovaná dobrá adhézia medzi modifikovanými bambusovými vláknami a asfaltovou matricou.

Ostatným druhom rastlinných vlákien, ktoré boli použité v praktickej časti tejto práce, sa venuje ďalšia kapitola.

### 2.3 Syntetické vlákna v asfaltových zmesiach

V porovnaní s prírodnými vláknami sa syntetické vlákna vyrábajú z chemických zlúčenín vrátane organických a anorganických vlákien. Primárny rozdiel medzi organickým vláknom a



anorganickým vláknom je ten, že organické vlákno má atóm uhlíka, zatiaľ čo anorganické vlákno atóm uhlíka neobsahuje. [19]

### 2.2.2 Minerálne vlákna

Umelé minerálne vlákna (tiež nazývané minerálna vlna alebo kamenná vlna) sú vyrábané tavením minerálov pri vysokých teplotách (1450 – 1500 °C) a fyzickým formovaním vlákien rotáciou (podobný proces ako pri výrobe cukrovej vaty), alebo pretláčaním. [6] Najčastejšie boli v asfaltových zmesiach aplikované **bazaltové** (čadičové) **vlákna**. Výsledky testov ukázali, že tieto vlákna majú potenciál zlepšiť mechanické vlastnosti, citlivosť voči účinkom vody, nízkoteplotné vlastnosti a správanie pri vyšších teplotách. [24] Po vyhodnotení správania sa zmesi spolu s ekonomickými požiadavkami v rovnakej štúdii zistili, že optimálny obsah čadičových vlákien v zmesi je okolo 0,3 % hm. Pri tomto optimálnom množstve došlo k zvýšeniu Marshallovej stability, dynamickej stability, maximálna ohybová deformácia a pomer pevnosti v ťahu boli vyššie, než pri asfaltovom betóne bez vlákien. Taktiež výskumníci poukázali na lepší potenciál čadičových vlákien na zlepšenie nízkoteplotných vlastností, než je tomu pri lignínových a polyesterových vláknach. V ďalšej práci [25], zameranej na asfaltový mastix, došlo k vytvoreniu stabilnej trojrozmernej siete v mastixe v dôsledku pridania čadičových vlákien. Tým sa zlepšila schopnosť rozptýlenia napätia a zmiernilo sa šírenie trhlín.

### 2.2.3 Keramické vlákna

Keramické vlákno je hlinítokremičitanové vlákno vytvorené tavením a vyfukovaním roztaveného kaolínu s vysokým obsahom oxidu hlinitého alebo bežnejších materiálov, vrátane zmesi čistého prášku oxidu hlinitého a oxidu kremičitého. Priemer sa pohybuje od 2 do 3,5  $\mu\text{m}$  a dĺžka je menšia ako 50 mm. Teplota topenia je približne 1260 – 1650 °C. Jeho dávkovanie sa medzi výskumníkmi výrazne líšilo: v dvoch rôznych prácach šlo o rozmedzia medzi 0,1 % až 0,6 % hm. asfaltu, zatiaľ čo iní šli až na 1 – 3 % hmotnosti asfaltu. Keramické vlákna sa používajú na ropných poliach vďaka svojim vlastnostiam, ako je nízka hmotnosť, pružnosť, vysoká pevnosť v ťahu, chemická odolnosť voči kyslým a zásaditým látkam, sú bez obsahu azbestu a majú nízku cenu v porovnaní s inými vláknami. Pridanie týchto vlákien do asfaltových zmesí môže zvýšiť tuhosť asfaltových spojív, viskozitu a odolnosť voči trvalým deformáciám, ale môže ohroziť odolnosť asfaltovej zmesi proti únave a trhlinám pri nízkych teplotách, čo si vyžaduje ďalšie skúmanie. [19]



#### 2.2.4 Sklenené vlákna

Sklenené vlákno sa tradične používa v textilnom a stavebnom priemysle. Má vysoký modul pružnosti a pevnosť v ťahu a je citlivé na nízke teploty. Youngov modul pružnosti dosahuje takmer 70 GPa, čo je asi 20-krát viac ako modul tuhosti typického asfaltového betónu (pri teplote okolo 27 °C). Sklenené vlákno je flexibilné a pevné a je fyzikálne a chemicky stabilné v horúcich zmesiach pri 200 °C. Pridávanie sklenených vlákien do asfaltových zmesí vedie k zlepšeniu pevnosti a únavových vlastností, za súčasného zvýšenia duktility vďaka ich výborným mechanickým vlastnostiam. [19] Nevýhodou je však ich krehkosť a s ňou spojené problémy pri výrobe asfaltových zmesí.

#### 2.2.5 Oceľové vlákna

Oceľové vlákno dedí vynikajúce mechanické vlastnosti ocele. Špecifická hmotnosť sa pohybuje od 7,2 do 7,8, čo je najviac spomedzi všetkých typov vlákien. Modul pružnosti je 140 – 820 GPa a pevnosť v ťahu je 1035 MPa až 1868 MPa. Pre jeho použitie v asfaltových zmesiach je priemer oceľových vlákien medzi 15 μm a 750 μm a jeho dĺžka sa pohybuje v rozmedzí 1 – 60 mm. Hlavným účelom zavádzania oceľových vlákien do asfaltových zmesí je možnosť zahrievania a samoliečenia vrstvy elektromagnetickou indukciou. S nárastom dĺžky a obsahu vlákien oceľovej vlny sa zvyšuje priemerná rýchlosť odmrazovania asfaltovej zmesi. To naznačuje, že pri indukčnom ohreve sú obsah a dĺžka vlákna oceľovej vlny hlavnými faktormi ovplyvňujúcimi odmrazovanie. [19]

V súvislosti s používaním oceľových vlákien do asfaltových zmesí sa objavili určité problémy s ohľadom na zhoršenú spracovateľnosť, nerovnomernú disperziu, nadmerné objemové vlastnosti a potenciálne poškodenie pneumatík vozidiel. V súvislosti s posledným problémom navrhli výskumníci pridať oceľové vlákna iba do ložnej vrstvy vozovky, aby sa predišlo potenciálnemu poškodeniu pneumatík vozidiel. [19] Zhoršená spracovateľnosť vyplýva z materiálnej povahy oceli. Malá poddajnosť bráni efektívnemu rozmiešaniu dlhších vlákien a vysoká objemová hmotnosť spôsobuje koncentráciu vlákien na spodku položenej vrstvy. Posledným a logickým problémom oceľových vlákien je vystavenie vode alebo atmosférickej vlhkosti a ich následná korózia.

#### 2.2.6 Uhlíkové vlákna

Uhlíkové alebo grafitové vlákno má priemer 5 – 10 μm, vysokú pevnosť v ťahu 1,68 – 2,6 GPa a vysoký modul pružnosti v ťahu 640 – 752 GPa. Typické dávkovanie uhlíkových vlákien je 1





% objemu asfaltovej zmesi a 2 % až 4 % hm. asfaltovej zmesi. Pridanie uhlíkových vlákien má za cieľ najmä zlepšiť tepelnú a elektrickú vodivosť pre samoopraviteľnú asfaltovú zmes a tiež zlepšuje pevnosť v ťahu, modul tuhosti, únavové charakteristiky a odolnosť proti trvalým deformáciám. Vďaka lepšej distribúcii kratších uhlíkových vlákien nebol zistený žiadny významný vplyv na objemové vlastnosti asfaltových zmesí. [17] [19] Krátke uhlíkové nanovlákná sa zvyčajne miešajú so zmesou mokrou metódou (pridanie do spojiva pred zamiešaním s kamenivom), zatiaľ čo dlhšie vlákna (mikro a makro mierka) sú normálne pridávané do miešačky s rozohriatym kamenivom (suchá metóda). Dĺžka vlákien je kritickým faktorom ich použitia v asfaltových zmesiach. Dlhšie vlákna majú tendenciu nabaľovať sa na seba a znižovať tým svoju disperziu [17]

### 2.2.7 Polymérne vlákna

Syntetické polyméry sú bežne používané k modifikácii asfaltových spojív. Jedná sa o uhlíkovodíkové reťazce, pôvodom z ropy, ktorých názov je odvodený z opakujúcej sa jednotky hlavného reťazca.

**Aramidové vlákna** sú triedou extrémne pružných a tepelne odolných syntetických vlákien, patriacich do skupiny aromatických polyamidov. Vláknotvorná látka je polyamid s dlhým reťazcom, v ktorom je najmenej 85 % amidových väzieb pripojených priamo k dvom aromatickým kruhom. Vlákno sa vyrába zvlákňovaním pevného vlákna z tekutej chemickej zmesi. Aramidové vlákna sú dosť drahé a ťažko sa vyrábajú, ale na rozdiel od polyolefínových vlákien s vysokou molekulovou hmotnosťou majú aramidy polárnu aromatickú polymérnu kostru, čo má za následok oveľa vyššiu teplotu skleneného prechodu a žiadnu teplotu topenia. Vďaka aromatickej štruktúre majú aramidové vlákna vynikajúcu tepelnú odolnosť, veľmi nízku horľavosť a dobrú chemickú odolnosť voči väčšine organických rozpúšťadiel. Sú však citlivé na soľ (chlór) a na niektoré kyseliny a zásady, ako aj na degradáciu ultrafialovým žiarením. Typická dĺžka vlákna používaná v asfaltovej zmesi je 19 mm. Špecifická hmotnosť aramidového vlákna je asi 1,45 a pevnosť v ťahu je vyššia ako 2750 MPa. Vo všeobecnosti sa zistilo, že pridanie aramidového vlákna zlepšuje Marshallovu stabilitu, odolnosť proti trvalým deformáciám a únavové vlastnosti. Nedochádza však k významnému zlepšeniu citlivosti voči účinkom vody alebo nevykazuje podobné výsledky v porovnaní s kontrolnými zmesami. Aramidové vlákna sa zvyčajne do asfaltových zmesí pridávajú spolu s inými materiálmi, ako napr. polyolefíny a polypropylén. [19]



**Polyolefín** vzniká polymerizáciou olefinových monomérnych jednotiek. Medzi najbežnejšie polyolefíny patrí **polypropylén (PP)** a **polyetylén (PE)**. Tieto polyméry prevládajú v širokom spektre aplikácií v závislosti od materiálových charakteristík polyméru. Všeobecne sa uznáva, že pridanie týchto vlákňitých materiálov, či už pôvodných alebo recyklovaných, môže zlepšiť tuhosť, odolnosť proti trvalým deformáciám a únavu asfaltových zmesí, ako aj citlivosť voči účinkom vlhkosti.



**Obrázok 9: Zmes aramidových a polyolefínových vlákien od firmy FORTA®**

**Polyetyléntereftalát (PET)** je termoplastická polymérna živica z rodiny polyesterov a je široko používaný vo fľašiach a nádobách. Drvením odpadových PET fliaš vznikajú PET pásy šírky 1,18 – 2,36 mm, ktoré je možné pridávať do asfaltových zmesí. [19] Teplota topenia PET vlákna je približne 200 – 260 °C [26], modul pružnosti 1,57 – 5,69 GPa [26] [27] a pevnosť v ťahu 140,5 MPa. [27] Typické dávky PET vlákien v asfaltových zmesiach sa pohybujú od 0,2 % do 2 % hm. asfaltových spojív. Obvyklé pridávanie PET vlákien do asfaltových zmesí prebieha suchou metódou. Všeobecne sa zistilo, že pridanie PET vlákien môže zlepšiť stekavosť, Marshallovu stabilitu, pevnosť v priečnom ťahu a únavové správanie znížením tuhosti asfaltových zmesí. Pri vyšších dávkach vlákien dochádza k ich agregácii v asfaltovej zmesi a preto je maximálna dávka PET vlákien stanovená na úrovni 2 %. [19]

**Polyesterové vlákno (PES)** má priemer od 13  $\mu\text{m}$  do 34  $\mu\text{m}$  a dĺžka od 6 mm do 12 mm, s teplotou topenia 169 – 261 °C. Modul pružnosti je od 14 - 17 GPa [28], ťažnosť je 10-35% a



pevnost v ťahu 300-450 MPa. Typické dávkovanie je 0,1 – 0,5 % hmotnosti asfaltovej zmesi. Použitím vlákien do asfaltovej zmesi bolo zistené, že medzerovitost' v asfaltových zmesiach najprv klesá a potom sa zvyšuje so zvyšujúcim sa obsahom polyesterových vlákien. Taktiež sa zistilo, že pridanie polyesterového vlákna môže zlepšiť Marshallovu stabilitu, odolnosť proti trvalým deformáciám, únavu, odolnosť proti šíreniu trhlin pri nízkych teplotách a citlivosť voči účinkom vody. [19]

**Odpadné polymérne vlákna** boli taktiež testované v asfaltových zmesiach. Predchádzajúce typy polymérov tiež môžu pochádzať z recyklovaných materiálov. V tejto podkategórii sú, bez vlákien napr. z kobercov, kordov pneumatík a zdravotníckych rúšok, zahrnuté len cigaretové filtre, ktorých hlavnou zložkou je acetylcelulóza.

Použitie alebo aj nové vyradené cigaretové filtre (CF) sa dostali do pozornosti výskumníkov v nedávnej dobe. Rahman a Mohajerani [29] testovali celé, zapuzdrené použité CF v zmesi typu SMA. Cieľom výskumu bolo nahradiť hrubé kamenivo v zmesi. Hlásili zlepšenú Marshallovu stabilitu a zvýšenú odolnosť proti trvalým deformáciám. Jin a kol. [30] použili odpadové CF v asfaltovom betóne. Najprv predrezali filtre na 6 mm dlhé kusy a až tak došlo k zamiešaniu zmesi. Výsledky ukázali lepšiu Marshallovu stabilitu. Nakoniec, Tataranni a Sangiorgi [31] testovali nové vyradené CF a pozorovali nižšie hodnoty pevnosti v priečnom ťahu. Avšak tuhosť experimentálnej zmesi SMA, ako aj jeho tepelná citlivosť, neboli negatívne ovplyvnené pridaním CF. Na základe výsledkov testu stekavosti možno tvrdiť, že rozdrvené CF vykazujú vlastnosti podobné referenčným celulóзовým vláknám.

## 2.3 Efektivita použitia vlákien v reálnom svete

Použitie vyššie spomenutých vlákien ukázalo zlepšenie vo väčšine sledovaných charakteristík. Na druhú stranu, zlepšenie (aj keď veľkej) časti funkčných a empirických vlastností asfaltovej zmesi má zvyčajne za následok zhoršenie v tých zvyšných. Časť štúdií sa navyše odvoláva na zlepšenie napr. odolnosti proti trvalým deformáciám na základe výsledkov komplexného modulu z testovania spojiva na dynamickom šmykovom rheometri alebo zvýšením dynamickej viskozity. Tento postup je ale mierne zavádzajúci, keďže vlákna z princípu veci zvyšujú viskozitu spojiva, častokrát jeho komplexný modul a ďalšie príbuzné parametre. Okrem toho medzi základné úskalia použitia prírodných a syntetických vlákien patrí zhoršená citlivosť voči účinkom vody. Tá úzko súvisí s priečnym rezom vlákna a jeho chemickými



a fyzikálnymi povrchovými vlastnosťami, ktoré určujú kompatibilitu s matricou (spojivom). Náchylnejšie na účinky vody sú logicky vlákna prírodného pôvodu, avšak tieto problémy sa nevyhýbajú ani niektorým druhom syntetických vlákien. Tradičné problémy pri miešaní a homogenizácii asfaltovej zmesi potom spôsobujú vlákna s nevhodne zvolenou dĺžkou. Vo všeobecnosti však vlákna ukazujú svoj potenciál na zlepšenie vlastností asfaltových zmesí a predĺženie ich životnosti v pozitívnom svetle.

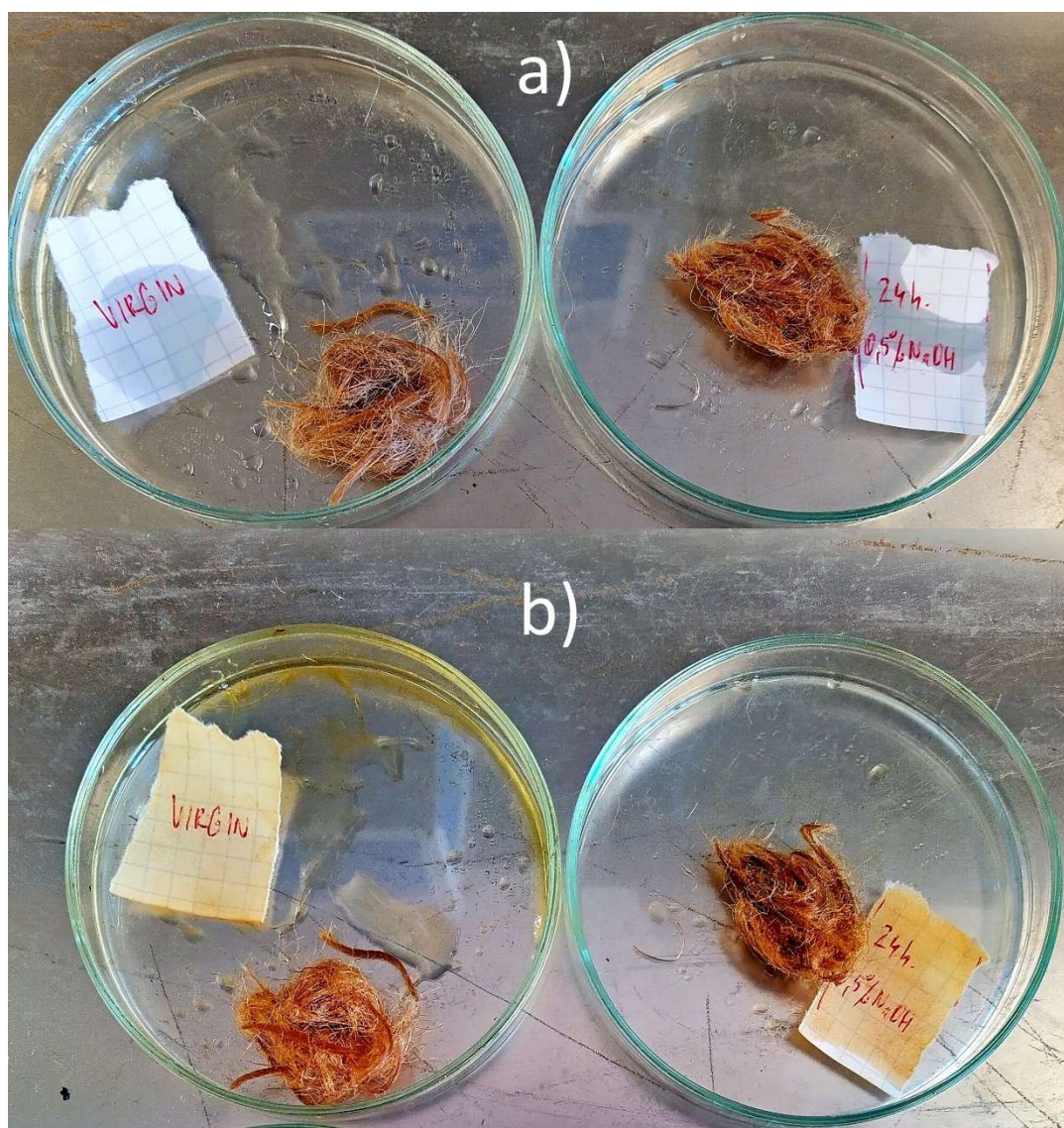
Ďalšou kapitolou uplatnenia ľubovoľnej prísady na trhu je jej ekonomická výhodnosť. Každá pridaná zložka navyše predstavuje dodatočný ekonomický náklad. Ten musí byť kompenzovaný predĺženou životnosťou položenej vrstvy vozovky. Ak je produkt naozaj efektívny, jeho cena sa musí vrátiť na znížených nákladoch za údržbu a na predĺžení nutnosti generálnej opravy vrstvy, či celej vozovky.

Cena asfaltovej zmesi sa líši v závislosti od typu a dávkovania vlákien. Na zdôvodnenie používania asfaltových zmesí vystužených vláknami je nevyhnutné poznať efektívnosť nákladov. Očakáva sa, že vlákna môžu priniesť výhody zlepšenia prevádzkových vlastností. Je však potrebná kvantifikácia takéhoto zlepšenia. [19] Napríklad Bastola a kol. [32] definovali efektívnosť nákladov ako pomer počtu cyklov únavy alebo trvalých deformácií získaných z modelácie softvérom 3D-Move Analysis a porovnávali ekonomickú efektívnosť zmesi vystuženej vláknami s kontrolnými zmesami bez vlákien. Zistili, že pomer nákladov v prípade zmesi vystuženej vláknami bol v priemere 4,1-krát (trvalé deformácie) a 4,4-krát (únavy) vyšší v porovnaní s kontrolnými zmesami. Vo výskume použili parametre pre zmes výstužných vlákien od firmy FORTA®. Výsledky ukazujú, že použitie vlákien je cenovo výhodný spôsob predĺženia životnosti vozovky. Napriek tomu je treba brať uvedené hodnoty z rezervou, najmä kvôli neuskutočneniu reálnych experimentov.

Zatiaľ čo väčšina štúdií o asfaltových zmesiach vystužených vláknami sa zameriava na laboratórne pripravené vzorky s krátkodobým starnutím, len málo štúdií 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. Taktiež existuje medzera v chápaní vzájomného vzťahu objemových vlastností, štruktúry zmesi a vlastností asfaltovej zmesi vystuženej vláknami. Odporúča sa vyhodnotiť trvanlivosť vystužených asfaltových zmesí,



ktoré sú vystavené kombinovanému účinku zaťaženia a klimatických vplyvov. 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. [19]



Obrázok 10: Jutové vlákna s repkovým olejom a) pred teplotnou záťažou  
b) po teplotnej záťaži 150 °C a 2 hodinách



## 3. VYBRANÉ RASTLINNÉ VLÁKNA

Použitie prírodných vlákien v asfaltových zmesiach je dobrá udržateľná alternatíva, kvôli nízkej spotrebe energie, ceny, obnoviteľnosti a biodegradabilite. [17] Informácie uvedené v predchádzajúcich častiach od začiatku smerovali túto dizertačnú prácu smerom k vlákniatej prísade, 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 prísady obnoviteľnosť materiálu. Biodegradabilitu označujú mnohí výskumníci za nevýhodu rastlinných vlákien. Jedná sa o oprávnené obavy, keďže stavebníci ani používatelia cestnej siete nechcú predčasný rozpad vozoviek. Vzhľadom k realite nutnosti periodického obnovovania asfaltových vrstiev sa však na túto vlastnosť materiálov dá pozeráť pozitívnu optikou. Podmienkou však je, aby k majoritnej degradácii materiálu dochádzalo až po skončení životnosti vrstvy.

### 3.1 Prečo nepoužiť syntetické vlákna?

Niektoré syntetické polyméry (plasty) sa dajú recyklovať a väčšina z nich je dobre kompatibilná s asfaltovým spojivom. Napokon, vstupná surovina na výrobu oboch materiálov je ropa. Vybrané druhy vlákien taktiež ponúkajú zaujímavé materiálové charakteristiky, vhodné pre rolu výstužných prvkov. Na prvý pohľad sa teda jedná o dobrú voľbu. Keď sa však na syntetické polyméry pozrieme bližšie, zistíme, že vplyvom času a oxidačných procesov starnú podobne, ako samotné asfaltové spojivo. Dobrá kompatibilita so spojivom navyše prakticky znemožňuje ich recykláciu, ktorá je pri plastoch typicky efektívna len v prípade zbavenia od nečistôt. Extenzívne používanie nepolárnych rozpúšťadiel je jedna z posledných vecí, ktoré by sme radi videli v našom okolí. Recyklácia plastov je problematická aj vzhľadom k nutnosti separácie jednotlivých druhov. Nádej ponúka vývoj nových enzýmov a baktérií rozkladajúcich polymérne reťazce. V prípade asfaltových zmesí sa však bude jednať skôr o nové efektívne druhy oživovacích prísad. Posledný problém syntetických polymérov tkvie v ich pôvode. Ropa je neobnoviteľný prírodný zdroj, ktorého vytvorenie prirodzenými procesmi trvá milióny rokov. Pri súčasných zásobách a trendoch jej využívania niektoré zdroje [33] [34] uvádzajú, že zásoby sa vyčerpajú už za cca 50 rokov. Iné [35] sú optimistickejšie a vo svojich odhadoch počítajú aj s nálezom nových ložísk, s vývojom technológií pre ťažbu a jej umožnením aj v miestach, kde to doteraz nebolo uskutočniteľné.

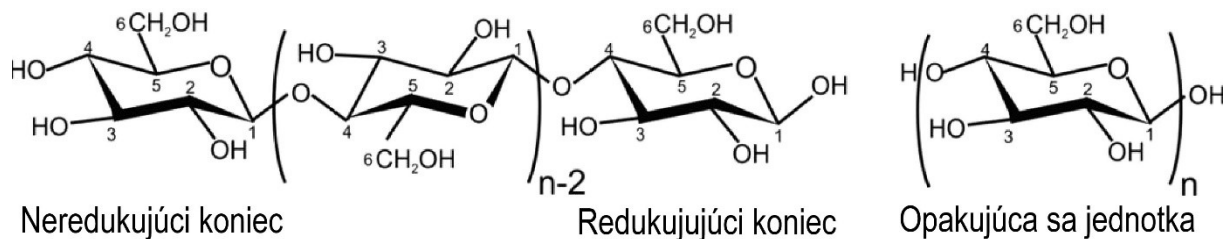


V každom prípade je zrejmé, že pokiaľ jej spotrebu nerozložíme do miliónov rokov, zanedlho príde moment jej vyčerpania, resp. efektívnej možnosti jej ťažby. Okrem toho sa spolu s uhlím a zemným plynom jedná o významný zdroj uhlíka, ktorý je spaľovaním uvoľňovaný do ovzdušia vo forme oxidu uhličitého (CO<sub>2</sub>). Tento presun a premena hmoty spôsobujú významné globálne zmeny, ktoré zasahujú väčšinu sfér na Zemi. Technologický, ekonomický a sociálny pokrok ľudstva si vyžaduje zvýšenú spotrebu zdrojov, ktoré nám Zem poskytuje. Nie je však rozumné nechať sa unášať opojným pocitom úspechu a zabúdať na dôsledky svojich činov. Problémy s extrémnym nárastom využívania ropy a jej derivátov za posledných 70 rokov sú dnes jasne viditeľné. Okrem nich sa prakticky neustále prichádza na nové, ktoré boli pred našim zrakom skryté. Tejto práci neprináleží zaoberať sa hlbšie klimatickými zmenami. Spomeniem však aspoň jeden aktuálne objavený fenomén, ktorý môže negatívne ovplyvniť životy ľudí aj ďaleko od rastúcich hladín oceánov a morí, či rozširujúcich sa púští. V súvislosti s otepľovaním troposféry dochádza k ochladzovaniu vyšších vrstiev atmosféry [36], čo vedie k vzniku novej ozónovej diery nad Arktídou [37]. Na rozdiel od tej Antarktiskej, ktorá sa vyskytovala v zásade nad neobývanými oblasťami, má nová ozónová diera potenciál rozšíriť sa nad veľkú časť Západnej, Severnej a Strednej Európy. Pokiaľ nechceme, aby došlo k výraznej transformácii veľkej časti životného prostredia, či k nárastu negatívnych vplyvov na ľudské zdravie, je nutné otočiť kormidlo vývoja smerom čo najbližšie k pôvodnej, predindustriálnej rovnováhe. To je možné redukciou používania ropy a jej derivátov, napr. zvýšeným využívaním tisícročiami overených, prírodných materiálov z obnoviteľných zdrojov.

### 3.2 Stavba rastlinných vlákien

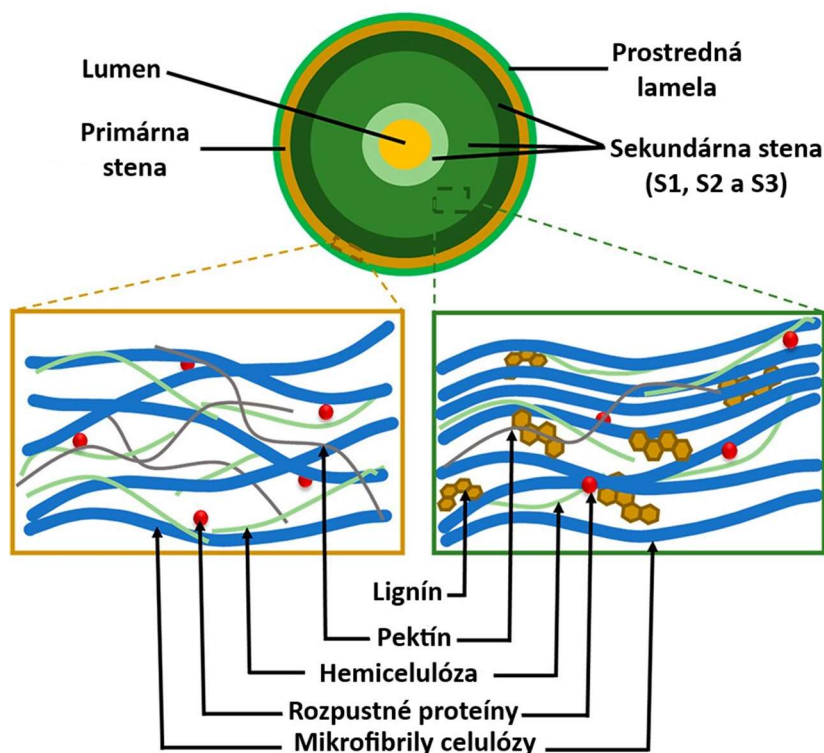
Rastlinné prírodné vlákna majú lignocelulózový charakter, pretože sa skladajú z celulózy, hemicelulózy, lignínu, pektínu a voskov. [38]

Polysacharidy pokrývajú širokú škálu polymérnych materiálov na báze cukru, ktoré sú štruktúrnym základom pre rastliny, mycélium a niektoré živočíchy. Celulóza je jedným z takýchto polysacharidov, ktorý pokrýva túto širokú škálu života na Zemi a je najrozšírenejším biomateriálom na Zemi. Jedná sa o nerozvetvený homopolysacharid, ktorý obsahuje dlhé reťazce  $\beta$ -D-glukopyranózy spojené  $\beta(1\rightarrow4)$  glykozidickými väzbami. [39] Bunkové steny rastlinných buniek pripisujú svoju mechanickú pevnosť celulóze. Celulóza vďaka za svoje štruktúrne vlastnosti skutočnosti, že si môže zachovať semikryštalický stav agregácie aj vo vodnom prostredí, čo je pre polysacharid nezvyčajné. [40]



**Obrázok 11: Štruktúrny vzorec celulózy [39]**

Je známe, že celulóza dobre interaguje s vodou. Vzhľadom na veľký počet hydroxylových skupín pozdĺž jej molekulárnych reťazcov je to logické správanie. Celulózové materiály vo vode napučávajú a rozptyľujú sa. Predpokladá sa, že k napučávaniu celulózy vo vode dochádza v dôsledku prítomnosti molekúl vody „nabaľujúcich sa“ do neusporiadaných oblastí semikryštalickej štruktúry. [39]



**Obrázok 12: Schematický prierez vlákna a stavba bunkovej steny rastlín. [39]**

Celulóza využíva lignín a pektín ako lepidlo na spojenie s hemicelulózou. Obsah celulózy v bunkovej stene sa zvyšuje od primárnej vrstvy (S1) po sekundárnu vrstvu (S2), zatiaľ čo obsah lignínu klesá. Obsah hemicelulózy sa nachádza v rovnakých množstvách v každej vrstve. Vrstva S2 je primárne zodpovedná za fyzickú a mechanickú pevnosť vlákien. Má nižší mikrovláknový uhol, vyšší obsah celulózy a prispieva k zlepšeniu pevnostných vlastností





vlákna. V tejto rozmanitosti zohráva úlohu metóda zberu, vek rastlín, poloha vzorky v rastline, podmienky rastu prostredia a metodika extrakcie vlákna. Vlákna s nízkym obsahom lignínu a vysokým obsahom celulózy majú vysokú pevnosť v ťahu. Túto hodnotu však môže ovplyvniť množstvo faktorov, preto tento vzťah nemusí byť nevyhnutne lineárny. Kryštalické domény celulózy majú podstatný vplyv na pevnosť v ťahu, pričom väčšia kryštalinita celulózy vedie k vyššej pevnosti vlákna. Pozícia lignínu na biomase ovplyvňuje pevnosť v ťahu, pretože je vklínený medzi celulózu a hemicelulózu. [20]

Lignín je hydrofóbny aromatický polymér, ktorý prevláda v sekundárnej bunkovej stene rastlín a drevných materiálov a prispieva k mechanickým a hydroizolačným vlastnostiam týchto materiálov. [39] Hemicelulóza je označenie pre polysacharidy v stenách rastlinných buniek, ktoré majú  $\beta(1\rightarrow4)$  viazané kostry s ekvatoriálnou konfiguráciou. Sú prítomné v bunkových stenách všetkých suchozemských rastlín. [41] Vysoko kryštalická celulóza je odolná voči hydrolýze, zatiaľ čo hemicelulózy vytvárajú náhodné amorfné štruktúry charakterizované nízkou pevnosťou. [42]

Bunkové steny rastlín sú komplexné kompozitné systémy. K interakciám medzi celulózu a inými zložkami bunkovej steny (hemicelulóza, lignín, pektín a voda) dochádza prostredníctvom vodíkových väzieb, van der Waalsových síl a elektrostatických a hydrofóbnych interakcií. Molekulárna dynamická simulácia interakcie lignínu s celulózu ukázala vyššiu väzbovú afinitu lignínu na hydrofóbnej rovine celulózy. Je preto pravdepodobné, že lignín interaguje s celulózu a inými zložkami bunkovej steny prostredníctvom elektrostatických aj hydrofóbnych interakcií. [39]

Príjem vody podporuje rast rastlín zväčšením objemu a uvoľnením stresu generovaného v bunkovej stene zo syntézy polymérov bunkovej steny. Voda je preto základnou zložkou komplexného kompozitu bunkovej steny, ktorý interaguje s ostatnými zložkami bunkovej steny rôznymi rýchlosťami. Pri simulovaných interakciách celulóza-hemicelulóza sa predpokladá, že voda spôsobuje zníženie množstva sily potrebnej na strihanie celulózy-hemicelulózy pôsobením ako lubrikant a plastifikátor v rámci rozhrania. Ďalšia simulácia molekulárnej dynamiky interakcie celulóza-hemicelulóza ukázala, že molekuly vody neboli adsorbované v kryštalických oblastiach, ale adsorbované na hemicelulóze a medzifáze medzi týmito dvoma polymérmi, čo viedlo k zvýšenému rozostupu a zníženiu modulu. [39]



### 3.3 Negatíva použitia rastlinných vlákien

Ako obnoviteľný a ekologický zdroj získava pridávanie prírodných vlákien do inžinierskych kompozitných materiálov medzi výskumníkmi popularitu. Keď sa však prírodné rastlinné vlákna aplikujú na skutočné stavebné materiály, mnohé nedostatky obmedzujú ich technický rozvoj. Jedná sa o vlastnosti ako je silná hydrofilnosť, biologická odbúrateľnosť, ľahká aglomerácia, slabá disperzia, zlá tepelná stabilita a mechanické zmeny. [43]

Prírodné rastlinné vlákna sú bohaté na polárne funkčné skupiny, ako sú hydroxylové a karboxylové skupiny, a preto vykazujú silné hydrofilné vlastnosti. To neprispieva k uľahčeniu väzby medzi vláknami a hydrofóbnou polymérou matricou, čo vedie k zlej adhézii vlákien. Postupom času sa vlákno môže odlepiť od podkladu a odlupovať sa. Okrem toho je biodegradácia prírodných vlákien tiež veľkou výzvou v praktických aplikáciách. Keď sú prírodné vlákna vystavené cementovému prostrediu, hemicelulóza a lignín sa ľahko odstránia alkalickou eróziou cementu, zatiaľ čo ióny vápnika z cementu sa ľahko ukladajú do dutín vlákien, čo vedie ku krehnutiu a mineralizácii vlákien. To má za následok výrazné zníženie ťahových vlastností. [43]

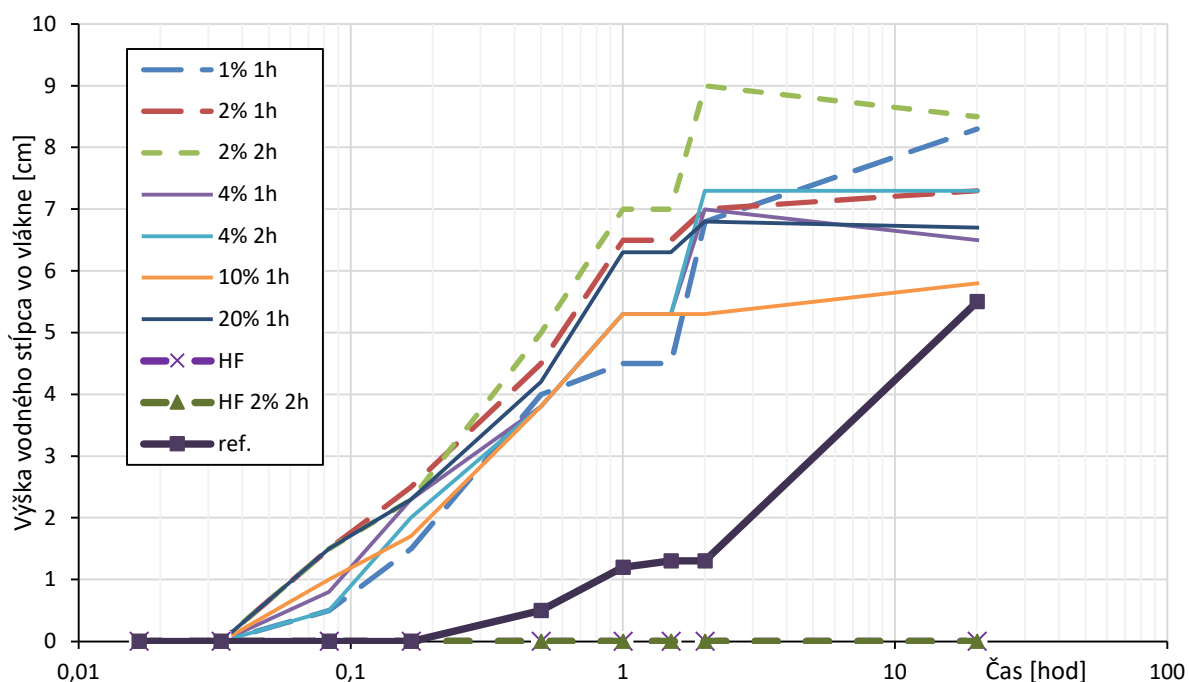
Problém alkalického erózie a vyplavovania hemicelulózy s lignínom sa týka použitia vlákien v cementovom betóne. Na prvý pohľad sa dá jednoducho vyriešiť macerovaním vlákien v zásaditom roztoku, tzv. mercerizáciou. V závislosti od koncentrácie roztoku a doby ponorenia vlákien v ňom dôjde k vyplaveniu spomínaných rozpustných polymérov. Výsledkom je drsnejší povrch vlákna a viac prázdneho priestoru v jeho útrobach. Pri miešaní asfaltovej zmesi sa nahriate spojivo správa ako kvapalina, ktorá s ľahkosťou tieto priestory vyplní. Okrem zvýšenia kryštalinity, či zvýšenia obsahu celulózy vo vlákne teda po mercerizácii teoreticky nastáva lepšie spolupôsobenie matrice a vlákna. Nanešťastie, takéto ošetrenie vlákien vedie k zvýšeniu hydrofilnosti vlákna. Nejedná sa len o zvýšený počet dostupných hydroxylových skupín, ale aj o spomínané prázdne priestory vo vnútri vlákna, ktoré fungujú ako sieť jemných kapilárnych trubíc. Výsledky tejto práce v nasledujúcej časti potvrdili, že voda preniká mercerovanými vláknami do asfaltovej zmesi ľahšie.

#### 3.3.1 Transport vody vo vybraných rastlinných priadkach

Vyšetrenie tohto fenoménu je dôležitým krokom k pochopeniu správania sa rastlinných vlákien v reálnom prostredí, ktorého voda je elementárnou súčasťou. Kinetika transportu



vody bola vyšetovaná v jutovej priadzi. Okrem referenčného vlákna bolo zvolených 9 ďalších typov, základom ktorých bolo ošetrovanie hydroxidom sodným pri rôznych koncentráciách a časoch macerácie. Navyše, dve vlákna boli ošetrované hydrofobizačnou prísadou. Základ jedného tvorilo referenčné vlákno, na druhé bola hydrofobizácia aplikovaná po dvojhodinovej macerácii v 2% roztoku NaOH. Hydrofobizačná prísada pre betónové povrchy pochádzala od firmy Nanosystem s.r.o., ktorá vyrábala prísady na báze isopropylalkoholu a bližšie neurčených nanočastíc hydrofobizujúcich povrch zvoleného materiálu. Všetky vzorky boli ponorené do roztoku vody s potravinárskym farbivom v jeden rovnaký okamih.



**Obrázok 13: Výsledky testu kinetiky transportu vody v jutovej priadzi.**

Meranie prebiehalo v deviatich intervaloch od jednej minúty po 20 hodín. Z výsledkov je zrejmé, že mercerizácia jutových priadzí výrazne uľahčila a urýchlila transport vody. Referenčné vlákno vykazovalo hydrofóbne vlastnosti cca 2 minúty po ponorení do vody, ktorá nezačala vzlínať ešte 10 minút po ponorení do vody. Na konci testu však došlo k vyrovnaniu výšky vodného stĺpca vo všetkých vzorkách, okrem hydrofobizovaných. Tie si udržali 100% vodoodpudivé vlastnosti po celú dobu testu čoho dôkazom bol invertný kužel vytvorený okolo vlákna (odpuďzovanie vody miesto zmáčania). Rozdiely macerovaných vzoriek v kinetike absorpcie vody sa veľmi nelíšia. Skôr ich možno pripísať heterogénosti materiálu a nerovnomernej štruktúre rastlinných priadzí. Najvyššiu finálnu výšku vodného

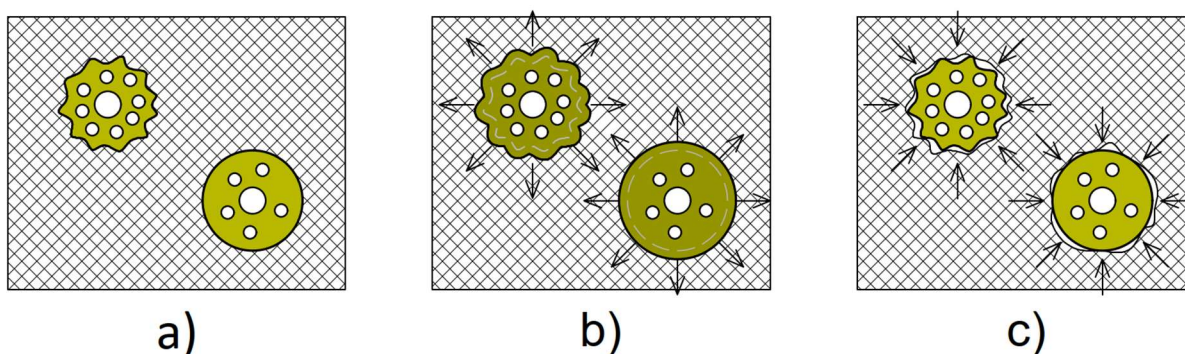


stĺpca dosiahli vzorky macerované v nižšej koncentrácii roztoku. Príčinou zrejme bolo vytvorenie užších kapilár nedokonalejším rozpustením hemicelulózy, lignínu a pektínu.



**Obrázok 14:** Detail testovaných vzoriek v 5. až 10. minúte testu. Zľava: 20% 1h., HF, HF 2% 2h. a ref.

Lignocelulóзовые materiály sú potenciálne veľmi reaktívne v dôsledku hojnej dostupnosti hydroxylových skupín. Prirodzenú reaktivitu lignocelulózy je možné využiť na zlepšenie ich vlastností, pričom výsledný materiál je lepší z hľadiska výkonu a všestrannosti. Hydroxylové skupiny sú dostupné v takom veľkom počte, že k vodíkovej väzbe v rámci polyméru a medzi polymérnymi druhmi dochádza v celom materiáli. Práve táto vodíková väzba umožňuje hydrofilným látkam, ako je voda z vlhkého prostredia, vstúpiť do štruktúry, interagovať s polymérmi a meniť ich vlastnosti. [44]



**Obrázok 15:** Schematické znázornenie vplyvu vody na rastlinné vlákna v asfaltovej matrici. Časť a) reprezentuje východzí stav, b) vlákna po napučaní a c) zmraštenie vlákna po desorpcii vody.

Obrázok 15 ilustruje pučanie vlákien po penetrácii vody do asfaltovej zmesi. V realite sú spojivom z časti alebo úplne aj vnútorné priestory vlákna. Strata adhézie medzi vláknom a spojivom sa teda deje aj priamo vo vnútri vlákna. Po desorpcii vody sa vlákno vráti do takmer pôvodného tvaru. Viskozita asfaltového spojiva je však závislá od teploty, takže spojivo sa pri nižších teplotách nedokáže prispôbiť novému prierezu vlákna. V letných mesiacoch sa tento problém tiež môže vyskytovať, keďže vonkajšie teploty ani zďaleka nedosahujú hodnoty pri výrobe zmesi. Molekuly vody sú veľmi malé. Či už nedokonalým



obalením alebo vplyvom klimatických účinkov a reologických zmien spojiva v ňom môžu vzniknúť mikrotrhliny, ktorými voda vniká dovnútra. Existuje silný predpoklad, že procesy absorpcie a vedenia vody vláknami, spolu s následnými objemovými zmenami sú základnou príčinou zhoršenia mechanických vlastností asfaltových zmesí vystužených rastlinnými vláknami vo vlhkých podmienkach. Náchylnejšie na tieto problémy sú zmesi s dlhšími a hrubšími vláknami.

Možnosťou, ako zmierniť problémy s vedením vody je dokonalé obalenie vlákien spojivom, ošetrovanie povrchu vlákien prísadami na zlepšenie adhézie medzi vláknami a spojivom, či priamo hydrofobizáciou vlákna. Tým sa zároveň maximálne zredukuje riziko predčasnej biodegradácie lignocelulóзовých materiálov. Vždy je však treba zvoliť riešenie, ktoré je v súlade s ekologickými požiadavkami.

### 3.3.2 Nasiakavosť asfaltového spojiva vybranými rastlinnými priadzami

Aj napriek ich hydrofilnej povahe povrchu majú rastlinné vlákna tendenciu dobre absorbovať aj hydrofóbne spojivo. Toto sa deje za predpokladu zahriatia spojiva a vlákna na požadovanú teplotu. Pri testovaní absorpcie spojiva bol použitý cestný asfalt 50/70. Všetky použité pomôcky, vzorky priadzi a spojivo boli nahriaté na teplotu 150 °C. Do testu boli zahrnuté vzorky: ľanová priadza s jemnosťou 500 g/km (L500), ľanová priadza 105x4 g/km (L105x4) a jutová priadza 300 g/km (J300). Nanášanie spojiva prebiehalo pomocou opracovaného plechu s miernym vyhnutím strany nanášania. Vzorky boli zvažované pred a po nanesení spojiva na váhe s vysokou presnosťou. Z každého druhu priadze bolo použitých 6 vzoriek.



Obrázok 16: Súprava na nanášanie spojiva na priadze a schéma spôsobu nanášania.



K ďalšiemu nanášaniu došlo v ďalšom kroku, tentokrát s použitým nezaoblenej (nevyhnutnej) hrany plechu tak, aby bolo odstráneného čo najviac prebytočného spojiva. Tieto vzorky sú označené ako L500\_Hrana a výslednú hodnotu absorpcie možno považovať za konzervatívny odhad. Poslednou vzorkou bola juta 300 tex\_asfalt, ktorá bola po nanosení spojiva vystavená teplote 150 °C po dobu 2 hodín. Väčšina spojiva sa do vlákien priadze vstreba a menšia časť asfaltových rezíduí ostala na povrchu misky. Zistilo sa teda, že priadze absorbujú spojivo na úrovni minimálne 100 % svojej hmotnosti (*Tabuľka 1*). Reálne sa hodnota absorpcie spojiva bude pohybovať niekde medzi 100 – 150 % hmotnosti priadze.

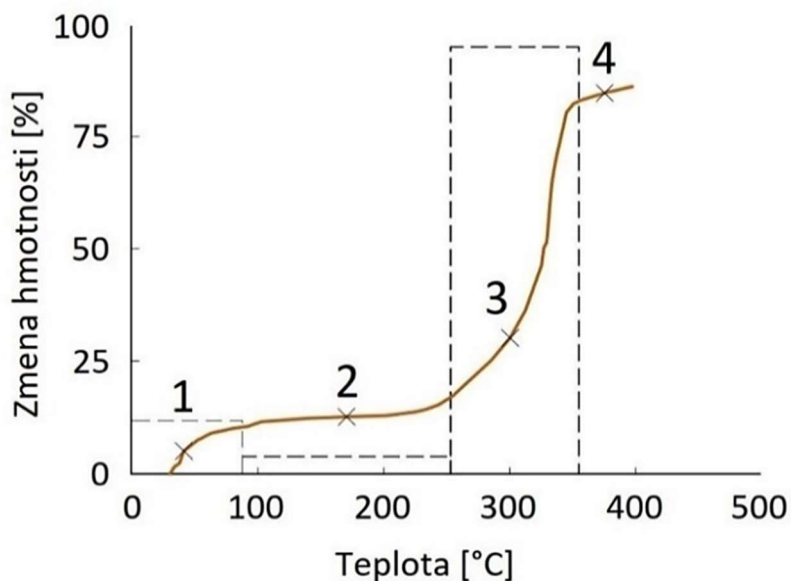
**Tabuľka 1: Prírastok asfaltového spojiva po nanosení na priadze.**

Typ priadze	Hmotnosť bez spojiva [g]	Hmotnosť so spojivom [g]	Obsah spojiva [g]	Prírastok hmotnosti [%]	Absorbované spojivo [%]
L500	0,204	0,710	0,506	348	248
L105x4	0,182	0,495	0,313	272	172
J300	0,129	0,501	0,371	387	287
L500_Hrana	0,205	0,426	0,222	208	108
juta 300 tex_asfalt	0,100	0,263	0,163	263	163

### 3.3.3 Termálna degradácia a pevnosť v ťahu vybraných rastlinných vlákien

Keď má ľubovoľné vlákno fungovať ako výstuha, musí mať dostatočnú pevnosť v ťahu na prenesenie ťahových napätí. Zároveň by malo mať vysoký modul pružnosti v ťahu, aby pri prenesení týchto napätí nedochádzalo k veľkým deformáciám. Rastlinné vlákna nemôžu konkurovať hodnotám týchto charakteristík najlepším syntetickým polymérom, uhlíkovým alebo minerálnym vláknám. Stále však veľa z nich vykazuje dostatočnú úroveň pevnosti v ťahu, zrovnateľnú napr. so stavebnou oceľou. Okrem pevnosti vlákna je dôležité aj spojenie vlákna s matricou. Extrémne vysoká pevnosť v ťahu tak v realite asfaltových zmesí až tak nerozhoduje. Naopak, aj napriek horšej chemickej kompatibilite poskytuje členitý povrch rastlinných vlákien dobré mechanické spojenie vlákna a matrice.

Dôležitou vlastnosťou lignocelulóзовých materiálov je ich teplotná citlivosť. S narastajúcou teplotou dochádza k odparovaniu vody z vlákna a k redukcii hmotnosti. Súčasne s tým klesá aj pevnosť v ťahu. Pri teplotách medzi 200 – 250 °C materiál začína postupne uhoľnatieť. Pri výrobe asfaltových zmesí v praxi sa teplota miešania pohybuje v rozmedzí 150 – 180 °C, takže by teoreticky nemalo dochádzať k extrémnemu zhoršeniu mechanických vlastností vlákien.



**Obrázok 17: Termogravimetrická krivka jutového vlákna. Prechodový bod (1), bod termálnej stability (2), aktivačný bod (3) a reziduálny bod (4). [45]**

Obrázok 17 znázorňuje termogravimetrickú analýzu jutového vlákna. Priebeh krivky úbytku hmotnosti v závislosti na teplote možno rozdeliť do troch zón. Najdôležitejším bodom z hľadiska zmeny mechanických vlastností je bod termálnej stability (2). Pre jutu sa teplota jeho dosiahnutia pohybuje okolo hodnoty 180 °C. Z tohto hľadiska by teda jutové vlákna nemali mať výrazne termálne degradovať pri výrobe asfaltových zmesí.

V rámci vlastného výskumu došlo k prevereniu reálnych pevností v ťahu vybraných rastlinných priadzí pred a po zaťažení teplotou. Zvolený bol postup (označený ako R) temperovania vzoriek po dobu 2 hodín pri teplote 150 °C tak, aby sa test blížil skutočnej výrobe, doprave a položení asfaltových zmesí na stavenisku. Samotné testovanie pevnosti v ťahu prebiehalo na prístroji MTS Alliance RT/30, ktorého vybavenie však nie je primárne určené na testovanie priadzí. Hlavným problémom pri testovaní ťahovej pevnosti lán, či priadzí je ich uchytenie v prístroji. Tam by ideálne nemalo dochádzať k žiadnemu prekľuzu priadze. V textilnom skúšobníctve sa preto používa uchytenie bez uzla. Toto však nebolo s použitým prístrojom možné a tak v uzloch vznikala priestor na uvoľnenie napätia šmýkaním priadze a doťahovaním uzla. Muselo teda dôjsť na úpravu výsledkov ex post, aby vypočítané moduly pružnosti odpovedali skutočnosti.

Dôležitým atribútom testovania ťahovej pevnosti priadzí je tiež rýchlosť zaťažovania. Tá má na výsledky merania zásadný vplyv. Čím rýchlejšie budeme priadzu zaťažovať, tým menej



času bude mať na preskupenie vnútorných síl a tým rastie úroveň pevnosti a klesá ťažnosť. Norma (ČSN EN ISO 2062: Textilie. Nitě v návinech. Zjišťování pevnosti a ťažnosti jednotlivých nití při přetrhu) udáva rýchlosť zaťažovania pri skúškach pevnosti nití 100 mm/min. Vzhľadom na možnosti použitého skúšobného prístroja bola nakoniec zvolená rýchlosť zaťažovania len 10 mm/min. Test prebehol pri teplote 20 °C.

Počet testovaných vzoriek bol vždy minimálne 3 ks. U jutových priadzí došlo k navýšeniu počtu vzoriek na 4 ks. Paradoxne bola u nich zaznamenaná najvyššia smerodajná odchýlka.

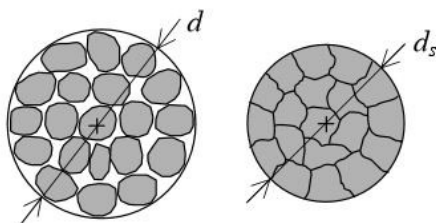
Priadza je dĺžková textília z jedného alebo viac vlákien. [46] Jemnosť priadze  $T$  je definovaná ako podiel hmotnosti úseku priadze  $m_p$  k jeho dĺžke  $l_p$ . Možno ju tiež vyjadriť ako súčin hustoty vlákien  $\rho$  a súčtovej plochy všetkých rezov vlákien v priereze priadze, ktorá sa označuje ako substančný prierez  $S$ . [47]

$$T = \frac{m_p}{l_p} = \rho S$$

Pre jemnosť priadze sa bežne používa jednotka tex, t. j. hmotnosť úseku priadze  $m_p$  [g] k jeho dĺžke  $l_p$  [km], t.j. ekvivalent jednotky g/km. Pokiaľ by boli vlákna priadze stlačené do homogénneho valca s plochou  $S$ , priadza by mala priemer:

$$d_s = \sqrt{4S/\pi} = \sqrt{4T/\pi\rho}$$

Tento priemer je teoretický najmenší možný priemer priadze (bez vzduchu) a označuje sa ako substančný priemer. [47]



**Obrázok 18: Priemer priadze  $d$  a substančný priemer priadze  $d_s$  [47]**

Podľa predošlých vzorcov bol vypočítaný substančný priemer, ktorý poslúžil ako základ pre výpočet plochy prierezu a ťahového napätia dosiahnutého pri testovaní pevnosti v ťahu (Tabuľka 2).



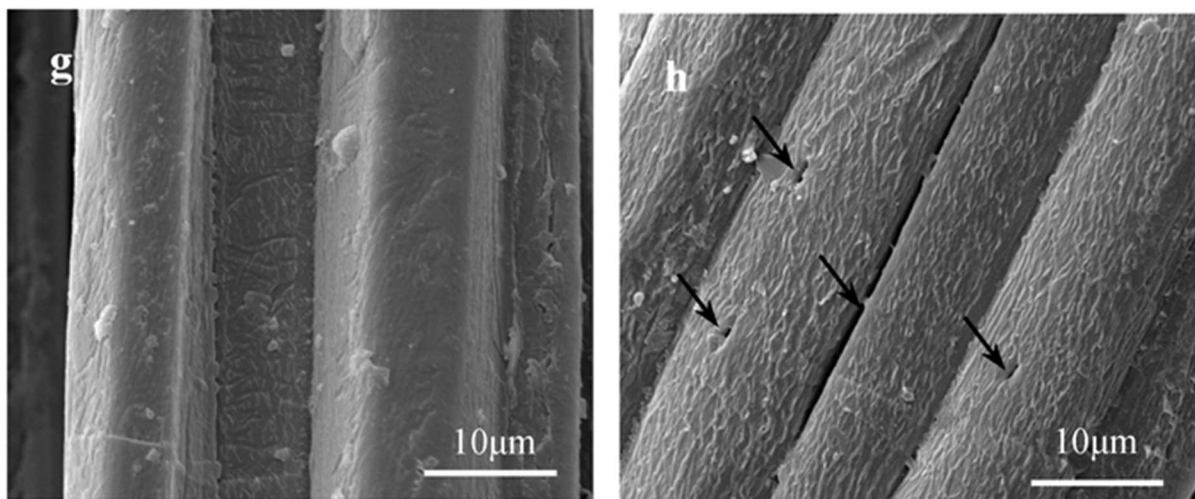
**Tabuľka 2: Vstupné parametre pre výpočet ťahových napätí a modulu pružnosti**

	T [tex]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$d_s$ [mm]	S [mm <sup>2</sup> ]
ľan 500 tex	500	1500	0,65147	0,333333
bavlna 50x10 tex	500	1550	0,64088	0,322581
konope 100x3 tex	300	1480	0,50802	0,202703
bavlna 150 tex	150	1550	0,35102	0,096774
juta 300 tex	300	1350	0,53192	0,222222
juta 300 tex_1% NaOH	279	1450	0,49496	0,192414
juta 300 tex_10% NaOH	271	1490	0,48122	0,181879

Hodnoty objemových hmotností materiálov sa v rôznych zdrojoch často líšia. Zvolená bola vždy stredná hodnota. Jemnosť priadzí  $T$  je uvedená podľa údajov výrobcu, okrem jutovej priadze, ktorej jemnosť bola zistená experimentálne. Taktiež došlo k úprave hodnoty jemnosti v prípade mercerovaných priadzí.

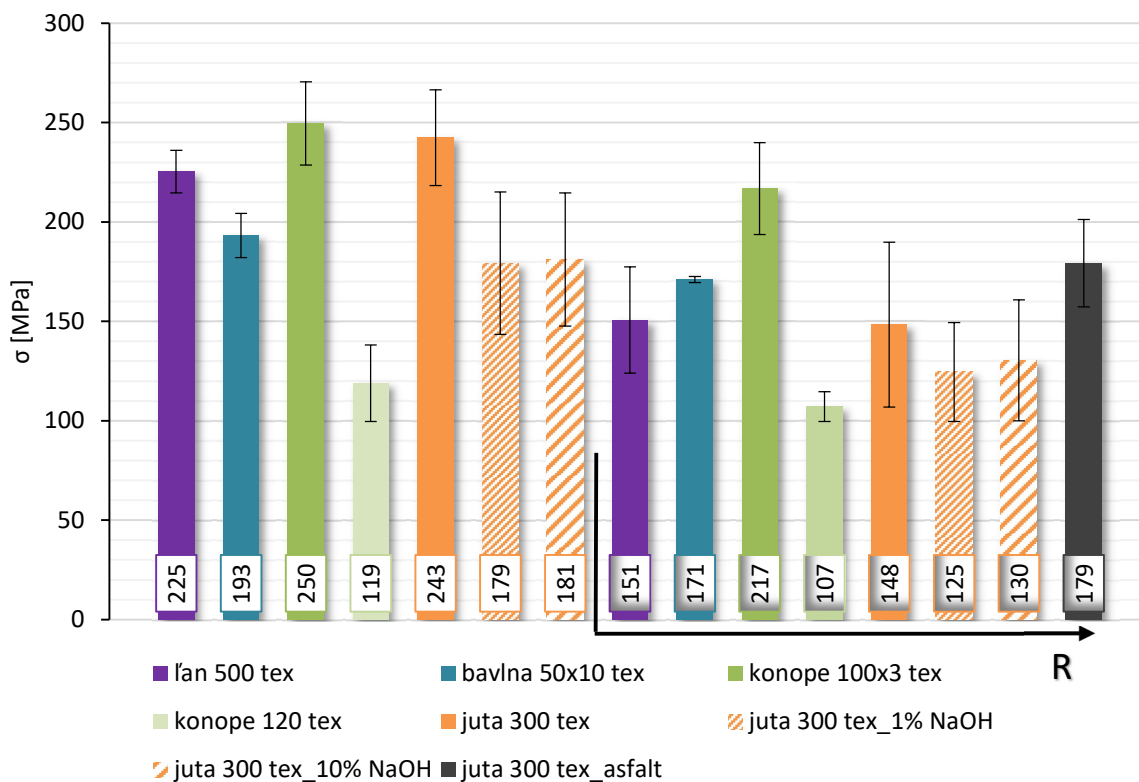
Boli zvolené dve koncentrácie roztokov a časov mercerizácie. Priadza „juta 300 tex\_1% NaOH“ bola mercerovaná v 1% roztoku NaOH po dobu 24 hodín. Druhá z mercerovaných priadzí bola namočená po dobu 1 hodiny v 10% roztoku NaOH. Roztok sa po chvíli zafarbil do žltá (Obrázok 19), čo značilo vyplavenie časti hemicelulózy a ostatných rozpustných látok. Výsledky potvrdili predpoklad redukcie jemnosti a prierezu vlákna po mercerizácii. Pri tomto procese sa taktiež zvyšuje objemová hmotnosť materiálu, keďže dochádza k vyplavovaniu rozpustných zložiek vlákien a k zmršťovaniu vlákna.

**Obrázok 19: Jutová priadza v 10% roztoku NaOH.**



Obrázok 20: Detail jutového vlákna (g) pred a (h) po mercerizácii 6 % NaOH, 120 °C a 90 min. [48]

Najvyššie pevnosti v ťahu panenských vlákien dosiahli konopná (100x3), jutová a ľanová priadza (Obrázok 21). Zreteľný pokles bol zaznamenaný u mercerovaných jutových priadzí. Najnižšie hodnoty boli pri najjemnejšej priadzi v teste, kde nedošlo k efektívnemu transferu napätia a miesto ich fyzického porušenia sa jednotlivé vlákna mali tendenciu skôr vyťahovať sa z priadze.

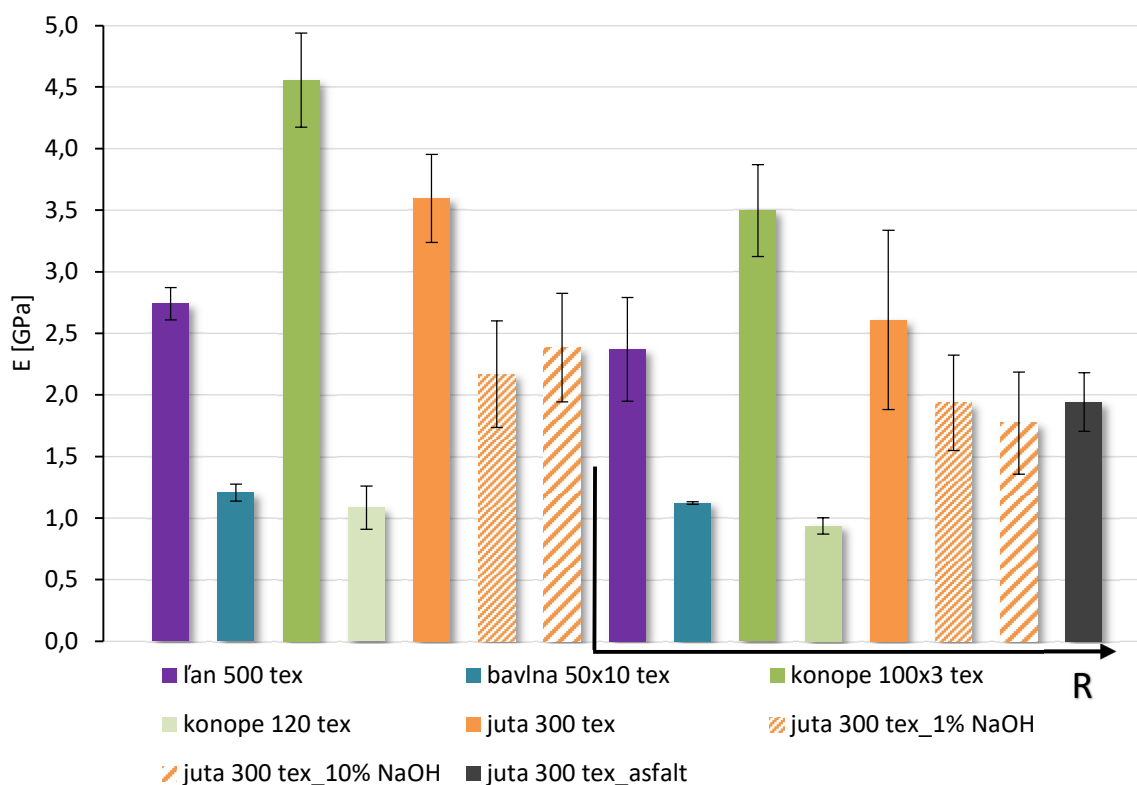


Obrázok 21: Pevnosť v ťahu testovaných priadzí. V časti napravo (R) sú vzorky po teplotnej záťaži.

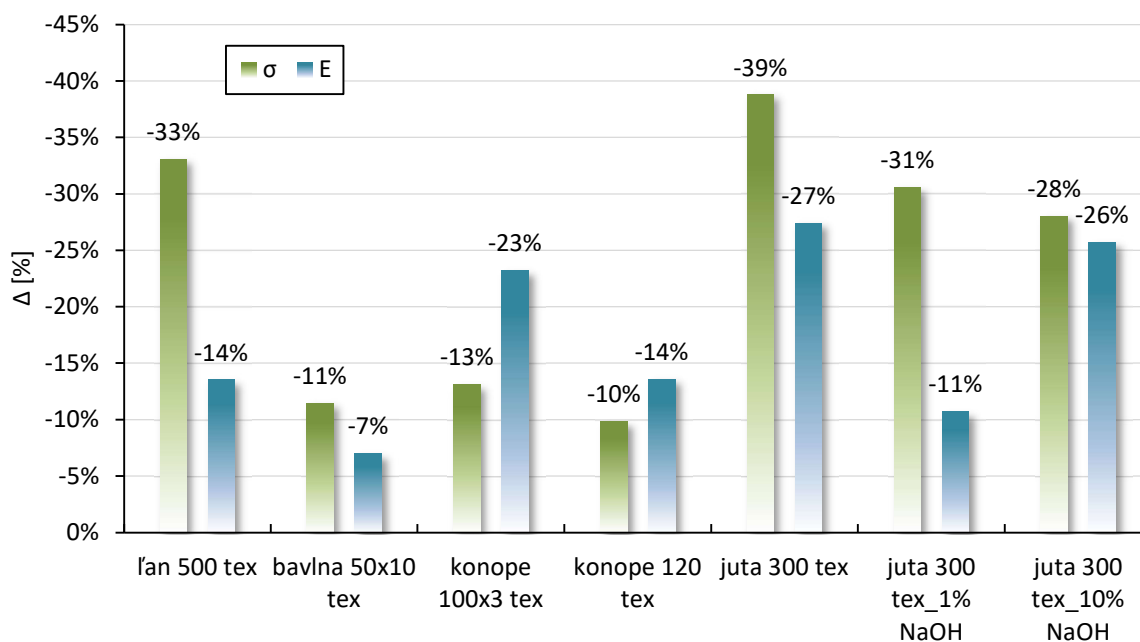


Po teplotnej záťaži došlo k logickému poklesu pevnosti v ťahu. Najvýraznejší pokles bol zaznamenaný pri jute a ľane (Obrázok 21 a 23). Mercerované priadze vykázali menšie hodnoty poklesu, čo môže byť zdôvodnené vyšším obsahom celulózy v nich. Podporuje to aj výsledok bavlnenej priadze, ktorá sa ukázala ako teplotne najstabilnejšia.

Výsledky modulu pružnosti v ťahu (Obrázok 22) ponúkajú podobný obraz, ako je tomu pri napätí. Bavlnená priadza podľa očakávaní dosiahla jednu z najnižších hodnôt modulu pružnosti. Na druhú stranu, tento materiál dosiahol najnižší pokles modulu pružnosti aj pevnosti v ťahu. Dokumentuje to kvality bavlny, ktorá neobsahuje takmer žiadnu hemicelulózu, či lignín. Amorfné regióny celulózy však vedú k zníženiu modulu pružnosti a k zvýšeniu elasticity.



Obrázok 22: Modul pružnosti v ťahu testovaných priadzi. Napravo (R) sú vzorky po teplotnej záťaži.



**Obrázok 23: Pokles ťahového napätia a modulu pružnosti po teplotnej záťaži**

Vzorka „juta 300 tex\_asfalt“ bola do testu zaradená ako špeciálny prípad kompozitného materiálu spojenia jutovej priadze a asfaltového spojiva. Nanášanie asfaltu na priadzu prebehlo ručným spôsobom po jeho nahriatí na teplotu 150 °C. Takto pripravená priadza prešla teplotným zaťažením (R), po ktorom spojivo penetrovalo priadzu a jej elementárne vlákna za vytvorenia celistvého kompozitného vlákna. Dobré spolupôsobenie matrice a vlákna dokazuje o 21 % vyššia pevnosť v ťahu oproti ekvivalentnej vzorke „juta 300 tex“ (R). Naopak, pri module pružnosti došlo k 26% poklesu hodnoty. Implikuje to teóriu, že počas relatívne pomalého zaťažovania (10 mm/min) dochádza k preklzu elementárnych vlákien v matrici, či rovno k ich porušeniu. Interakcia vlákno – spojivo však zabezpečí konečnú vyššiu pevnosť v ťahu. Nižší modul pružnosti je potom dôsledok týchto mikrotrhlin a odzrkadľuje povahu matrice (asfaltového spojiva) pri teplote 20 °C. Niektoré variácie vo výsledkoch, ako napr. nečakane malý pokles modulu pružnosti jutovej priadze po mercerizácii v 1% roztoku NaOH, možno čiastočne pripísať heterogénnosti priadzí. Pri všetkých jutových priadzach boli zaznamenané veľké smerodajné odchýlky. Pre úplnosť dodávam, že z týchto priadzí boli testované 4 vzorky pre každú sériu testov. Výsledky ostatných vzoriek boli prevzaté z mojej diplomovej práce [49]. Vo všeobecnosti možno konštatovať, že najcitlivejšia na teplotnú záťaž sa ukázala byť jutová priadza. Mercerizácia tento pokles zmierňuje, za súčasného zníženia ťahovej pevnosti. Vzorky si však zachovali relatívne vysokú pevnosť v ťahu.



### 3.4 Lignocelulóзовые vlákna a starnutie asfaltových zmesí

Keď je asfaltové spojivo vystavené vzduchu, časom stvrdne. Medzi jednotlivými typmi spojiva existujú veľké rozdiely v rozsahu tvrdnutia. Zvýšená tuhosť je pravdepodobne spôsobená zvýšenými interakciami medzi molekulami. Zatiaľ nie je úplne pochopené, ktoré typy interakcií sú najdôležitejšie. V zásade existujú tri rôzne hypotézy:

- Počas reakcie s kyslíkom dochádza ku kondenzácii molekúl bitúmenu, čo vedie k zväčšeniu veľkosti molekúl,
- Reakcia s kyslíkom zvyšuje polaritu molekúl bitúmenu, čo spôsobuje silnejšie polárne interakcie,
- Starnutie zvyšuje aromatickosť, ktorá zvyšuje interakcie pi-pi a disperzné interakcie.

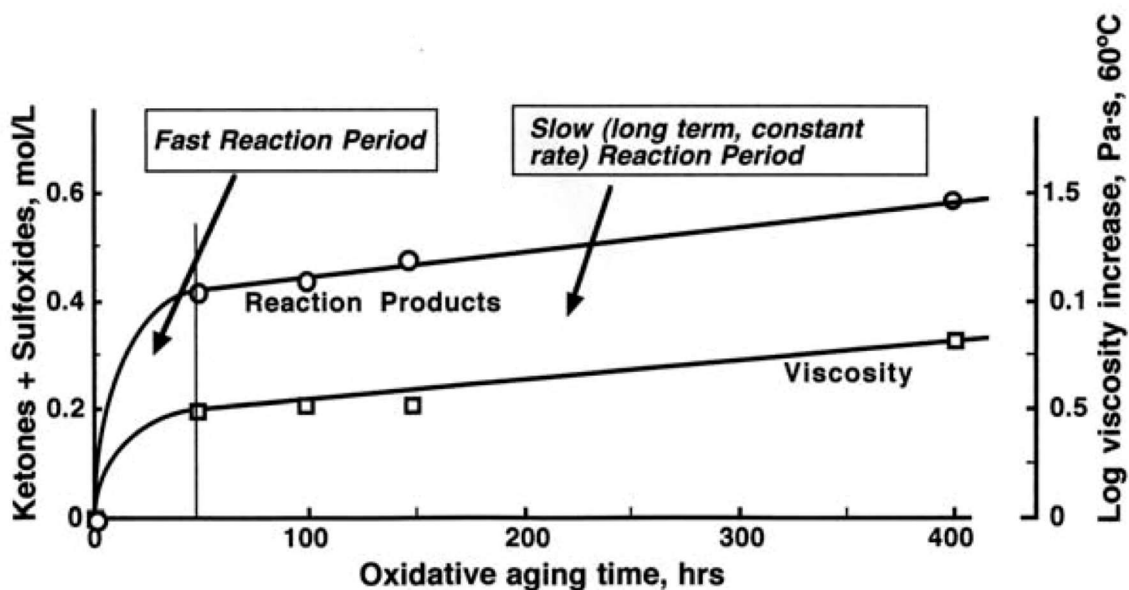
[50]

K starnutiu asfaltových vozoviek dochádza počas celej doby ich životnosti. Pri výrobe asfaltových zmesí dochádza k starnutiu spojiva v dôsledku vysokých teplôt používaných pri procese miešania. Starnutie spôsobené výrobou asfaltovej zmesi spolu s degradáciou asfaltových spojív pri výstavbe, ktorá súvisí so skladovaním, prepravou a ukladaním, sa bežne označuje ako krátkodobé starnutie (short-term aging - STA). Hlavnými výsledkami STA je strata prchavých látok a rýchla oxidácia asfaltových spojív. V dôsledku toho dochádza počas životnosti vozovky k dlhodobému starnutiu (long-term aging - LTA). Hlavnými príčinami LTA sú interakcie vozovky s reaktívnymi formami kyslíka v atmosfére, vlhkosťou, teplotou a UV žiarením. LTA je spojené hlavne so zabudovaním kyslíka do spojiva, čo vedie k vytvoreniu niekoľkých funkčných skupín, čím sa zvyšuje celková polarita materiálu. [51]

Tvorba ketónov bola identifikovaná ako hlavný faktor vedúci k tvorbe asfalténov pri oxidácii a ukázalo sa, že asfaltény sú primárne zodpovedné za zvýšenie viskozity pri starnutí. Ukázalo sa, že ketóny vznikajúce oxidáciou sa koncentrujú v asfalténovej frakcii. Bolo navrhnuté, že ketónová funkčná skupina sama osebe nie je inherentne zodpovedná za zvýšenie viskozity, ale že jej tvorba dostatočne mení polaritu, a tým aj rozpustnosť, súvisiacich kondenzovaných aromatických zložiek, aby spôsobila ich agregáciu a stala sa súčasťou asfalténovej frakcie, čím sa zvyšuje viskozita. Ďalším hlavným oxidačným produktom ľahko identifikovateľným infračervenou spektroskopiou je sulfoxidová funkčná skupina; avšak účinkom sulfoxidov na fyzikálne vlastnosti asfaltových spojív sa v minulosti venovala malá pozornosť, aj keď sú



sulfoxidy často produkované vo výrazne väčších množstvách ako ketóny, najmä v asfaltoch s vysokým obsahom síry. [52]



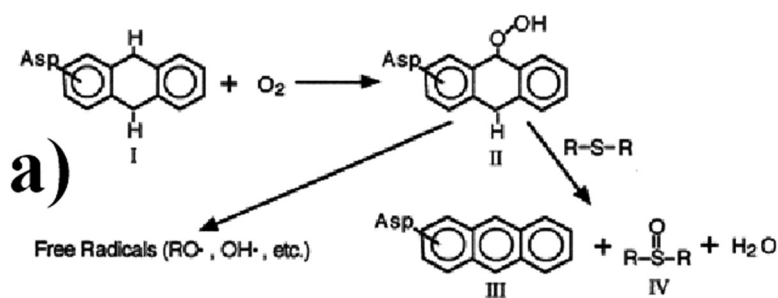
Obrázok 24: Kinetika formovania ketónov a sulfoxidov (ľavá zvislá os) a prírastok viskozity (pravá zvislá os) v závislosti na čase (v hodinách). Test dlhodobého starnutia PAV (80 °C a 2,03 MPa). [52]

Ukázalo sa, že chemické reakcie uhľovodíkov, ktoré dominujú rýchlym a pomalým reakčným obdobiam, sú zásadne odlišné. Na základe navrhovaného mechanizmu pre dlhodobú oxidačnú reakciu asfaltu znázornenej na Obrázku 25 sú ketóny a sulfoxidy produkované z bežného prechodného produktu oxidácie hydroperoxidu vytvoreného na benzylových uhlíkoch (stupeň VII). [52]

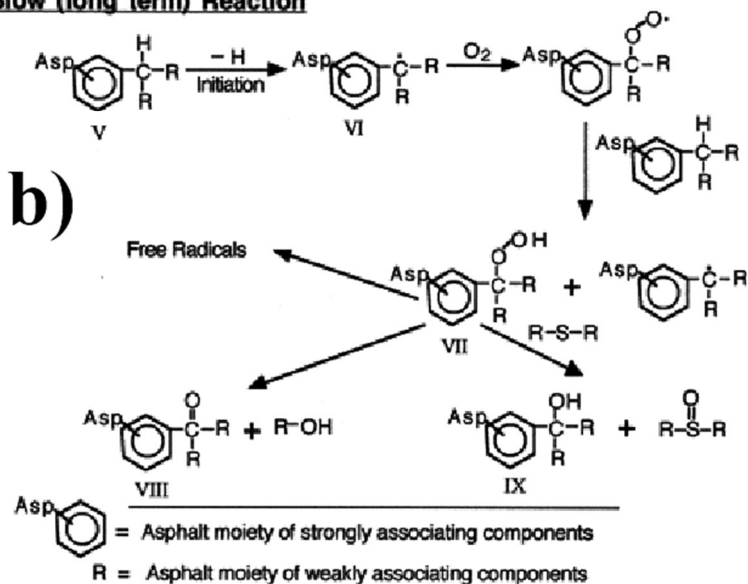
Dlhodobá reakcia ovplyvňuje tvrdnutie asfaltu oxidačným starnutím. Jej význam je ten, že zahŕňa oxidáciu molekúl primárne v polárnej aromatickej frakcii, na benzylovom uhlíku (stupeň V, Obrázok 25). Tieto reaktívne molekuly sú pre-asfalténové zložky. Vodík pripojený k benzylovému uhlíku sa ľahko odstráni za vzniku voľného radikálu, ktorý ľahko reaguje so vzdušným kyslíkom za vzniku hydroperoxidu (stupeň VII, Obrázok 25). Tento hydroperoxid potom môže reagovať alebo sa rozkladať niekoľkými spôsobmi. Prevalha každej cesty závisí od rôznych premenných od zdroja asfaltu a prostredia, ako je obsah síry, fyzikálno-chemická mikroštruktúra (molekulárna mobilita), teplota a dostupnosť kyslíka. [52]



**Fast (spurt) Reaction**



**Slow (long term) Reaction**



**Obrázok 25: Hlavné reakčné cesty duálneho oxidačného mechanizmu asfaltu. Rýchle reakčné obdobie na začiatku oxidácie (a) a pomalé reakčné obdobie po zvyšok doby oxidácie (b). [52]**

Hydroxylové skupiny dostupné po dĺžke reťazca celulózy sú síce zodpovedné za hydrofilnosť lignocelulóзовých vláken, avšak ponúkajú možnosti chemickej, či fyzikálnej úpravy vlastností týchto materiálov. Pomocou nich sa na vlákna dá naviazať celá škála chemických zlúčenín. Medzi najčastejšie používané chemické procesy patria esterifikácia, éterifikácia, silylácia a naviazanie polymérov.

Okrem klasických chemických postupov existujú aj iné spôsoby ošetrenia, napr. pomocou purifikovaných enzýmov, ako je pektináza, polygalakturonáza, lakáza, celulóza a hemicelulóza. Tie boli použité na modifikáciu rastlinných vláken na zlepšenie hydrofóbnosti a pevnosti odstránením amorfných hydrofilných látok z matrice a zlepšením separácie vláken. Tieto enzýmovo katalyzované procesy využívajú purifikované enzýmy a potrebujú médium na báze organického rozpúšťadla, čo spôsobuje ich ekonomickú nevýhodnosť. Nanešťastie, niektoré z týchto procesov využívajú aj nebezpečné chemikálie.



Ekologickou alternatívou môže byť využitie mikroorganizmov, napr. mikróbov produkujúcich lipázu na transesterifikáciu jutových vlákien pre zlepšenie pevnosti v ťahu, hydrofóbnosti a odolnosti proti degradácii a mikrobiálnemu napadnutiu. [53]

Celulózové vlákna majú ďalej potenciál ovplyvniť vyššie spomínanú mikroštruktúru asfaltového spojiva. Toto sa dá dosiahnuť použitím celulózových mikro a nanovláken (MCF, resp. CNF) a celulózových nanokryštálov (CNC). Jedná sa o materiály s vysokými hodnotami pevnosti a modulu pružnosti v ťahu. Zvyčajne sa vyrábajú hydrolýzou rastlinných vlákien v silných kyselinách. Ekologickým variantom môže byť použitie bakteriálnej celulózy (BC). Nedávny výskum [54] ukázal, že CNF zlepšili dynamickú viskozitu a adhéziu spojiva ku kamenivu. Zároveň došlo k zníženiu stekavosti spojiva, k zlepšeniu odolnosti proti trvalým deformáciám a trhlinám. Zatiaľ nenájdeme veľa prác venujúcim sa použitiu týchto materiálov v asfaltových zmesiach. Vzhľadom k šírke možností úprav lignocelulózových vlákien a prvými pozitívnymi výsledkami výskumu s CNF sa jedná o perspektívny smer vývoja. V rámci mikro a nanovláken dostávame do mierky molekulárneho sveta. Rozhodne by stálo za to preveriť možnosť zmiernenia oxidačného starnutia asfaltového spojiva blokovaním uvedených reakcií (*Obrázok 25*) chemickou alebo fyzikálnou cestou.

### 3.4.1 Starnutie celulózových vlákien

Celulózové vlákna podliehajú oxidačným procesom, ktoré menia ich štruktúru a mechanické vlastnosti. Dôkazom termálnej oxidácie je pokles pevnosti v ťahu vlákien v predchádzajúcej časti.

Existujú tri aktívne hydroxylové skupiny každého glukózového základného kruhu v makromolekulárnom reťazci celulózy, ktorý je náchylný na oxidáciu. Štúdiom starnutia čistého celulózového papiera sa zistilo, že na povrchu zostarnutého celulózového vlákna dochádza v dôsledku oxidačnej a hydrolytickej reakcie k nehomogénemu rozkladu. Degradáčnym mechanizmom celulózového vlákna je najmä rozpad glykozidickej väzby. Avšak so starnutím celulózového papiera zostáva rýchlosť tvorby karbonylu konštantná. Bolo konštatované, že po tepelnom starnutí sa na povrchu celulózových vlákien objavujú drobné trhlinky, čo vedie k zníženiu dĺžky vlákna, kryštalinity a veľkosti zrna. Infračervenou spektroskopiou (FTIR) bolo pozorované, že intenzity vrcholov (peakov) karboxylových a karbonylových celulózových papierov sa zvyšujú po starnutí vlákna. [55]





Výskumníci z Číny [55] nedávno preverili vplyv starnutia na vybrané charakteristiky bežne dostupných celulóзовých vlákien, používaných na stabilizáciu zmesi typu SMA. K dispozícii mali, okrem referenčných celulóзовých vlákien, krátkodobo zostarnuté vlákna (extrahované 24 hodín po výrobe zmesi) a dlhodobo zostarnuté vlákna, ktoré boli získané z 8-ročnej vozovky. Po zamiešaní s modifikovaným asfaltovým spojivom z nich potom vyrobili vzorky, ktoré podrobili sérii testov. Tie odhalili mechanizmy starnutia vlákien a ich efekt na vlastnosti spojiva. Výsledky ukázali dôležitosť zaoberať sa touto témou.

Povrchová vrstva väčšiny dlhodobo zostarnutých vlákien sa odlupovala, čo vedie k tvorbe defektov, dokonca prasklín. Pôvodné duté celulóзовé vlákno sa po starnutí postupne mení na sploštené. Ekvivalentný priemer a polomer vlákna sa zodpovedajúcim spôsobom zväčšujú spolu so zväčšovaním šírky vlákna v dôsledku starnutia. Priemerný pomer strán sa po starnutí výrazne znižuje. S poklesom pomeru strán sa axiálne napätie v zostarnutých vláknach znižuje a šmykové napätie na rozhraní sa zreteľne zvyšuje v rozsahu prenosu napätia. Po dlhodobom starnutí sa obsah popola vo vláknach značne zvyšuje a schopnosť absorpcie oleja očividne klesá. To môže znížiť schopnosť celulóзовého vlákna adsorbovať a stabilizovať spojivo. Starnutie celulóзовých vlákien nevyhnutne znižuje prevádzkové parametre asfaltovej malty pri vysokých teplotách. Prítomnosť dlhodobo zostarnutých vlákien výrazne znižuje húževnatosť a viskozitu bitúmenu. Odolnosť bitúmenu proti trhlinám a únave je znížená. [55]

### **3.5 Rastlinné vlákna použité v rámci vlastného výskumu**

Pre výskumné práce boli zvolené konopné, ľanové a jutové vlákna, ktoré boli získané z priadzí. Táto forma základného materiálu poskytla možnosť relatívnej kontroly nad dĺžkou výstužných prvkov. Preverovaný bol taktiež rozdiel medzi použitím prvkov vo forme priadzí a základných vlákien, ktoré vznikli rozpadom prierezu priadze. Materiály vlákien boli spomedzi dostupných materiálov vybrané kvôli ich vysokej pevnosti v ťahu a vysokému modulu pružnosti. Tieto charakteristiky sú dôležité pre plnenie výstužnej funkcie v zmesi. Bežne dostupné sú napríklad bavlnené vlákna, z ktorých sa produkuje väčšina spotrebného textilu. Jedná sa o logické uplatnenie, keďže sa vyznačujú vyššou elasticitou. Vďaka trendom konzumného spôsobu života a rýchlej módy v posledných dekádach výrazne zvýšila produkcia textilu, čo spôsobilo ekvivalentný nárast produkcie textilných odpadov. S ním zatiaľ nevieme efektívne nakladať. Majoritné riešenia jeho spracovania prakticky predstavujú



len skládkovanie a energetické využitie v spaľovni. Je teda veľmi pravdepodobné, že v blízkej budúcnosti teda dostane šancu na uplatnenie napr. v asfaltových zmesiach aj bavlna.

### 3.5.1 Konope

Konope (*Cannabis sativa L.*) je prevažne dvojdomá a zriedkavo jednodomá jednoročná bylina. Výška vzpriamenej dutej stonky sa mení v závislosti od odrody a prostredia od 0,2 do 6 m a meria 1 – 3 cm v priemere na základni. Samičie rastliny sa vyznačujú väčšou robustnosťou v porovnaní so samčiami, ktoré sú vyššie a štíhlejšie. [56]

Konope má možnosť byť veľmi udržateľnou a ekologicky neškodnou plodinou, ak sa s ňou správne zaobchádza. Korene konope majú významný potenciál absorbovať a ukladať toxické prvky, ako je olovo, nikel, kadmium a ďalšie škodlivé prvky a látky, čo umožňuje využitie rastliny konope na fytoremediáciu znečistených pôd. Množstvo prospešných ekologických, agronomických a farmaceutických vlastností konope ho kvalifikuje ako užitočnú surovinu pre rôzne konvenčné (vláknina, potraviny, olej, lieky) a pokročilé priemyselné produkty. Tradične sa pestuje na vlákno alebo ako plodina s dvoma spôsobmi použitia (zrno aj vlákno). Je všeobecne považovaná za plodinu s rôznym využitím a širokou škálou súčasných a budúcich aplikácií, vrátane tých pre výživu, energetiku, textil, zdravotníctvo a širokú škálu priemyselného tovaru. Rastlina konope je jednou z najstarších plodín na svete, ktorá bola široko pestovaná kvôli svojim priemyselným, nutričným, liečivým a psychotropným produktom. [56]

Konopné vlákna obsahujú 73 – 92 % celulózy, 5 – 22 % hemicelulózy a 3 – 5 % lignínu. [57] Elementárne vlákna sú bunky vretenovitého tvaru s tupými, prípadne vidlicovými koncami, v priereze pri mladej stonke takmer kruhové, neskôr mnohouholníkového tvaru. Dĺžka technického vlákna je 1 - 2 m, elementárne vlákno dosahuje 1,5 - 2 cm, s hrúbkou 15 - 50  $\mu\text{m}$ . Merná pevnosť za sucha je 29 - 70 cN/tex, za mokra sa pevnosť zvýši o 15 %. Pomerné predĺženie je za sucha 1,5 % až 3 % a za mokra až 4 %. Vlákna majú objemovú hmotnosť 1 480  $\text{kg}/\text{m}^3$ . Odolnosť voči poveternostným vplyvom majú konopné vlákna najvyššiu z rastlinných vlákien. [58]

Použitie konopných vlákien v asfaltovom betóne bolo veľmi obmedzené. V rámci vlastnej diplomovej práce došlo k počiatočnej štúdii [49], kde zmes s konopnou priadzou 100x3 tex



vykázala zlepšenie hlavne v prípade redukcie parametrov v teste odolnosti proti trvalým deformáciám.

Výskumníci z Juhovýchodnej Ázie priniesli detailnú štúdiu [59] možnosti použitia týchto vlákien v asfaltových zmesiach s obsahom RA určených pre nízko zaťažené vozovky. Zmes vyžadovala vyšší optimálny obsah spojiva kvôli vysokej nasiakavosti spojiva vláknami. Najlepšie charakteristiky boli zistené pre obsah vlákien 0,25 % hm. a dĺžkou 24 mm. Dĺžka vlákien mala výraznejší vplyv na zlepšenie charakteristík, než obsah vlákien. Ako najefektívnejší obsah sa pre všetky dĺžky vlákien ukázala hodnota 0,05 %. Nad touto úrovňou bola miera zlepšenia mechanických vlastností relatívne nízka. Zmes vykázala podobné hodnoty Marshallovej stability v porovnaní s normálnym asfaltovým betónom, avšak bol zaznamenaný nárast pevnosti v priečnom ťahu. Pri rovnakej úrovni namáhania prispeli zlepšené elastické vlastnosti v dôsledku pridania konopných vlákien k zlepšenej odolnosti proti únave a trvalým deformáciám.

### 3.5.2 Ľan

Ľan (*Linum usitatissimum L.*) je modrokvetá rastlina výšky do 1,4 m a pestuje sa na vlákna a potravinárske účely najmä v chladnejších oblastiach sveta. Je to jednoročná rastlina, ktorá sa prevažne vyskytuje v krajinách, ako je Čína, Rusko a Kanada. Ľan je jednou z najstarších vláknitých plodín. V Číne a Indii sa pestuje už 5 000 rokov a pred 10 000 rokmi sa pestoval v Egypte a Samárii. Ľan sa používa na vlákna a tiež na ľanové semienko. Ľanové vlákno (ktoré je trikrát pevnejšie ako bavlna) sa používa na výrobu tkanín v mnohých textilných odvetviach vďaka svojej prirodzenej schopnosti narovnať sa. Používa sa aj na výrobu dekoračných látok, pevných priadzí, povrazov a pneumatík. Ľanové semienka majú mnoho nutričných vlastností a obsahujú vysokú koncentráciu omega-3 mastných kyselín s krátkym reťazcom. Ľan sa pestuje hlavne pre svoju vlákninu, ale jeho semená sú jedlé a môžu zabrániť srdcovým chorobám, rakovine, mŕtvici a cukrovke. [60] Z chemického hľadiska obsahujú vlákna 60 – 81 % celulózy, 14 – 19 % hemicelulózy a 2 – 3 % lignínu. [57]

Ľanové vlákno je tvorené z vlákien elementárnych, ktorých tvar odpovedá šesťbokému hranolu, ktorého oba konce sú zakončené špičkami. Dĺžka technického vlákna sa pohybuje v rozmedzí 60 cm až 80 cm, dĺžka vlákna elementárneho dosahuje 2,5 – 3 cm. Hrúbka technického vlákna je 600  $\mu\text{m}$ , elementárne má hrúbku 15 – 18  $\mu\text{m}$ . Merná pevnosť za sucha je 44 – 53 cN/tex, pričom pevnosť za mokra dosahuje 115 až 120 % pevnosti za sucha.



Pomerné predĺženie je 0,6 – 1,8 % za sucha, 0,7 – 2,2 % za mokra. Objemová hmotnosť je cca 1 440 kg/m<sup>3</sup>. Obsah vlhkosti za normálnych klimatických podmienok činí 15 %. [58]

Ľanové vlákna boli v asfaltových zmesiach použité len v rámci vlastného výskumu a diplomovej práce [49]. Nepodarilo sa žiaľ nájsť žiadne externé zdroje spomínajúce tento materiál. Je to trochu škoda, keďže ľanové vlákna sú dostupnejšie a ekonomicky výhodnejšie, než je tomu pri textilných konopných vláknach.

### 3.5.3 Juta

Vlákná juty sa získavajú zo stoniek jutovníka (*Corchorus capsularis* a *C. olitorius*). Tie rastú v tropických nížinných oblastiach s vysokou vlhkosťou. Preto sú jej najväčšími svetovými producentmi India a Bangladéš. Nazývaná aj „zlaté vlákno“ je juta dlhá, mäkká a lesklá, s výškou stonky až 5 m a priemerom vlákna 17 – 20 mikrónov. Juta je druhou najdôležitejšou vláknovou plodinou na svete z hľadiska pestovania a využitia. Je to najdlhšie, najlacnejšie a jedno z najsilnejších rastlinných vlákien, ktoré sa získavajú z kôry stoniek. Na indickom subkontinente sa juta považuje za dôležitú plodinu a má viacúčelové využitie ako potraviny, vlákna, palivo, priemyselné materiály, obohacovanie pôdy atď. Jutové vlákno je 100% biologicky odbúrateľné a ekologické. [61] Počas priemyselnej revolúcie boli ľanové a konopné vlákna vo vrecovine vo veľkej miere nahradené vláknami jutovými. Dodnes tvorí vrecovina väčšinu vyrábaných výrobkov z juty. Jutové nite a priadze sú tiež používajú do záclon, krytov stoličiek, kobercov a k podpore linolea. [52] V stavebnom priemysle sa tradične využíva pre výrobu protieróznych rohoží. Vzhľadom k nízkej cene vlákna sa jedná o nádejný zdroj výstužných prvkov v asfaltových zmesiach.

Juta obsahuje 51 – 84 % celulózy, 12 – 20 % hemicelulózy a 5 – 13 % lignínu. [57]

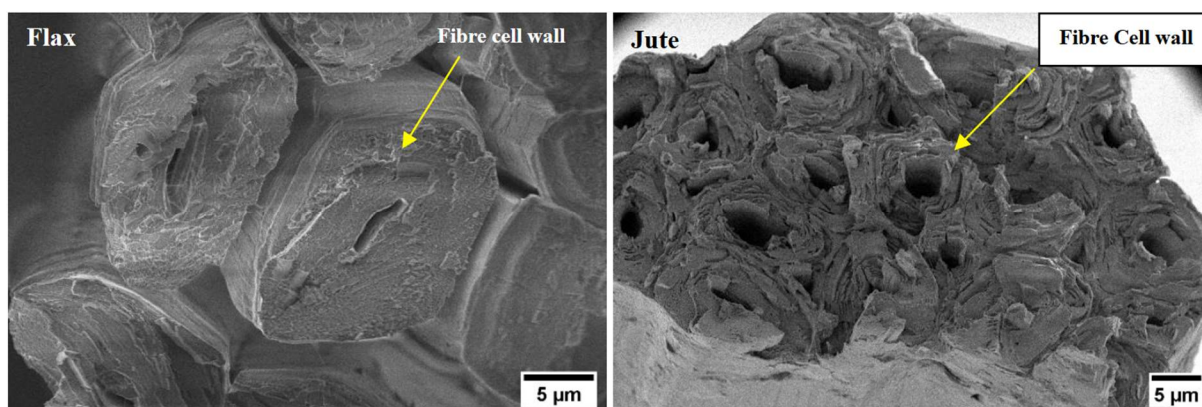
Vo výskumnej štúdii Rashida a kol. sa skúmalo jutové vlákno ako výstužný materiál v asfaltových zmesiach. Výsledky Marshallovej stability ukázali, že 0,5 % a 1 % jutového vlákna viedlo k zvýšeniu stability o 29 % a 10 %. Optimálny obsah asfaltu sa zvýšil zo 4 na 5 %. Zmesi modifikované jutovým vláknom vykazovali lepšiu odolnosť proti deformácii ako nemodifikované a autori odporučili obsah jutového vlákna 0,5 %. Ismael a kol. skúmali tri rôzne vlákna (jutové, polyesterové a uhlíkové vlákna) s rôznym obsahom (0,25 %, 0,5 % a 0,75 %) a dĺžkami (5, 7,5 a 10 mm) v zmesiach SMA. Všetky tri typy vlákien s obsahom 0,5 % a dĺžkou 7,5 mm môžu účinne zlepšiť odolnosť proti vyjazdeniu koľají a stabilitu SMA.



Spomedzi nich vykázali najväčšie zlepšenie uhlíkové vlákna, po nich nasleduje polyesterové vlákno, potom jutové vlákno. Jutové vlákna však vykazovali najlepšie výsledky testu stekania spojiva. Okrem tradičných horúcich asfaltových zmesí zmesí sa jutové vlákno použilo aj ako výstužný materiál v teplých a studených asfaltových zmesiach. [17]

Dobrá biologická odbúrateľnosť jutových vlákien je výhodná pre protierózne rohože. Vo vozovke však má potenciál spôsobiť veľké štrukturálne problémy. Na tento účel vykonal Banerjee a Ghosh [62] výskum mechanického správania juty v asfaltovom spojive. Po hydrálnom a enzymatickom ošetrení, ktoré simuluje mikrobiálny útok, sa ukázalo, že hydrálne ošetrenie po dobu 6 mesiacov nestačí na porušenie rozhrania juta-asfalt a degradáciu obaleného vlákna. Preto konštatovali, že asfalt pôsobí ako ochrana juty pred mikrobiálnym napadnutím. V rámci tejto štúdie bola okrem vlákien skúmaná zmes s výstužnou tkaninou na báze juty. Ukázalo sa, že tkanina pôsobí efektívnejšie, než vlákna a odporučili ju ako možnosť výstuže v asfaltovom súvrství.

Jutové vlákna sú, vzhľadom k veľkosti ich produkcie a celosvetovému dopytu, ekonomicky najvýhodnejším druhom rastlinného vlákna spomedzi vlákien použitých v rámci dizertačnej práce. Jedná sa preto o najhorúcejších kandidátov pre použitie vo vozovkách.



Obrázok 26: Detail elementárneho vlákna ľanu (vľavo) a juty. [63]

### 3.6 Prehľad vlastností vybraných textilných vlákien

Nasledujúca tabuľka uvádza prehľad vybraných materiálových charakteristík zvolených rastlinných vlákien. Tieto údaje platia pre elementárne vlákna. V literatúre nájdeme v hodnotách často odchýlky a preto nie je rozumné ich považovať za exaktné. Najväčšiu



variabilitu spôsobuje fakt, že sa jedná o prírodné materiály a na ich výslednú kvalitu vplýva veľké množstvo faktorov: od variety rastliny, cez pôdu, škodcov až po klimatické vplyvy.

**Tabuľka 3: Prehľad vybraných materiálových charakteristík zvolených vlákien [30] [64]**

Typ vlákna	Objemová hmotnosť [g/m <sup>3</sup> ]	Pevnosť v ťahu [MPa]	Modul pružnosti v ťahu [GPa]	Špecifický modul [GPa/g/cm <sup>3</sup> ]	Predĺženie pri prerušení [%]
Konope	1,48	690	30,0-60,0	20,3-40,5	1,6
Ľan	1,50	345-1000	27,6	18,4	2,70-3,20
Juta	1,30-1,40	393-773	13,0-26,5	10,0-18,9	1,16-1,80
Bavlna	1,50-1,60	287-800	6,0-13,0	6,0	3,00-7,00



**Obrázok 27: Elementy testovaných priadzí. Zľava: konope 100x3 tex, ľan 500 tex a juta 300 tex. Konopná priadza bola zložená z 3 nití s jemnosťou 100 tex. Ich mierny zákrut dovoľoval ľahký rozpad po nastrihaní na požadovanú dĺžku elementov.**



## 4. EXPERIMENTÁLNA ČASŤ

V experimentálnej časti sa práca bude venovať výrobe a testovaniu asfaltových zmesí s obsahom vybraných rastlinných vlákien. Dĺžky výstužných prvkov, 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 ľanové vlákna, porovnávané s komerčne dostupnými celulóзовými vláknami. Následne bola vyrobená zmes typu ACL s ľanovými 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 možností chemickej úpravy povrchu vlákien. Táto problematika by si však samotná zaslúžila pozornosť minimálne v rozsahu aktuálnej práce.

### 4.1 Skúšobné metódy

Vo všeobecnom prehľade skúšobných metód sú uvedené spoločné metódy pre testované asfaltové zmesi. Z každej zmesi boli vyrobené min. 3 Marshalllove telesá zhutnené 2x50 rázmi, na ktorých boli skúšané moduly tuhosti a odolnosť proti trhlinám. Pokiaľ bola testovaná citlivosť voči účinkom vody, vyrobených bolo min. 6 Marshallových telies zhutnených 2x25 rázmi. Postup výroby Marshallových telies bol v súlade s normou [65]. Rozmery všetkých skúšobných telies boli zamerané v súlade s normou [66]. Z vybraných zmesí boli tiež vyrobené 2 dosky, na ktorých sa robila skúška vyjazďovania kolesom. Výroba skúšobných dosiek bola realizovaná v súlade s normou [67].

#### 4.1.1 Objemová hmotnosť a medzerovitosť

Jedným so základných parametrov asfaltových zmesí je ich medzerovitosť. Zmesi s vláknami majú vo všeobecnosti tendenciu k nižšej objemovej hmotnosti a vyššej medzerovitosti. Unitárnym mechanizmom je vytvorenie 3D štruktúry vlákien, ktorá závisí od ich rozmerov. Materiál vlákna má však tiež veľký vplyv na medzerovitosť zmesi. Nasiakavé materiály okrem adsorpcie spojivo aj absorbujú, čím sa zníži jeho dostupný obsah pre obalenie zrn kameniva, či k vytvoreniu mastixu požadovaných vlastností. Objemová hmotnosť bola vypočítaná podľa normy [68]. Medzerovitosť bola stanovená podľa ČSN EN 12697-8:2020.



Dôležité bolo tiež stanovenie maximálnej objemovej hmotnosti telies a ich medzerovitostí. Postup stanovenia maximálnej objemovej hmotnosti a medzerovitosti bol v súlade s normou [69], a tieto parametre boli stanovené pre každú vyrobenú zmes zvlášť.

#### 4.1.2 Stanovenie citlivosti voči účinkom vody a mrazu

Táto skúška bola vykonaná v súlade s normou [70]. Z každej zmesi bolo k testovaniu použitých 6 skúšobných telies. Po sýtení a temperovaní vo vodnom kúpeli polovice telies sa museli všetky telesá schladiť na teplotu 15 °C, aby mohli byť následne skúšané podľa ČSN EN 12697 - 23 [71], čiže skúškou pre stanovenie pevnosti v priečnom ťahu. Výsledkom bolo vypočítanie pomeru pevnosti v priečnom ťahu (ITSR) skupiny mokrých telies a skupiny suchých telies. Pri zmesi ACL 16+ došlo aj na testovanie odolnosť voči účinkom mrazu podľa modifikovaného postupu vychádzajúceho 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 [71]).



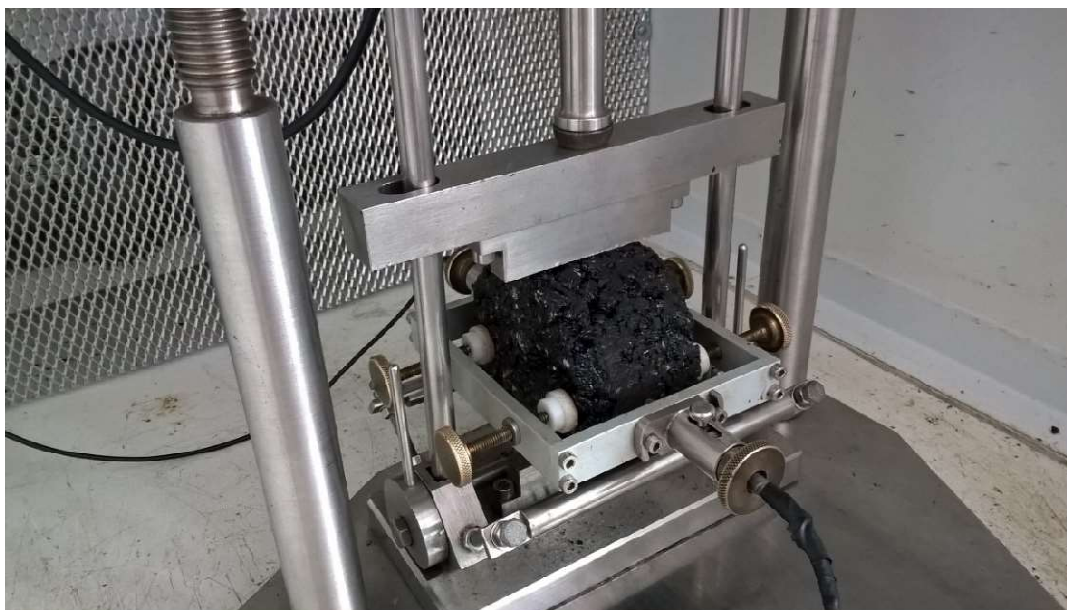
Obrázok 28: Skúšobné čeluste v priebehu skúšky stanovenia pevnosti v priečnom ťahu.

#### 4.1.3 Tuhosť

Skúška bola realizovaná v súlade s normou ČSN EN 12697-26:2019. Moduly tuhosti boli stanovené skúškou v priečnom ťahu na valcových telesách (Příloha C). Pre lepšie porovnanie modulov tuhosti v rôznych podmienkach boli merané pri teplotách 0 °C, 15 °C a 27 °C. Vybrané zmesi boli testované aj pri teplote 40 °C. Pred samotným skúšaním bolo potrebné nechať telesá vytemperovať na požadovanú teplotu, a to najmenej po dobu 4 hodín.

Dynamický modul tuhosti zmesí ACP 16+ bol testovaný podľa ČSN EN 12697-26:2019 (4PB-PR) na trámikoch vyrobených z dosiek rozmerov 405x305x50 mm zhutnených segmentovým zhutňovačom podľa [67].





Obrázok 29: Zariadenie pre meranie modulu tuhosti metódou IT-CY.

#### 4.1.4 Odolnosť voči šíreniu trhlín

Tento test bol vykonaný podľa ČSN EN 12697-44 na polválcových telesách (SCB). Výstužné vlákna by mali okrem zvýšenia tuhosti taktiež prispievať k zvýšeniu odolnosti voči trhlinám. Tento efekt sa podľa ČSN EN 12697-44 nedá úplne vyhodnotiť, keďže k stanoveniu hodnotiaceho parametru - kritickej hodnote lomovej húževnatosti, je potrebné zaznamenať maximálnu dosiahnutú silu a deformáciu. Norma však nereflektuje, čo sa deje s telesom po tomto bode. Pre úplné vyhodnotenie výsledkov je teda potrebné vykonávať skúšku spolu so zariadením pre kontinuálne zaznamenávanie dát, vybaveného záznamníkom dát a snímačmi deformácie a sily.

Štandardný postup bol upravený na základe dlhoročných skúseností v Cestnom laboratóriu na ČVUT v Prahe. Skúšobné telesá sú zhutnené Marshallovým zhutňovačom bez použitia gyrátoru. Ich priemer je  $101 \pm 1$  mm a nie  $150 \pm 1$  mm, ako je definované v norme. Z dôvodu výpočtu lomovej energie ( $G$  alebo  $G_f$ ) sa rýchlosť zaťaženia znížila z 5,0 mm/min (ako je definované v norme) na 2,5 mm/min. Nižšia rýchlosť zaťaženia umožňuje zachytiť viac údajov o jednom bode, z ktorých je možné presnejšie zobrazit' krivku zaťaženia a pretvorenia. Celková lomová energia počas testu bola vypočítaná, kým hodnota zaťažovacej sily neklesla na 0,30 kN na klesajúcej vetve krivky. Pre lepšie pochopenie potenciálu šírenia trhlín asfaltových zmesí obsahujúcich vlákna boli zvolené vždy dve testované teploty. Lomová energia bola vypočítaná ako podiel plochy pod krivkou sila-pretvorenie a plochy efektívneho



prierezu telesa v mieste vypílenej drážky (výška drážky bola 10 mm). Detailnejší popis skúšky a problematiky obsahuje dizertačná práca Ing. Pavly Vackovej, Ph.D. [72]

Zvyčajne vykazujú výsledky kalkulácie lomovej energie veľké smerodajné odchýlky. Príčinou môže byť malý priemer použitých skúšobných telies (101,5 mm). Významným faktorom je aj ich samotná príprava - rezanie telies, pri ktorom pomerne jednoducho vzniknú rozmerové disproporcie, či dokonca môže dôjsť k vyľúpnutiu zŕn kameniva z telesa. V konečnom dôsledku ide smerodajnú odchýlku znížiť zvýšením počtu testovaných telies. Pokiaľ neboli z testu nejaké telesá vyradené na základe normových požiadaviek, boli výsledky odolnosti voči šíreniu trhlin stanovené vždy na 6 polválcových telesách.



Obrázok 30: Konfigurácia testu odolnosti voči trhlinám.

#### 4.1.5 Odolnosť proti trvalým deformáciám - skúška vyjazd'ovania kolesom

Postup prebiehal v súlade s normou [72] v malom skúšobnom zariadení, pri teplote 50 °C. Výsledkom tejto skúšky boli hĺbka koľaje po 10 000 cykloch, pomerná hĺbka vyjazdenej koľaje v % ( $PRD_{AIR}$ ) a prírastok hĺbky vyjazdenej koľaje v  $mm/10^3$  zaťažovacích cyklov ( $WTS_{AIR}$ ). Pre tento test boli vyrobené dosky 320x260 mm, s hrúbkou 40 mm v prípade zmesí SMA a hrúbkami 50 mm a 60 mm pre zmesi typu ACL. Zmesi ACP s obsahom RA tento test nepodstúpili.



Obrázok 31: Malé skúšobné zariadenie pre skúšku vyjazďovania kolesom.

#### 4.1.6 Pevnosť v ťahu za ohybu

Pevnosť v ťahu za ohybu bola skúšaná postupom uvedeným v prílohe technických podmienok TP 151. Skúška je vykonávaná trojbodovým ohybom na trámikových skúšobných telesách. Ako skúšobná teplota bola v prípade posudzovaných asfaltových zmesí zvolená hodnota 0 °C a zaťažovacia rýchlosť 1,25 mm/min, ktorá je požadovaná technickými podmienkami. Navyše bola rovnako ako v prípade skúšky odolnosti voči šírenie mrazovej trhliny doplnený rad skúšobných parametrov o energiu testu (E) stanovenú do dosiahnutia maximálnej sily (pevnosti v ťahu za ohybu). U trámikových telies už odťažovacia časť nie je započítavaná.

Trámikové skúšobné telesá boli rozdelené do dvoch skupín, kedy jedna skupina telies bola opäť vystavená laboratórnemu starnutiu podľa prEN 12697-52 (uloženie po dobu 5 dní v klimatekovej komore pri 85 °C). Zostarnuté telesá boli označené ako (A), nezostarnuté dostali označenie (NA).

## 4.2 Obrusná vrstva – SMA 11S PMB 45/80-65

Logickým začiatkom bolo preverenie funkcie výstužných vlákien na rastlinnej báze v typu zmesi, v ktorom sa vlákna už štandardne používajú. Výskum teda začal na vrchu súvrstvia vozovky, v obrusnej vrstve. Voľba padla na zmes SMA 11 S s polymérom modifikovaným spojivom 45/80-65, v súlade s ČSN 736121 a ČSN EN 13108-5:2016. Základ receptúry tvorilo kamenivo z lomu Zbraslav, doplnené o frakciu 0/4 z lomu Lašovice. Filer bol použitý štandardný, jemne mletý vápenec.



Tabuľka 4: Receptúra zmesi SMA 11 S

SMA 11S PMB 45/80-65		Okrem základného obsahu vlákien 0,3 % z hmotnosti zmesi boli zvolené ďalšie dve úrovne obsahu vlákien: 0,1 % a 0,6 %. Receptúra bola prispôsobená v závislosti od obsahu vlákien plynulou zmenou množstva jednotlivých frakcií kameniva. Množstvo spojiva bolo vždy 6,4 % hm. Teplota výroby a hutnenia zmesi, či skúšobných telies bola 160 °C, čím došlo k vyššej teplotnej záťaži vlákien. Hlavným cieľom bolo ukázať vplyv množstva vlákien v zmesi. Vyšší, či naopak nižší obsah by si pre správne fungujúci návrh vyžadoval úpravu množstva spojiva. Tým by však došlo k vymazaniu časti skúmaných fenoménov.
8/11 Zbraslav	41,5 %	
4/8 Zbraslav	18,6 %	
0/4 Zbraslav	14,0 %	
0/4 Lašovice	14,0 %	
JMV (filer)	5,5 %	
45/80-65	6,4 %	
S-Cell/vlákná	0,3 %	
100,3 %		

Ako výstužné prvky (elementy) boli zvolené tri druhy rastlinných priadzí: **ľanová priadza** s jemnosťou 500 g/km (označená ako **L500**), **ľanová priadza** 105x4 g/km (**L105x4**) a **konopná priadza** 100x3 g/km (**K100x3**). Násobok znamená priadzu zloženú z viacerých nití. Tie boli nastrihané na požadovanú priemernú dĺžku 20 mm s odchýlkou 5 mm. Strihanie prebiehalo na ručnej rezačke papiera, takže nebolo možné zaistiť presnejšie tolerancie dĺžky elementov. Vlákna boli do zmesi pridávané spolu so spojivom alebo až po zamiešaní spojiva. Vlákna pri miešaní zmesi obalí asfaltové spojivo a vďaka nemu nedochádza k ich agregácii v zmesi. Je teda dôležité ich dôsledné obalenie spojivom aby došlo k najlepšej homogenizácii. Pri vyššom množstve elementov priadzí však dochádzalo k ich nadmernému zachytávaniu okolo lopatiek laboratórnej miešačky a zmes musela byť domiešaná ručne alebo absolvovať ďalší miešací cyklus (180 s). Ako referenčné vlákna boli zvolené štandardne používané celulózoové vlákna vo forme peletiek (S-Cell 7G®), ktorých primárnym zdrojom je recyklovaný papier.



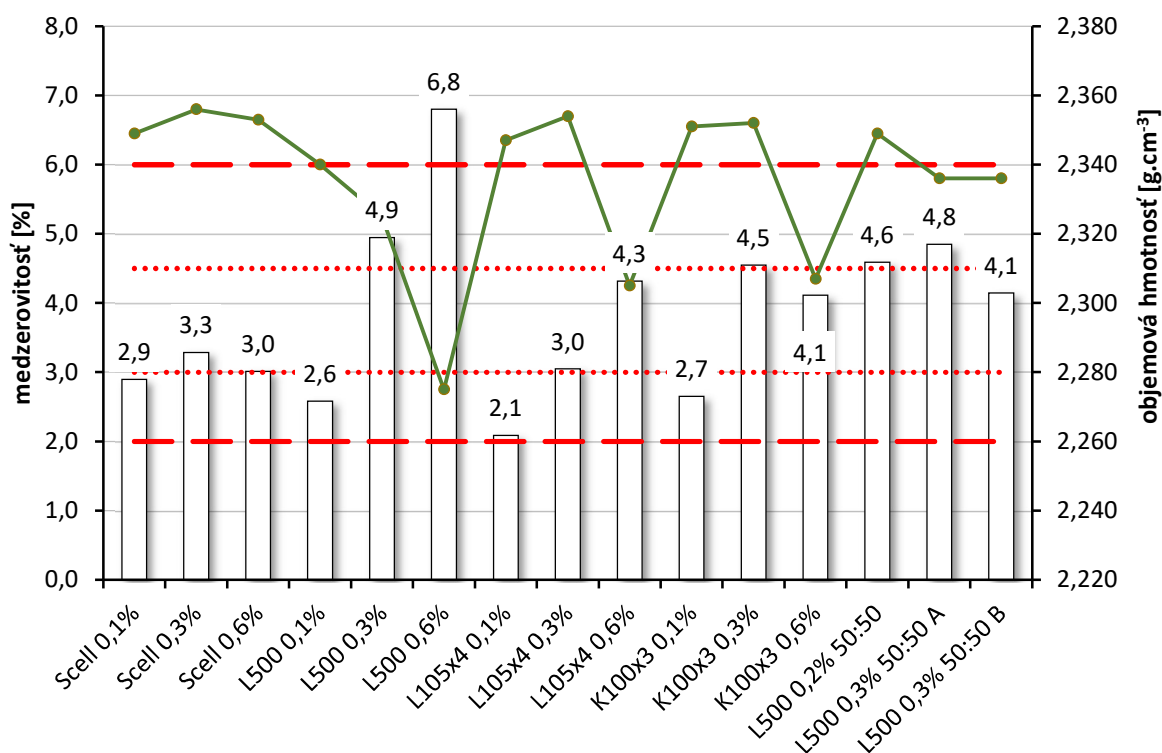
Obrázok 32: Ukážka strihania priadzí na výstužné prvky.



V prvej fáze výskumu bolo vyrobených 12 zmesí pre ukázanie efektu obsahu vlákien v asfaltovej zmesi. Potom boli vyrobené ešte tri zmesi pre experimentovanie s dĺžkou elementov. V dvoch prípadoch bola použitá kombinácia dĺžok 10 mm a 20 mm, s rovnomerným pomerom dĺžok v zmesi vlákien (50:50). Obsah vlákien v zmesi bol 0,2 % hm. a 0,3 % hm. Posledná zmes, označená ako 50:50 B, mala obsah vlákien 0,3 % hm. a rovnomerný pomer dĺžok 5 mm a 10 mm.

#### 4.2.1 Objemová hmotnosť a medzerovitosť

Limity medzerovitosti odpovedajú ČSN 736121:2019. Vyrovnané hodnoty medzerovitosti dosiahli zmesi so štandardnými celulóзовými vláknami. Je to spôsobené povahou týchto vlákien, kedy ich malé rozmery dovoľujú najlepšie obalenie spojivom a ani 0,6 % hm. vlákien nestačilo na zvýšenie medzerovitosti. Zdanlivo to podporuje aj nižšia medzerovitosť zmesi L500 0,3% 50:50 B. Z výsledkov je zreteľný trend zvyšovania medzerovitosti v zmesiach s rastlinnými priadzami. Anomáliu tvorí len zmes s konopnými vláknami a najvyšším obsahom vlákien.



Obrázok 33: Objemová hmotnosť (zelená čiara) s medzerovitosťou (biele stĺpce) zmesi SMA 11 S. Červené bodkované čiary vymedzujú limity pre skúšky typu, čiarkované pre kontrolné skúšky.

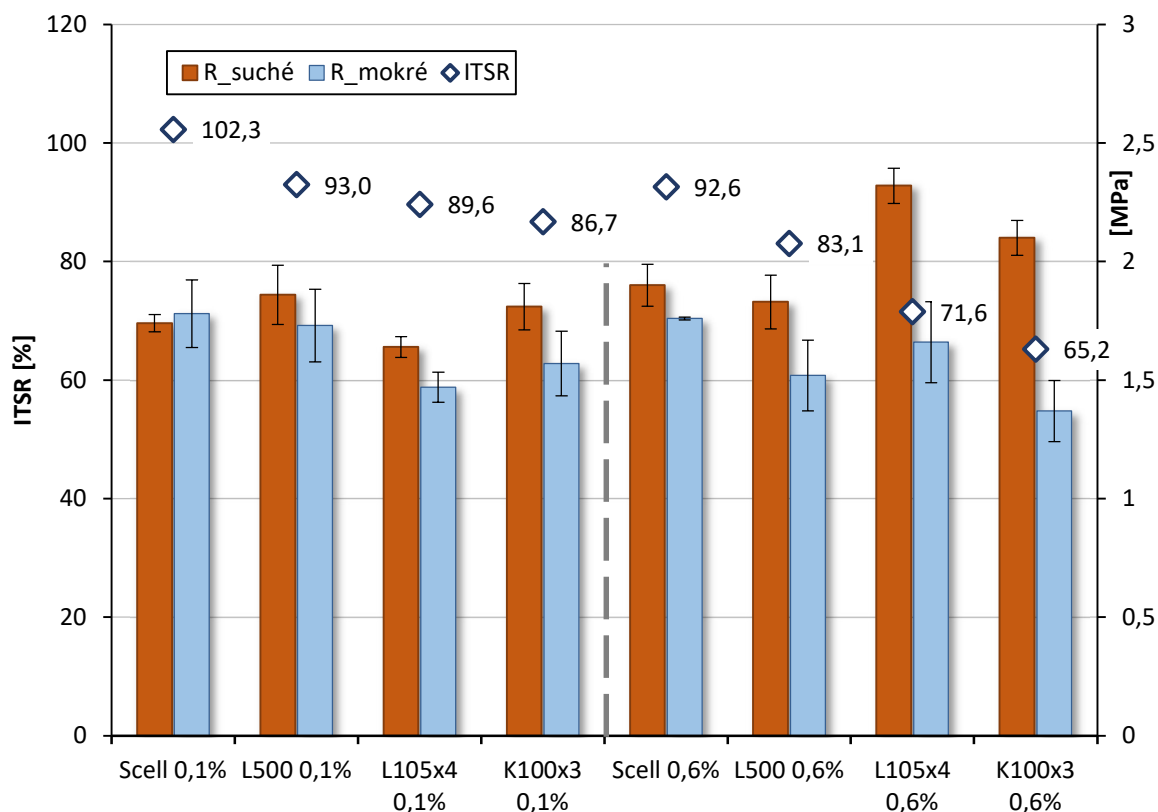


Zmes s ľanovou priadzou L500 a obsahom vlákien 0,6 % hm. ako jediná nesplnila ani limity pre kontrolné skúšky. Tento materiál subjektívne vykazoval po zamiešaní do asfaltovej zmesi najvyššiu mieru absorpcie spojiva. Mierne zníženie obsahu vlákien v zmesi viedlo k miernemu poklesu medzerovitosti v prípade zmesi L500 0,2% 50:50. Objemová hmotnosť skúšobných telies testovaných zmesí bola väčšinou vyrovnaná. Najväčší pokles bol zaznamenaný pri ľanovej priadzi L500 a v zmesiach s priadzami a ich obsahom v zmesi 0,6 % hm. Výsledky však ukázali, že pokles medzerovitosti pri zmesi L500 0,3% 50:50 B bol spôsobený nižšou hodnotou maximálnej objemovej hmotnosti. Objemová hmotnosť skúšobných telies bola v skutočnosti navlas rovnaká.

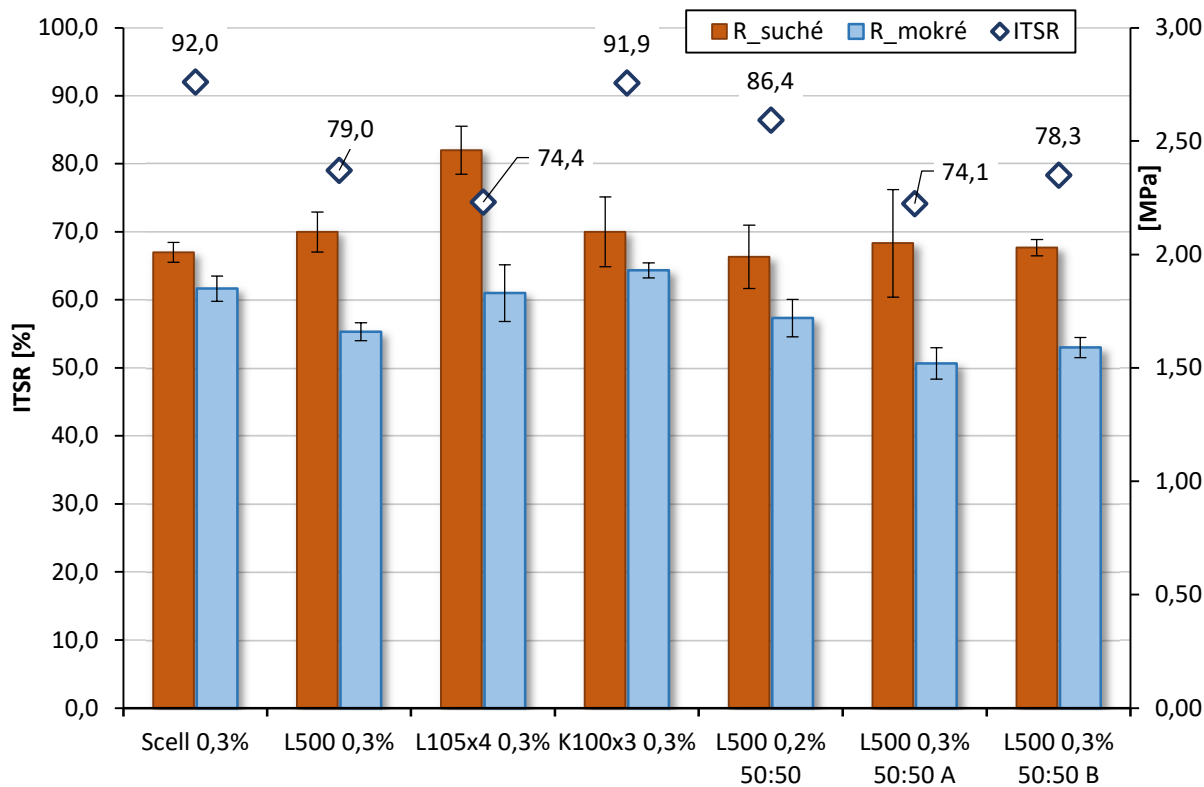
#### **4.2.2 Citlivosť voči účinkom vody**

Výsledky ukázali zreteľný a očakávaný pokles hodnoty ITSR pri zmesiach s rastlinnými priadzami. V zásade najnižšie hodnoty dosiahli zmesi s najvyšším obsahom priadzí. Naopak, zmesi s referenčnými celulózovými vláknami dosiahli vyrovnané hodnoty vo všetkých prípadoch. Zhruba 10 až 20-krát dlhšie rastlinné vlákna majú oveľa vyšší potenciál viesť vodu do vnútra skúšobných telies. 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 – kamenivo; matrica – vlákno). Na druhú stranu bol zaznamenaný nárast pevnosti v priečnom ťahu, ktorý v niektorých prípadoch kompenzoval stratu pevnosti za mokra. Najlepší výsledok ITSR zo zmesí s priadzami dosiahla zmes L500 0,1%, nasledovaná zmesou K100x3 0,3%. Kombinácia dĺžok vlákien v zmesiach L500 0,3% 50:50 viedla k miernemu poklesu ITSR a pevnosti v priečnom ťahu oproti základnej zmesi L500 0,3%. Zníženie obsahu vlákien na 0,2 % prinieslo zvýšenie hodnoty ITSR. Pevnosť za sucha však bola znížená.

K zníženiu pevnosti v priečnom ťahu u zmesí s rastlinnými vláknami môže prispievať okrem zníženia adhézie na rozhraní aj nárast pomerného pretvorenia týchto materiálov za mokra.



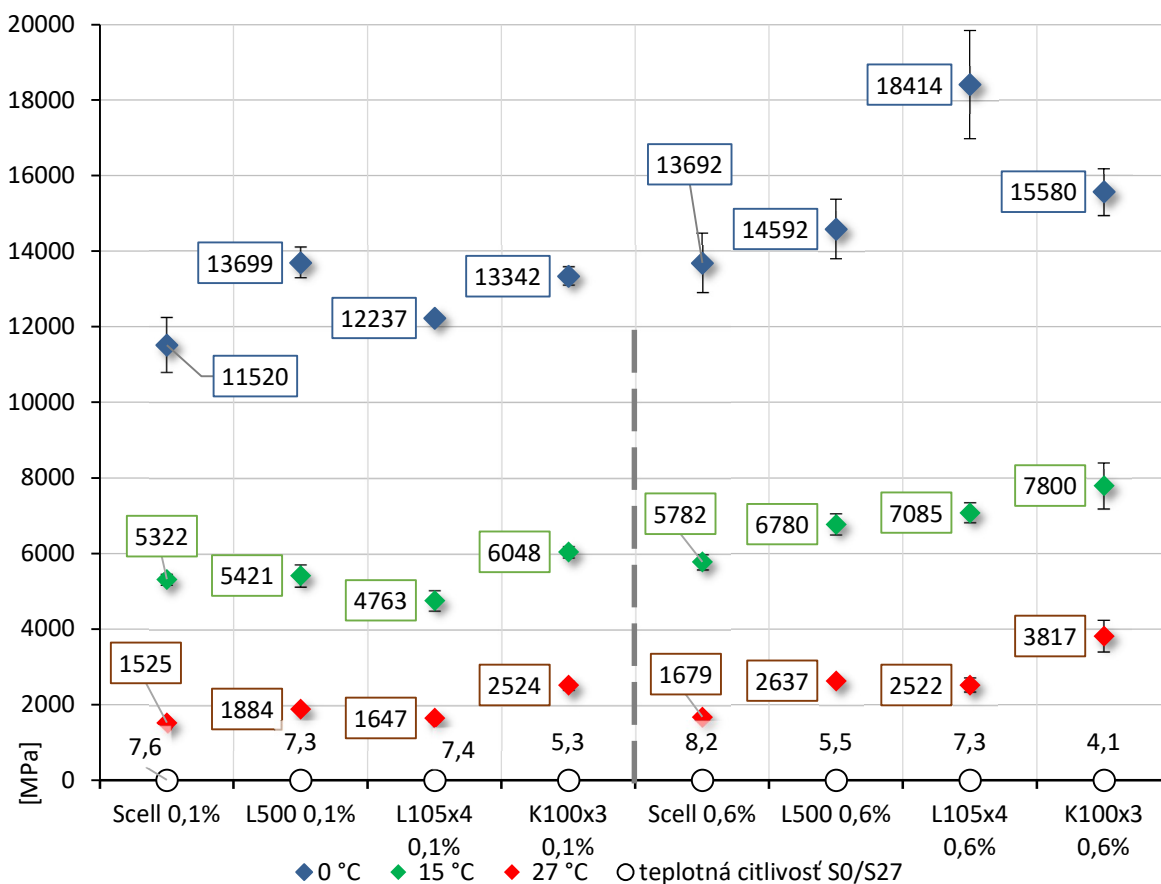
Obrázok 34: ITSR a pevnosť v priečnom ťahu zmesí SMA 11 S s 0,1% a 0,6% obsahom vláken.



Obrázok 35: ITSR a pevnosť v priečnom ťahu zmesí SMA 11 S s 0,3% obsahom vláken.



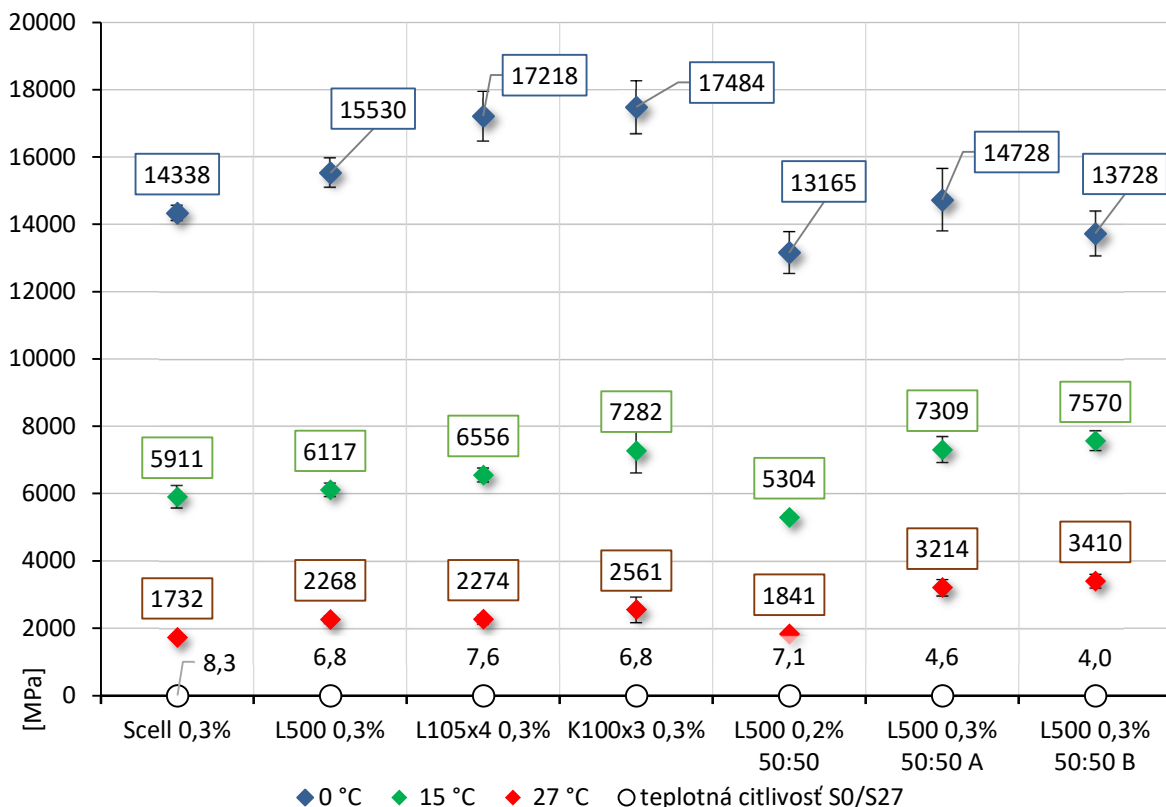
### 4.2.3 Tuhosť



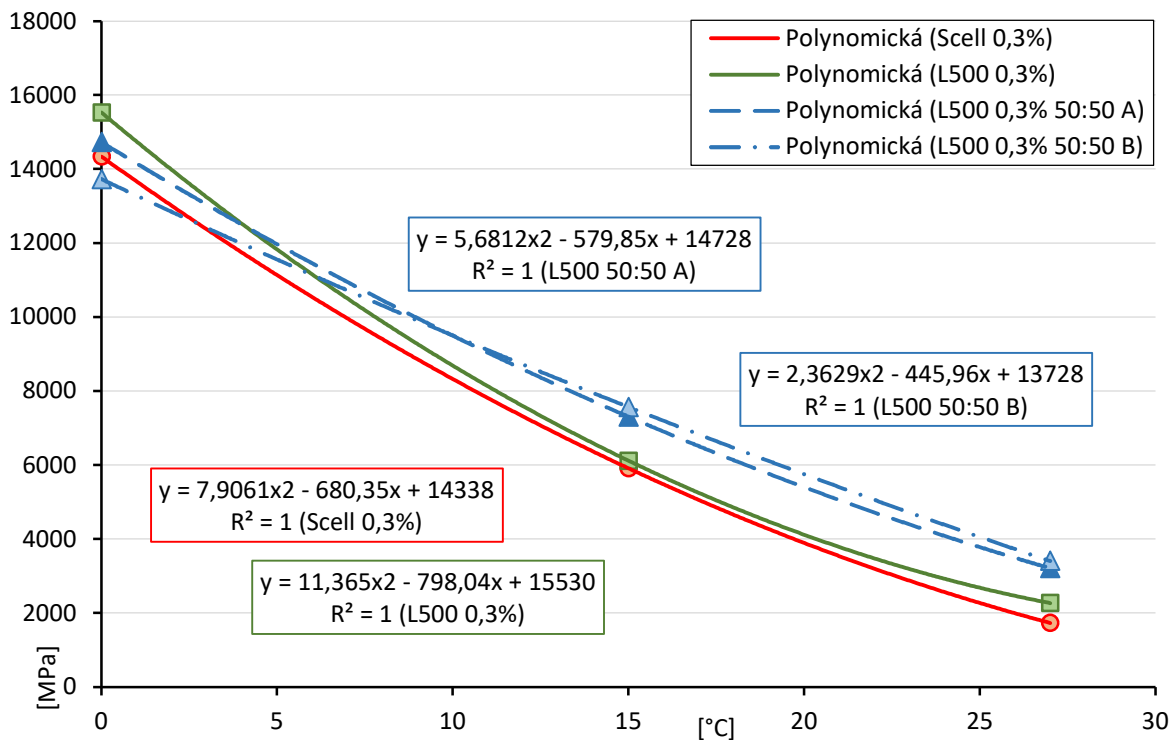
Obrázok 36: Moduly tuhosti zmesí SMA 11 S 0,1% a 0,6% pri 0 °C, 15 °C a 27 °C.

Pri základných zmesiach s rastlinnými priadzami bol, až na zmes L105x4 0,1% (15 °C), 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 trhlin žiadúci nárast minimálny, v ideálnom prípade by mala zmes vykázať pokles jej tuhosti. To sa podarilo dosiahnuť pri zmesiach s pomerom rôznych dĺžok vlákien. Z tohto pohľadu dopadla najlepšie zmes L500 0,3% 50:50 B, ktorá dosiahla aj najnižšiu hodnotu teplotnej citlivosti. Tento parameter je vypočítaný ako pomer modulu tuhosti pri 0 °C k hodnote dosiahnutej pri 27 °C. Z výsledkov vyplýva, že všetky zmesi s rastlinnými priadzami majú nižšie hodnoty teplotnej citlivosti v porovnaní s referenčnými zmesami (Scell). Grafickú ilustráciu poskytuje Obrázok 38, ukazujúci zníženie uhlu medzi krivkou modulu tuhosti v závislosti na teplote a (vodorovnou) osou teploty. Aproximačné krivky slúžia len na ilustráciu daného teplotného rozsahu.





Obrázok 37: Moduly tuhosti zmesí SMA 11 S 0,1% a 0,6% pri 0 °C, 15 °C a 27 °C.

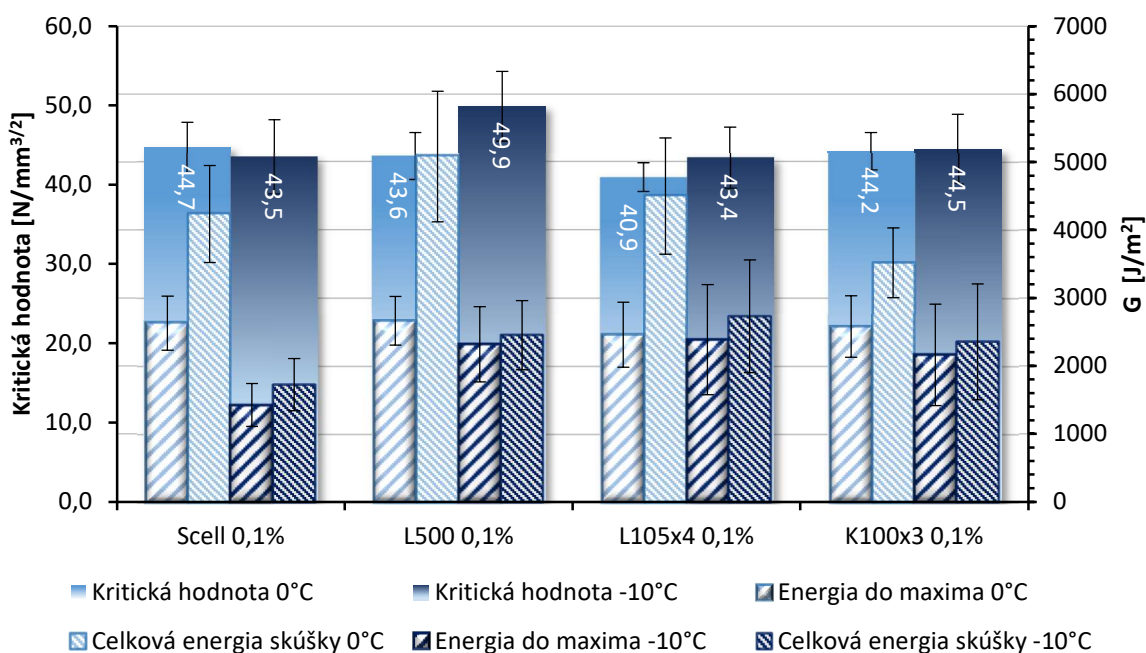


Obrázok 38: Krivky modulu tuhosti v závislosti na teplote vybraných zmesí SMA 11 S.



#### 4.2.4 Odolnosť voči šíreniu trhlín

Skúška bola vykonaná pri teplotách 0 °C a -10 °C, ktoré boli zvolené s ohľadom na riziko vzniku mrazových trhlín v obrusnej vrstve. Pri obsahu vlákien 0,1 % boli hodnoty lomovej húževnatosti vyrovnané, jedine pri zmesi L500 0,1% a teplote 0 °C bol zaznamenaný nárast. Vyrovnaný trend podporujú pri teplote 0 °C aj dosiahnuté lomové energie do maximálnej sily ( $G_f$ \_Fmax). Netýka sa to však teploty -10 °C a referenčnej zmesi Scell 0,1%, pri ktorej boli zaznamenané výrazne nižšie hodnoty oboch znázornených lomových energií (do maximálnej sily a celkovej lomovej energie). Pri takto nízkej teplote sa minimalizoval rozdiel medzi energiou do maximálnej sily a celkovou energiou skúšky. Nízka teplota znamená zvýšenie tuhosti a krehkosti spojiva, čo spolu s nízkym obsahom vystužujúcich prvkov vedie ku krehkému lomu.

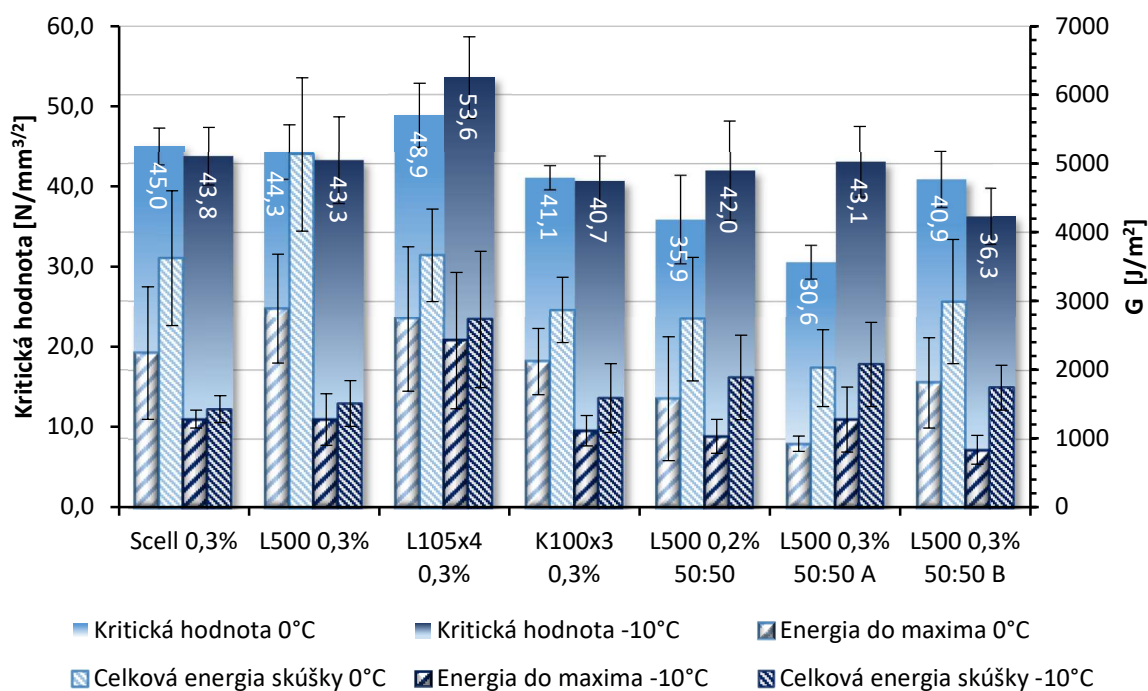


Obrázok 39: Odolnosť voči šíreniu trhlín zmesí SMA 11 S s 0,1 % vlákien.

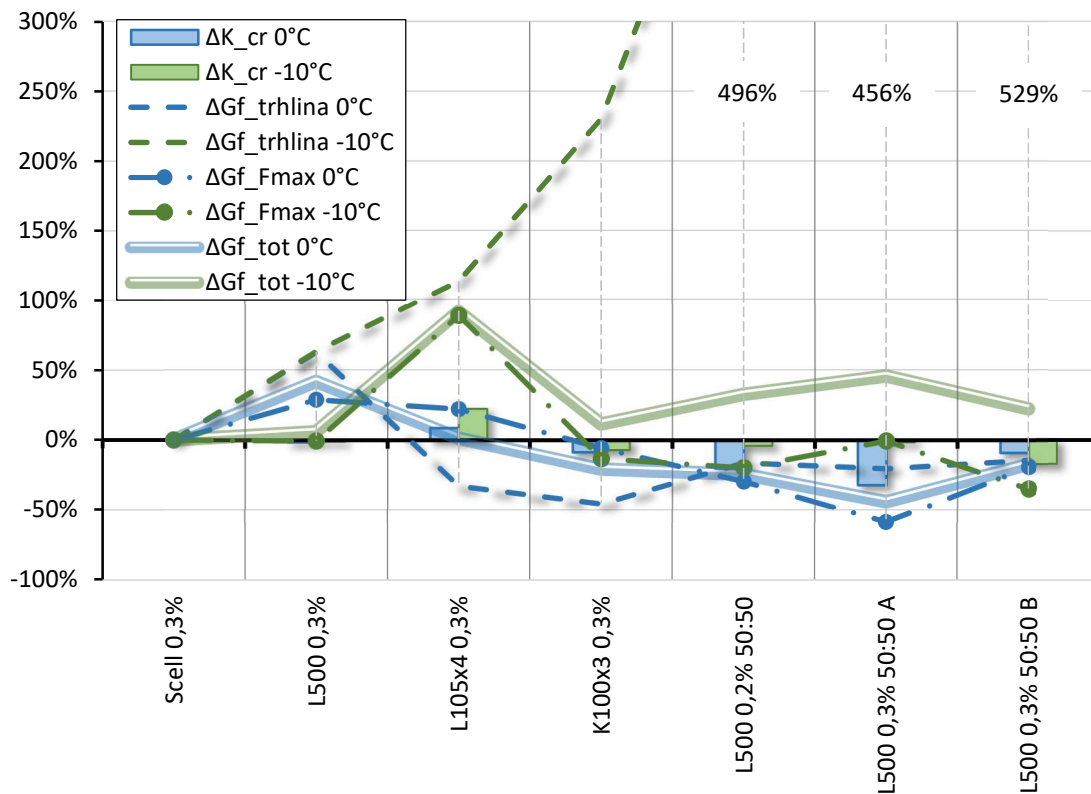
Na druhú stranu, pri porovnaní absolútnych hodnôt lomových energií naprieč obsahom vlákien v zmesiach dosiahli zmesi s 0,1 % vlákien jedny z najvyšších hodnôt. Zvýšenie obsahu vlákien na 0,3 % hm. viedlo v prípade zmesi L105x4 0,3% k zlepšeniu sledovaných charakteristík. Pri teplote -10 °C bol u nej zaznamenaný výrazný nárast lomovej energie oproti referenčnej zmesi. Tento zvláštny efekt sa v menšej miere objavil pri všetkých zmesiach s obsahom elementov priadzí 0,1 %. Okrem zmesi L105x4 0,3% však bola



zaznamenaná stagnácia alebo zhoršenie sledovaných charakteristík. Pri vyššom obsahu vláken (0,3 % hm.) sa však výraznejšie prejavil ich výstužný efekt po iniciácii trhliny.



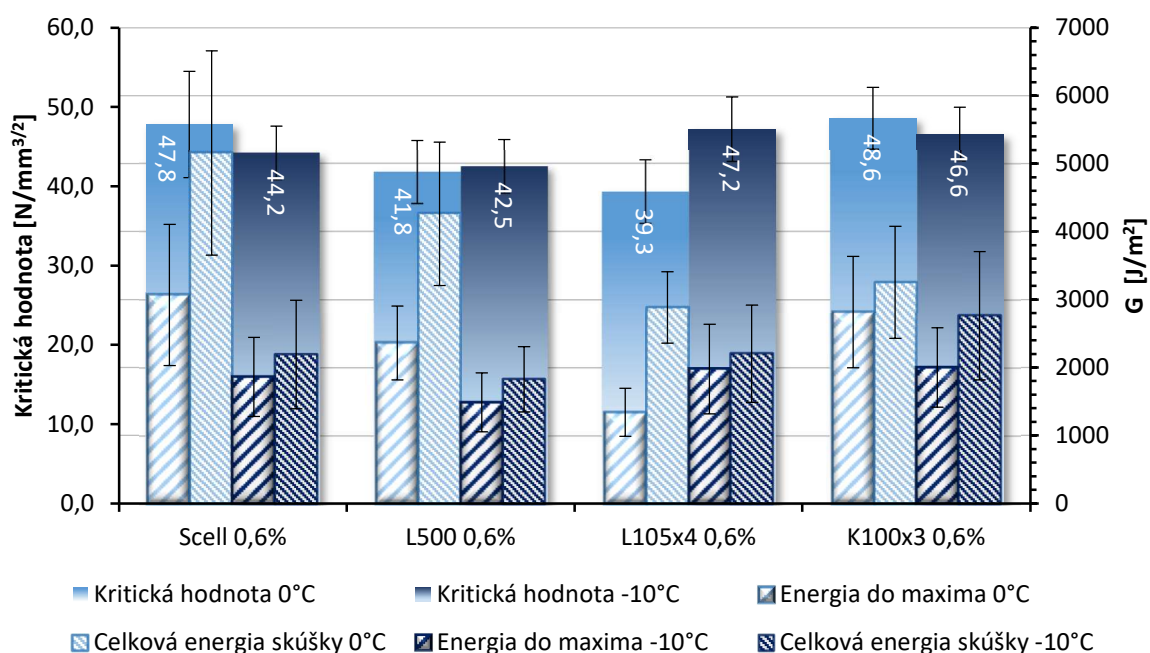
Obrázok 40: Odolnosť voči šíreniu trhlín zmesí SMA 11 S s 0,2 % a 0,3 % vláken.



Obrázok 41: Percentuálne rozdiely lomových parametrov zmesí SMA od referenčnej (Scell 0,3%).



Zmesi s pomerom vlákien 50:50 dosiahli jedny z najnižších hodnôt sledovaných parametrov. Zaujímavým je byť fakt, že aj napriek tomu dosiahli suverénne najvyššie hodnoty prírastku lomovej energie trhliny ( $\Delta Gf_{trhlina}$ ) pri  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ , ktorá bola počítaná ako rozdiel medzi celkovou energiou a energiou do maximálnej sily. Okrem toho dosiahli aj zvýšenie celkovej energie skúšky pri  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$  ( $\Delta Gf_{tot}$ ), hneď po zmesi L105x4 0,3%, ktorá bola vyhodnotená ako jedna z najlepších zmesí z hľadiska lomových charakteristík. Medzi najlepšie by mohli patriť aj zmesi Scell 0,6% a K100x3 0,6%. Prekvapením je nízka hodnota celkovej energie testu pri  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  druhej menovanej. Zvyšné dve zmesi s najvyšším obsahom vlákien dosiahli nižšie hodnoty sledovaných charakteristík. Ako už bolo spomenuté, vysoké a vyrovnané hodnoty lomových charakteristík dosiahli aj zmesi s obsahom vlákien 0,1 %. Pri týchto zmesiach je však na mieste otázka zvýšenia stekania asfaltového spojiva.



Obrázok 42: Odolnosť voči šíreniu trhlín zmesí SMA 11 S s 0,6 % vlákien.

#### 4.2.5 Odolnosť proti trvalým deformáciám

Skúška vyjazďovania kolesom ukázala vyrovnanosť výsledkov všetkých testovaných zmesí. Všetky vyrobené dosky sa podarilo vyrobiť s trochu zvýšenou mierou zhutnenia, avšak tento nárast bol približne rovnaký u všetkých zmesí. Dá sa povedať, že najhoršie výsledky dosiahla referenčná zmes Scell 0,3%. Rozdiel oproti ostatným zmesiam je však minimálny. Pri pohľade na normou (ČSN 736121) stanovené požiadavky maximálnych hodnôt parametrov pomernej



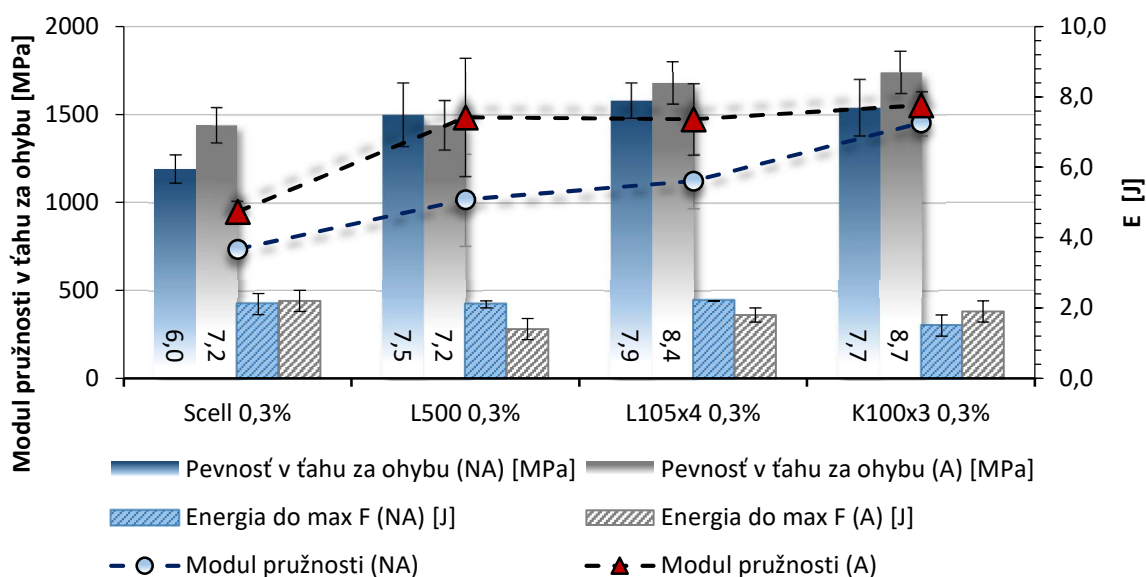
hĺbky koľaje (max.  $PRD_{AIR} = 0,07 \text{ mm}/10^3 \text{ cykl}$ ) a prírastku hĺbky koľaje (max.  $WTS_{AIR} = 5 \%$ ) možno konštatovať, že všetky zmesi ukázali výbornú odolnosť proti trvalým deformáciám.

**Tabuľka 5: Výsledky testu trvalých deformácií zmesí SMA 11 S a obsahom vlákien 0,3 %**

zmes	hrúbka [mm]	objemová hmotnosť [g.cm <sup>-3</sup> ]	miera zhutnenia [%]	priem. hl. koľaje po 10 000 cykl. [mm]	WTS <sub>AIR</sub> [mm/10 <sup>3</sup> cykl]	PRD <sub>AIR</sub> [%]
Scell 0,3%	40,51	2,377	100,9	1,12	0,018	2,5
L500 0,3%	41,20	2,336	100,5	1,08	0,021	2,4
L105x4 0,3%	40,49	2,374	100,8	1,06	0,018	2,4
K100x3 0,3%	40,93	2,358	100,8	1,08	0,016	2,4

#### 4.2.6 Pevnosť v ťahu za ohybu

Predpokladaný výstužný efekt priadzí sa výrazne prejavil pri testovaní trojbodového ohybu trámikových telies. Tieto zmesi zaznamenali nárast pevnosti v ťahu za ohybu a modulu pružnosti. Hodnoty energie do maximálnej sily (Energia do max F) boli však pri nezostarnutých telesách vyrovnané. Pokles bol zaznamenaný u zmesi K100x3 0,3%. Na zostarnutých telesách bola najvyššia hodnota energie vypočítaná pri referenčnej zmesi Scell 0,3%. Ako najmenej náchylná na starnutie sa ukázala zmes K100x3 0,3%, pri ktorej bol najmenší nárast modulu pružnosti po starnutí. Všetky zmesi s rastlinnými vláknami dosiahli po starnutí veľmi podobné hodnoty modulu pružnosti.



**Obrázok 43: Parametre testu pevnosti v ťahu za ohybu zmesí SMA 11 S a 0,3 % vlákien.**



#### 4.2.7 Stekavosť spojiva

Kedže 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. Táto skúška bola vykonaná podľa normy ČSN EN 12697-30+A1.

Priemerná stekavosť spojiva zmesi L500 0,3% dosiahla hodnotu  $D = 0,08 \%$ , pri zmesi K100x3 0,3% bola  $D = 0,07 \%$ . Referenčná zmes Scell 0,3% mala stekavosť  $D = 0,08 \%$ . Všetky testované zmesi teda dosiahli veľmi nízke hodnoty stekavosti asfaltového spojiva  $D < 0,1 \%$ .

#### 4.3 Ložná vrstva – ACL 16+ 50/70

Po obrusnej vrstve prešla pozornosť nižšie. Ďalšou v poradí bola teda vrstva ložná. Pre ňu je dôležitá dostatočná tuhosť, dobrá odolnosť voči účinkom vody (a mrazu) a čo najlepšia odolnosť proti trvalým deformáciám. Pre overenie účinku vlákien v ložnej vrstve bola zvolená zmes ACL 16+ s cestným spojivom 50/70. V *Tabuľke 6* je uvedená jej receptúra. Vyznačuje sa nízkym obsahom spojiva, ktoré je na spodnej hranici normových požiadaviek (ČSN 736121).

**Tabuľka 6: Receptúra zmesi ACL 16+**

ACL 16+ 50/70		Základné kamenivo opäť pochádzalo z lomu Zbraslav, doplnené o frakciu z lomu Lašovice a filer z jemne mletého vápenca. Teplota miešania a hutnenia bola vďaka cestnému spojivu len $150 \text{ }^\circ\text{C}$ . Ako výstužné prvky (elementy) boli zvolené dva druhy rastlinných priadzí: ľanová priadza s jemnosťou $500 \text{ g/km}$ (označená ako L) a jutová priadza $300 \text{ g/km}$ (označená ako J). Obsah vlákien bol $0,2 \%$ hmotnosti zmesi. Pre porovnanie výsledkov bola vyrobená identická referenčná zmes bez obsahu
11/16 Zbraslav	27,6 %	
8/11 Zbraslav	11,3 %	
4/8 Zbraslav	14,9 %	
0/4 Zbraslav	18,8 %	
0/4 Lašovice	18,8 %	
JMV (filer)	4,4 %	
50/70	4,2 %	
vlákna	0,3 %	
	100,3 %	



jednotlivých výstužných prvkov v zmesi a k redukcii ich priemeru. Zároveň by sa obmedzil výskyt elementov s jadrom bez spojiva (Obrázok 45). Pre zaujímavosť boli vyrobené taktiež telesá zmesi s ľanovými vláknami dĺžky 40 mm zhutnené vyššou hutniacou energiou (2x75 úderov, označenie L4\_02 2x75) a zmes s obsahom asfaltového spojiva 4,4 % (L4\_4,4%). Posledná menovaná absolvovala 1 miešací cyklus.



**Obrázok 44: Elementy priadze dĺžky 20 mm (vľavo) a jednotlivé vlákna po rozpade prierezu.**

V **druhej fáze** bol sledovaný vplyv obsahu **jutových** vlákien a ich chemického ošetrovania. Obsah vlákien bol 0,1 %, 0,2 % a 0,3 %. Pri výrobe zmesi s 0,3 % vlákien muselo byť odstránených cca 5 % z ich hmotnosti z dôvodu ich agregácie okolo koreňa lopatiek miešačky. Účinky chemického ošetrenia boli preverované na zmesiach s obsahom vlákien 0,2 %. Dĺžka výstužných elementov bola vo všetkých prípadoch 20 mm. Bola zvolená s ohľadom na čo najlepšiu homogenizáciu zmesi. Pri zamiešaní už neboli vo forme priadzí. Tá poslúžila len pri jej strihaní na jednotlivé elementy, ktoré boli potom ponorené do vody na min. 4 hodiny. Počas nich došlo k občasnému premiešaniu roztoku a k následnému rozpadu prierezu priadze na elementárne vlákna. Nasledovalo ich žmýkanie a sušenie v sušiarňi s nútenou cirkuláciou vzduchu pri teplote 50 °C po dobu aspoň 12 hodín, počas ktorých boli obracané tak, aby došlo k ich rovnomernému a efektívnemu vysušeniu.

Pre úplnú korektnosť a lepšie porovnanie výsledkov bola vyrobená druhá referenčná zmes bez prísad, zmes s polymérom modifikovaným spojivom PMB 25/55-60 a ďalšie skúšobné telesá zmesi s vláknami FORTA®. Po návšteve konferencie Asfaltové vozovky 2019 a konzultácii s Ing. Zedníčkom, vtedajším obchodným zástupcom distribútora tejto prísady, totiž došlo k získaniu poznatku, že pri maloobjemovej výrobe zmesi s touto prísadou nedochádza vždy k žiadaným efektom vystuženia zmesi. Pri výrobe skúšobných dosiek tak došlo k navýšeniu hmotnosti zámesi a k odobraní jej časti pre hutnenie Marshallových



telies. Zmes označená ako FORTA je vyrobená v prvej fáze, označenie FORTA\_avg. značí priemerné hodnoty z oboch vyrobených zmesí.

Chemické ošetrenie vlákien bolo zamerané na hydrofobizáciu a vplyv mercerizácie vlákien. Zmes J2\_1% NaOH obsahovala jutové vlákna ošetrené 1% roztokom NaOH po dobu 24 hodín. Ďalšie dve zmesi obsahovali vlákna ošetrené 2% roztokom NaOH po dobu 2 hodín. Zmes 2%NaOH+CuSO<sub>4</sub> s vláknami s finálnou úpravou 20% roztokom skalice modrej (CuSO<sub>4</sub>.5H<sub>2</sub>O) pre zamedzenie biologického napadnutia vlákien (podľa [73]) a zmes J2\_2%NaOH+HF s hydrofobizovaným povrchom prísadou pre betónové povrchy od firmy Nanosystem s.r.o., bližšie popísanou v kapitole 3.3.1. Posledná zmes s chemicky ošetrenými vláknami obsahovala vlákna ošetrené len hydrofobizačnou prísadou.

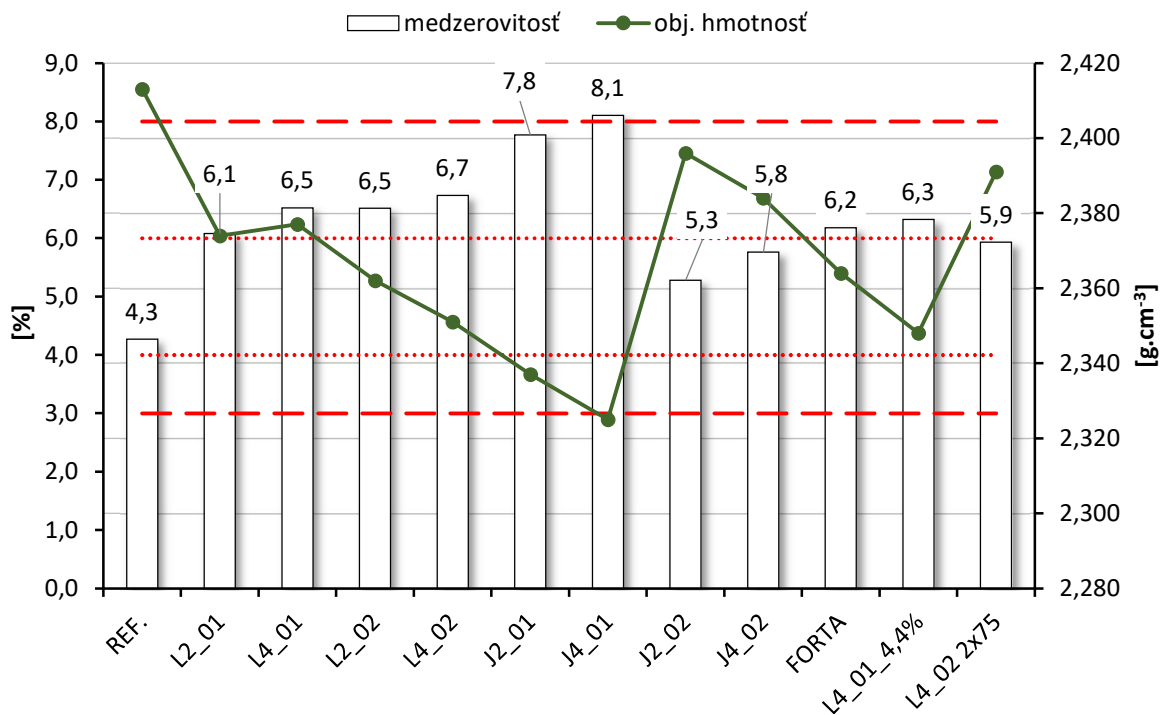


Obrázok 45: Detail elementu ľanovej priadze po jednom miešacom cykle.

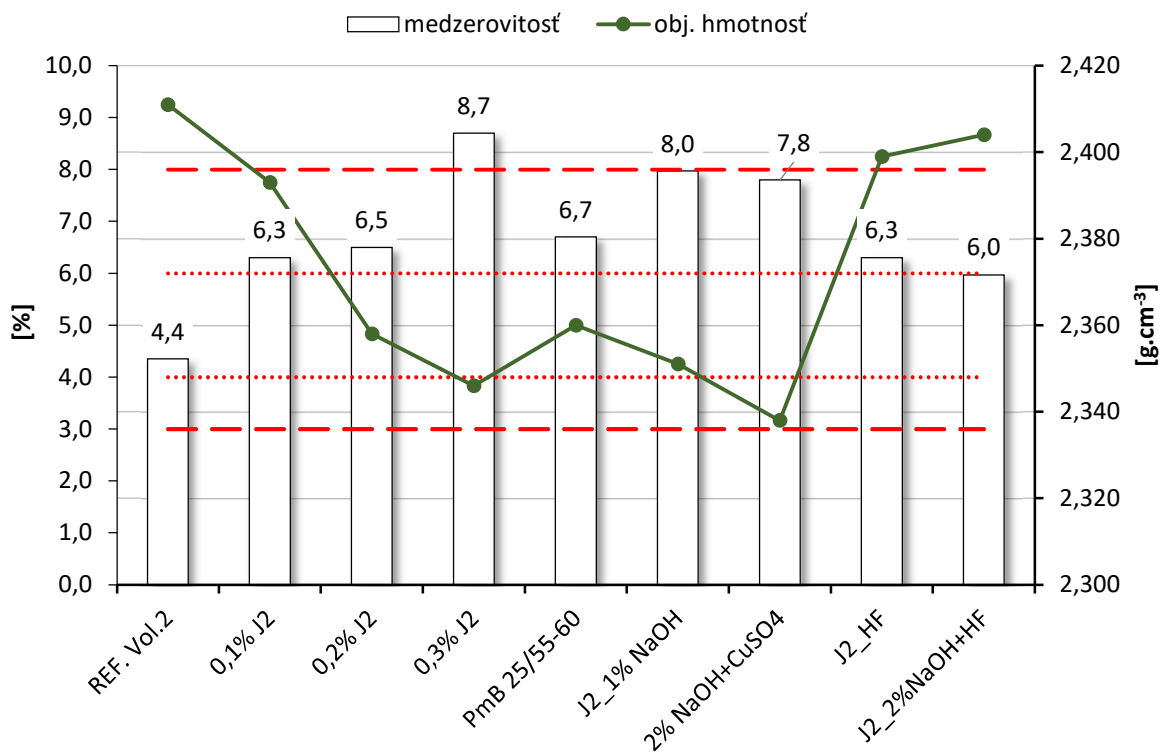
#### 4.3.1 Objemová hmotnosť a medzerovitosť

Limity pre medzerovitosť odpovedajú ČSN 736121:2019. Zmes J4\_01 s 40 mm dlhými vláknami a 1 miešacím cyklom ako jediná prekročila aj limity pre kontrolné skúšky. Najvyššiu hodnotu objemovej hmotnosti a najnižšiu hodnotu medzerovitosti dosiahla referenčná zmes. Z výsledkov možno súdiť, že pri jutových priadzach došlo k výraznému zníženiu medzerovitosti po predĺžení doby miešania. U zmesí s ľanovými priadzami sa tento efekt neprejavil. Zvýšenie obsahu spojiva a vyššia hutniaca energia vyústili do logického zníženia medzerovitosti. Zmes FORTA mierne prekročila limity pre skúšky typu.





**Obrázok 46: Obj. hmotnosť (zelená čiara) s medzerovitosťou (biele stĺpce) zmesi ACL 16+ z 1. fázy výskumu. Červené bodkované čiary značia limity pre skúšky typu, čiarkované pre kontrolné skúšky.**



**Obrázok 47: Objemová hmotnosť a medzerovitosť zmesi ACL 16+ z 2. fázy výskumu.**



V druhej fáze výskumu mala najvyššiu objemovú hmotnosť a najnižšiu medzerovitosť opäť referenčná zmes bez vlákien. Ďalej sa potvrdila korelácia narastajúcej medzerovitosti pri náraste obsahu vlákien v zmesi. Zmes s 0,3 % vlákien prekročila aj limity medzerovitosti pre kontrolné skúšky. Príčinou boli problémy s obalením vlákien pri miešaní zmesi. Zmesi s mercerovanými vláknami sa na tento limit dostali, avšak aplikácia hydrofobizácie pomohla k zníženiu medzerovitosti až hodnotu 6,0 %. U zmesi s hydrofobizovanými vláknami bol zaznamenaný aj nárast objemovej hmotnosti nad úroveň 2,4 g/cm<sup>3</sup>. Zaujímavým môže byť porovnanie medzerovitostí medzi fázami výskumu. Zmes 0,2% J2, teoreticky ekvivalentná k zmesi J2\_02, dosiahla o 1,2 % vyššiu medzerovitosť a o takmer 40 g/cm<sup>3</sup> nižšiu objemovú hmotnosť.

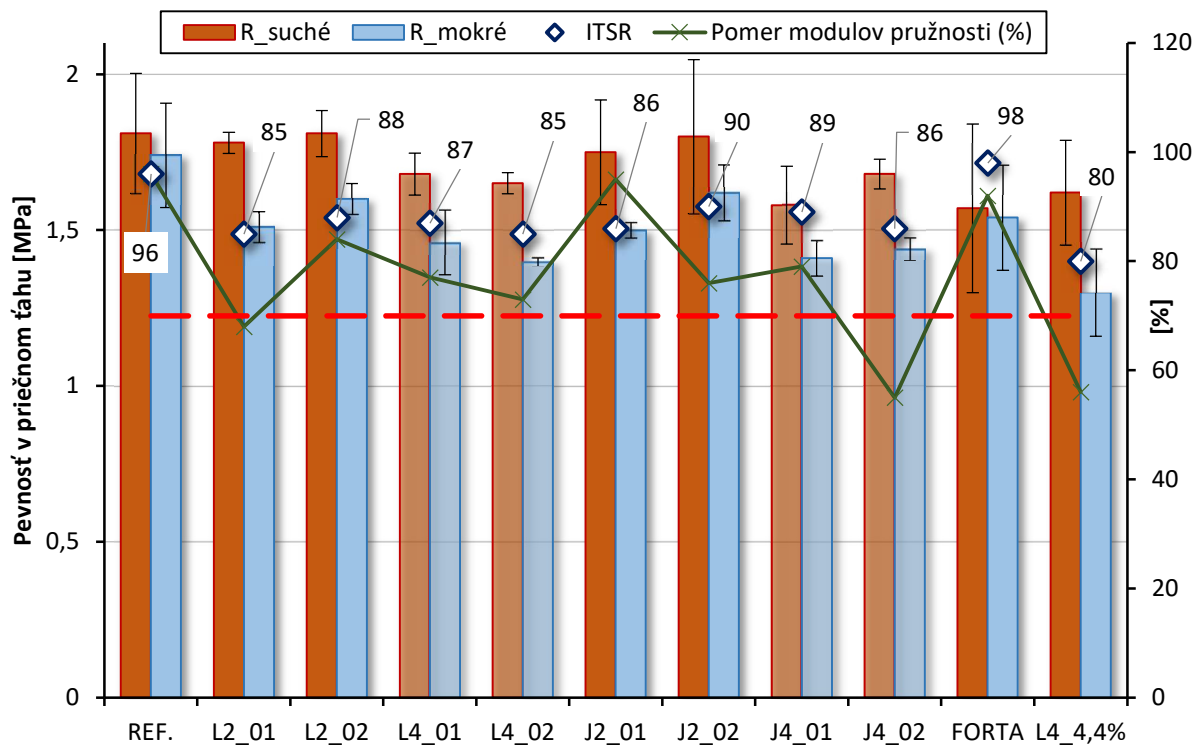
#### 4.3.2 Citlivosť voči účinkom vody

Testovanie citlivosti voči účinkom vody opäť ukázalo slabinu rastlinných vlákien – zníženie hodnoty ITSR. Úroveň poklesu sa pohybovala od 6 do 20 % od referenčnej zmesi. Všetky zmesi však splnili normou ČSN 736121:2019 prepísanú minimálnu hodnotu  $ITSR_{min} = 70\%$  (červená čiarkovaná čiara v grafoch).

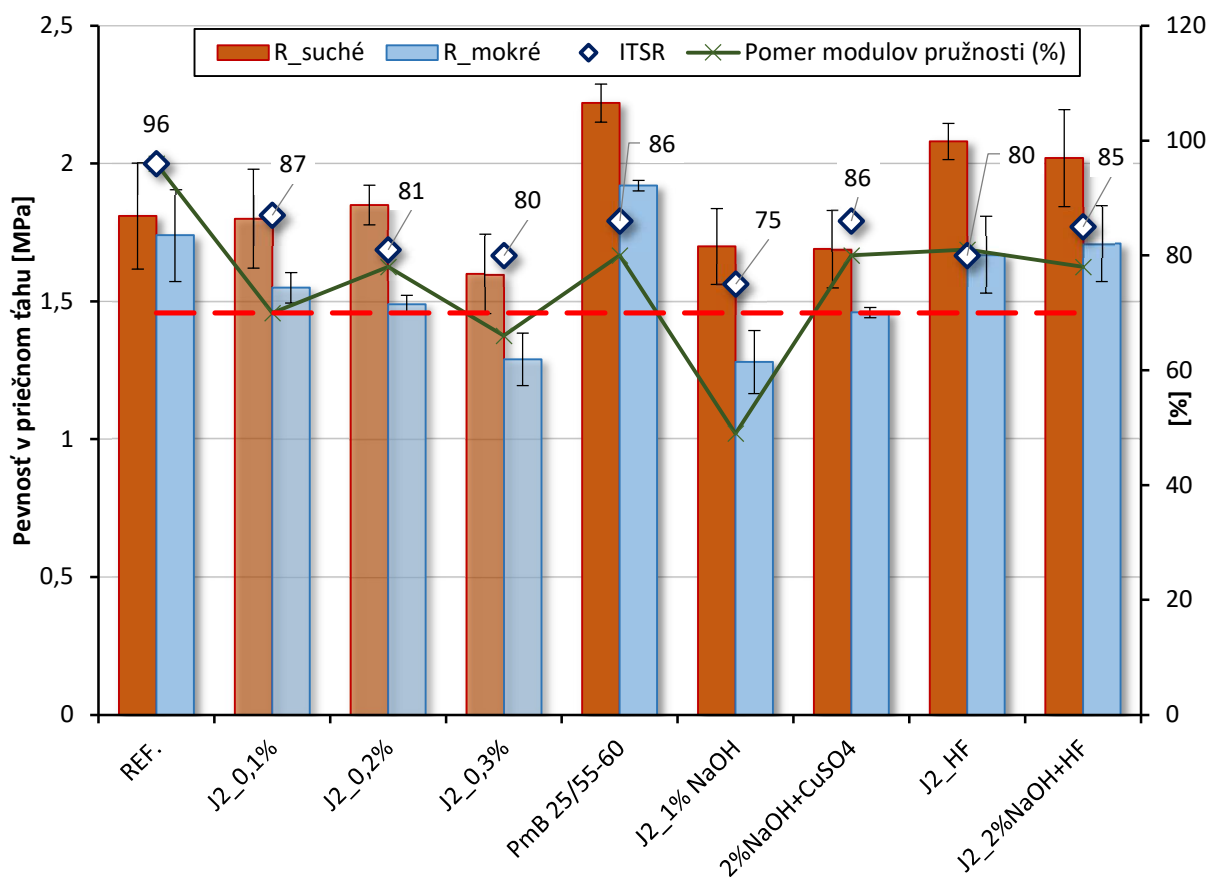
Zmes FORTA dosiahla najlepšiu hodnotu ITSR, avšak jednalo sa o prvé maloobjemové miešanie a došlo teda k poklesu absolútnych hodnôt pevností v priečnom ťahu. Predĺženie doby miešania viedlo u zmesi s dĺžkou vlákien 20 mm k miernemu nárastu ITSR a naopak, k miernemu poklesu u zmesi s dĺžkou vlákien 40 mm. Rozdiely nie sú veľké, avšak okrem zmesi s dlhšími ľanovými vláknami prinieslo predĺženie miešania aj zvýšenie pevností v priečnom ťahu.

Zmes s modifikovaným spojivom mala najvyššie hodnoty pevnosti v priečnom ťahu. Nasledovaná bola zmesami s hydrofobizovanými vláknami. U tých trochu prekvapivo nebol zaznamenaný nárast ITSR. Kompenzovali ho však nárastom pevnosti v priečnom ťahu. Najnižšia hodnota ITSR a pomeru modulov pružnosti boli zaznamenané u zmesi J2\_1%NaOH. Vyšší obsah spojiva v zmesi L4 4,4% nepriniesol očakávané zlepšenie.

Dôkaz o náraste pomerného pretvorenia rastlinných vlákien za mokra poskytuje zníženie modulu pružnosti u zmesi s vláknami. Hodnota pomeru modulov pružnosti bola totiž takmer vždy nižšia, než u referenčnej zmesi. Vyrovať sa ju podarilo len zmesi J2\_01 a mierne nižšiu hodnotu dosiahla zmes FORTA. Najnižší pomer bol u zmesi J2\_1%NaOH.



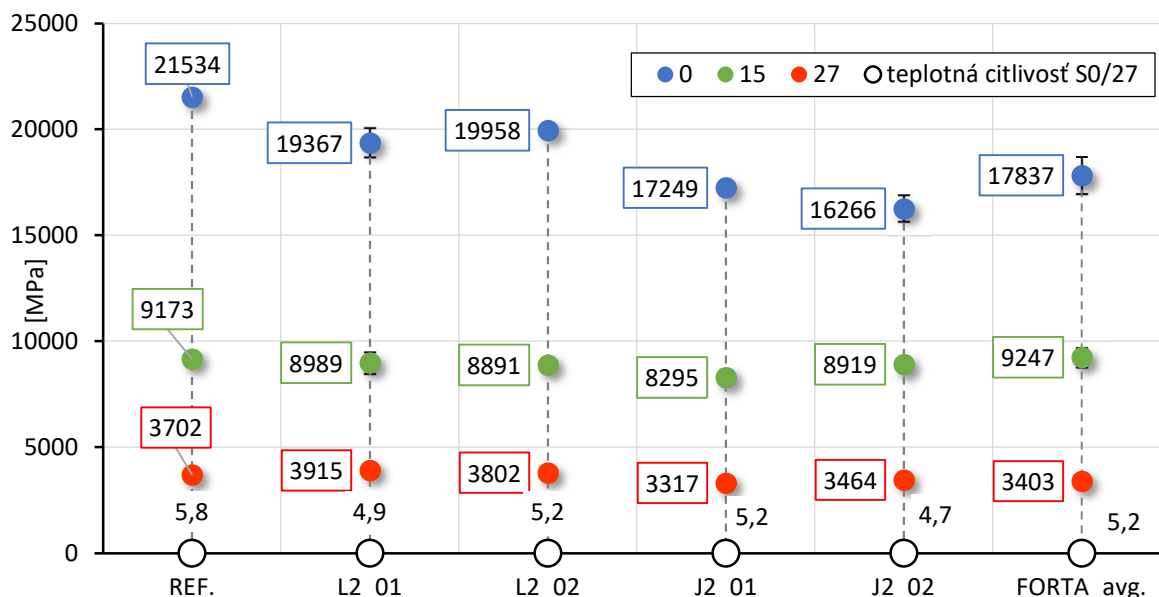
Obrázok 48: ITSR a pevnosť v pričnom ťahu zmesí ACL 16+ v 1. fáze výskumu.



Obrázok 49: ITSR a pevnosť v pričnom ťahu zmesí ACL 16+ v 2. fáze výskumu.

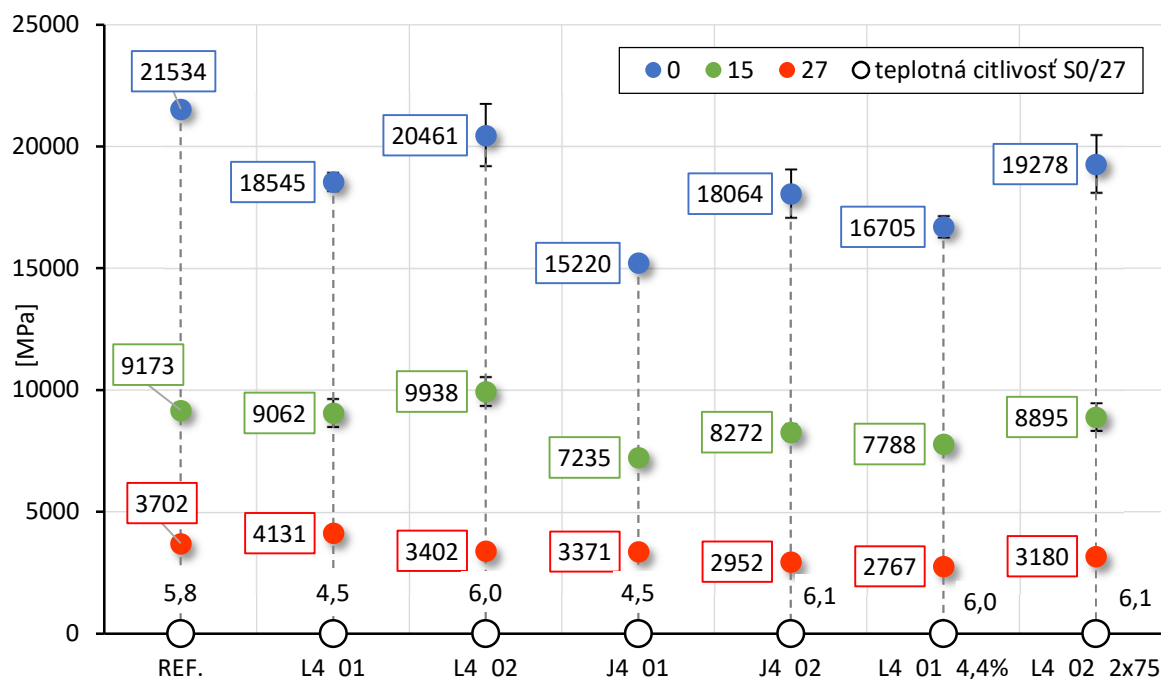


### 4.3.3 Tuhosť



Obrázok 50: Moduly tuhosti zmesí ACL 16+. Dĺžka vlákien 20 mm, 1. fáza výskumu.

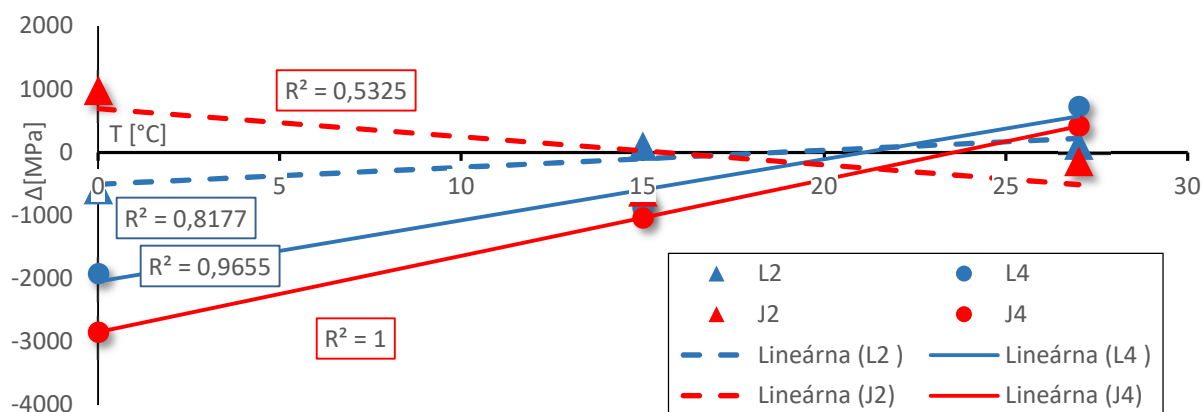
Pri dĺžke vlákien 20 mm bol proti referenčnej zaznamenaný pokles tuhosti pri 0 °C a 15 °C. Zamiešanie ľanových priadzí viedlo k zvýšeniu tuhosti, v porovnaní s jutovými priadzami. U zmesí s vláknami došlo k zníženiu teplotnej citlivosti. Vplyv dĺžky miešania sa pri 20 mm prvkoch veľmi neprejavil. Možno na zmesi J2\_02, ktorá dosiahla aj najnižšiu teplotnú citlivosť. Zmes FORTA mala podobnú tuhosť, ako ostatné zmesi s vláknami.



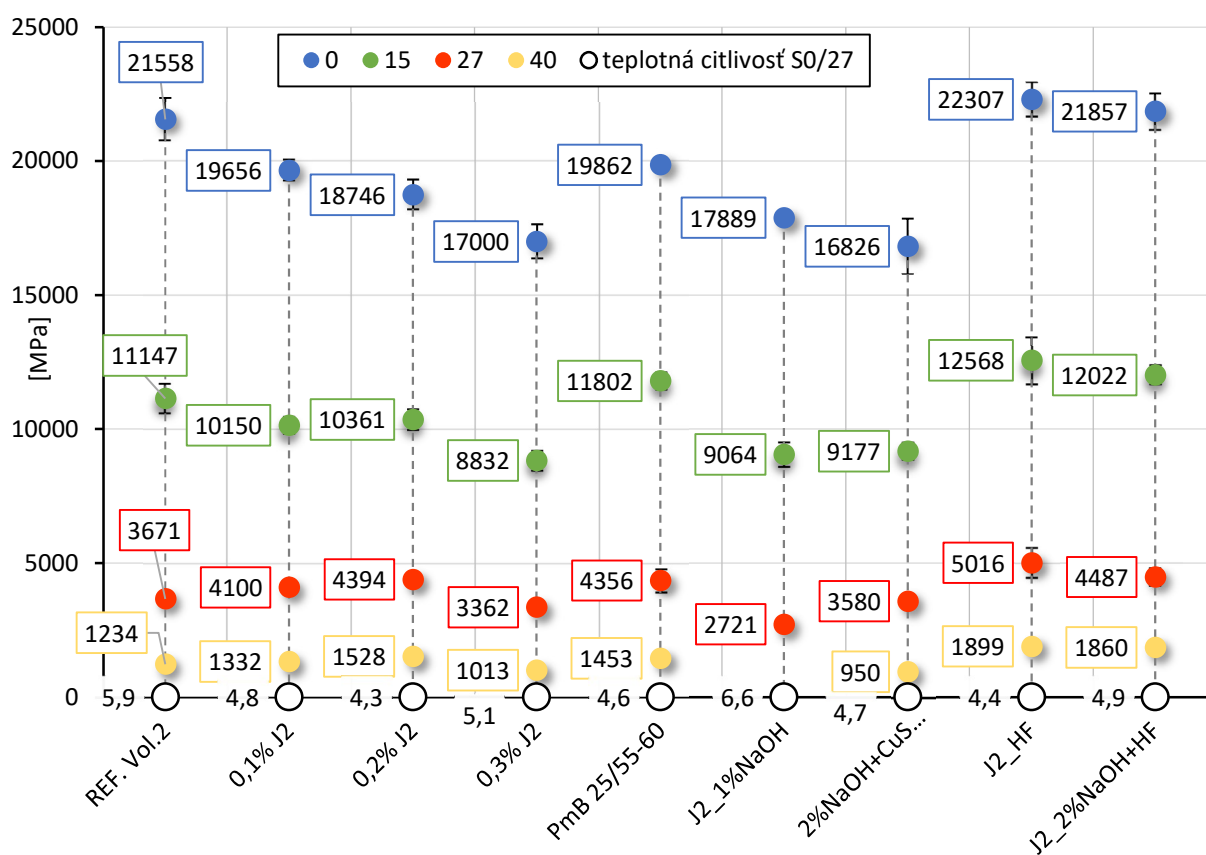
Obrázok 51: Moduly tuhosti zmesí ACL 16+. Dĺžka vlákien 40 mm, 1. fáza výskumu.



Zvýšení délky vláken na 40 mm už ukázalo zreteľný trend pri oboch použitých priadkach. Zmesi s jedným cyklom miešania vykázali zvýšenie tuhosti v oblasti vyšších teplôt nad 20 °C a naopak zníženie tuhosti pri nízkych teplotách (Obrázok 52). Podporujú to aj najnižšie hodnoty teplotnej citlivosti. Jednou z príčin mohlo byť nedostatočné obalenie vnútorných vláken elementov priadze. Zvýšenie množstva spojiva a hutniacej energie priniesli z hľadiska tuhosti skôr negatívne efekty. Najlepšou zmesou z 1. fázy testovania bola L4\_01.



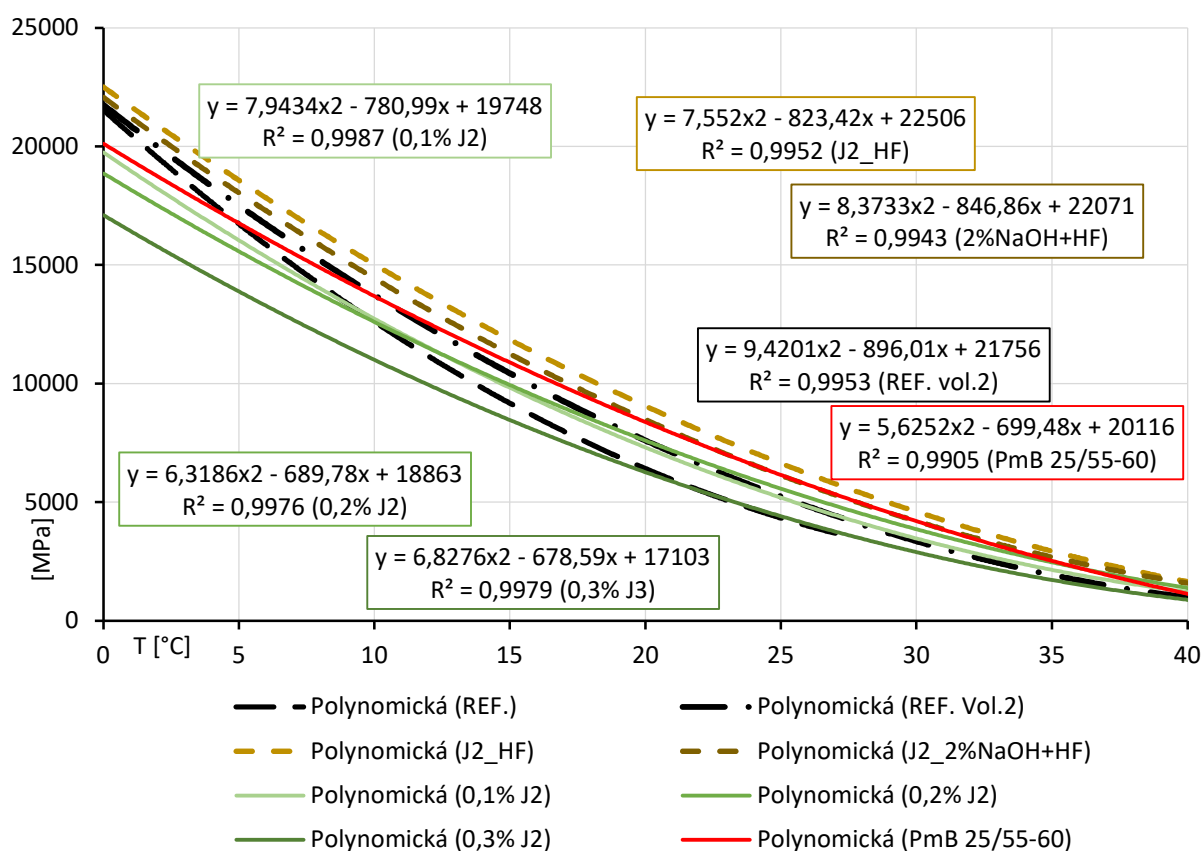
Obrázok 52: Rozdiel modulov tuhosti v závislosti na čase miešania: JX\_01 - JX\_02.



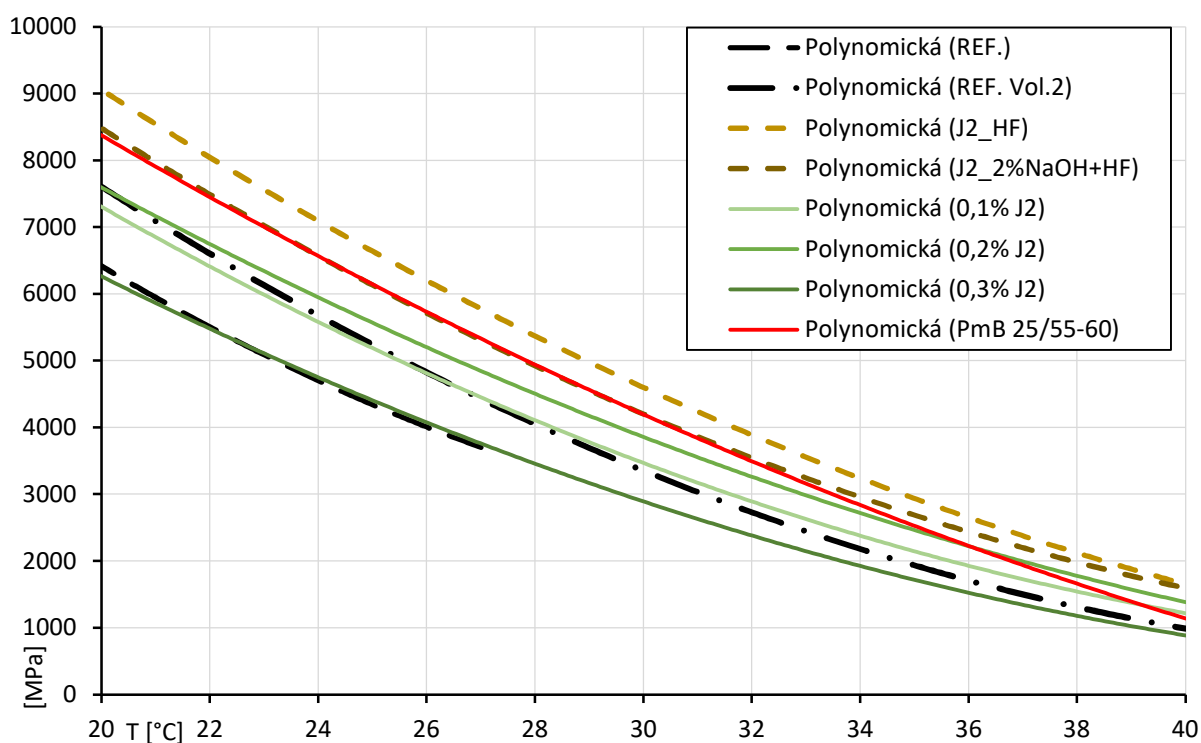
Obrázok 53: Moduly tuhosti zmesí ACL 16+. 2. fáza výskumu.



V druhej fáze výskumu bol, v porovnaní s referenčnou zmesou, pri väčšine zmesí s vláknami zaznamenaný pokles teplotnej citlivosti, pokles tuhosti pri 0 °C a 15 °C a nárast tuhosti pri vyšších teplotách. Výnimky tvoria zmesi 0,3% J2, J2\_1% NaOH a 2%NaOH+CuSO4, ktoré vykázali všeobecný pokles tuhosti. Naopak, zmesi s vláknami ošetrenými hydrofobizáciou zaznamenali všeobecný nárast tuhosti, mierny aj pri 0 °C. Dosiahli tak najvyššie hodnoty v celom teplotnom spektre, za súčasného udržania si nízkej úrovne teplotnej citlivosti. Pri zmesi s modifikovaným spojivom došlo taktiež k zlepšeniu charakteristík. Zo zmesí zameraných na testovanie vplyvu obsahu vlákien najlepšie dopadla zmes 0,2% J2, čím sa potvrdilo optimum výstužných rastlinných vlákien okolo hodnoty 0,2 % hm. Pokles tuhosti zmesi s 0,3 % vlákien však mohol byť spôsobený výrazne vyššou medzerovitosťou zmesi. Rozdiely v správaniach zmesí dobre ilustrujú grafy priebehu tuhosti v závislosti od teploty (Obrázok 54 a Obrázok 55). Môžeme si na nich všimnúť posuny kriviek vo vertikálnom smere a zmeny v ich sklone. Nezabúdajme pri tom na žiadúci efekt zvýšenia tuhosti v oblasti vyšších teplôt a naopak čo najnižšiu hodnotu pri nízkych teplotách pre minimalizáciu rizika vzniku mrazových trhlín. Rovnako tak tieto krivky reprezentujú len uvedené teplotné rozmedzia.



Obrázok 54: Priebeh tuhosti v závislosti od teploty vybraných zmesí ACL 16+ z 2. fázy výskumu.



Obrázok 55: Detail tuhosti v závislosti od teploty vybraných zmesí ACL 16+ z 2. fázy výskumu.

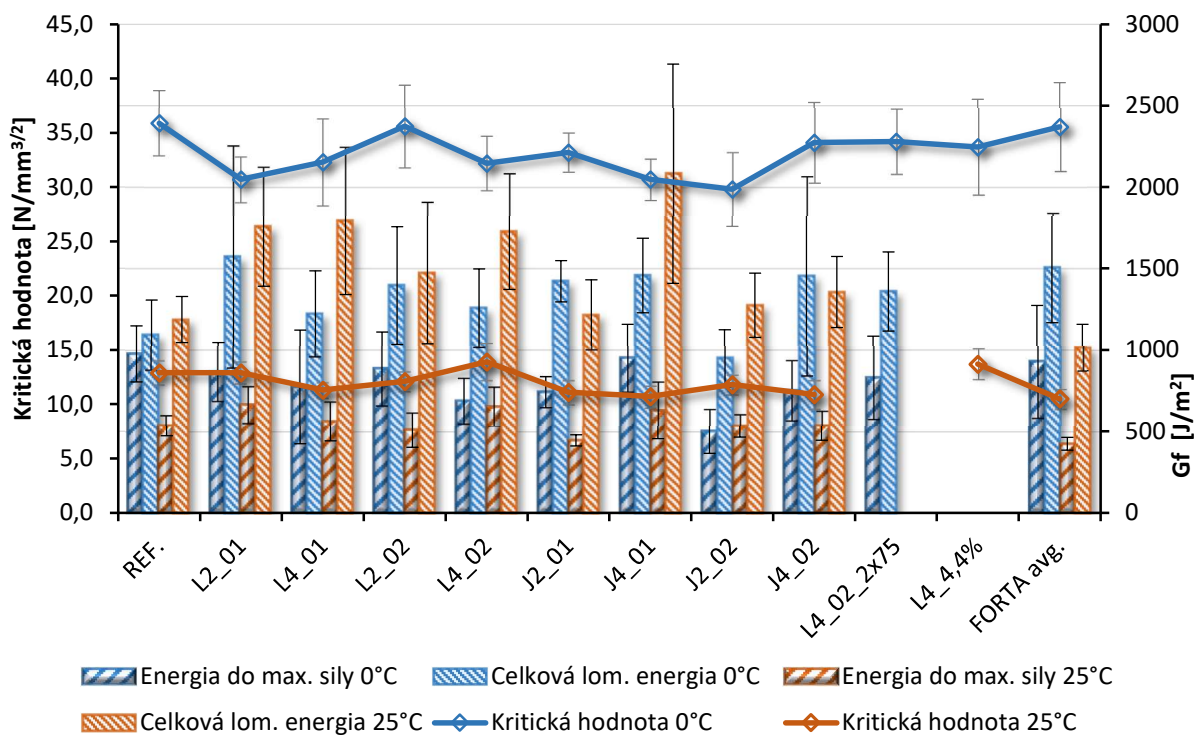
#### 4.3.4 Odolnosť voči šíreniu trhlín

Skúška bola vykonaná 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. Lomové parametre získané pri 25 °C indikujú potenciál vzniku únavových trhlín, avšak pri tomto teste sa nejedná o cyklické zaťažovanie.

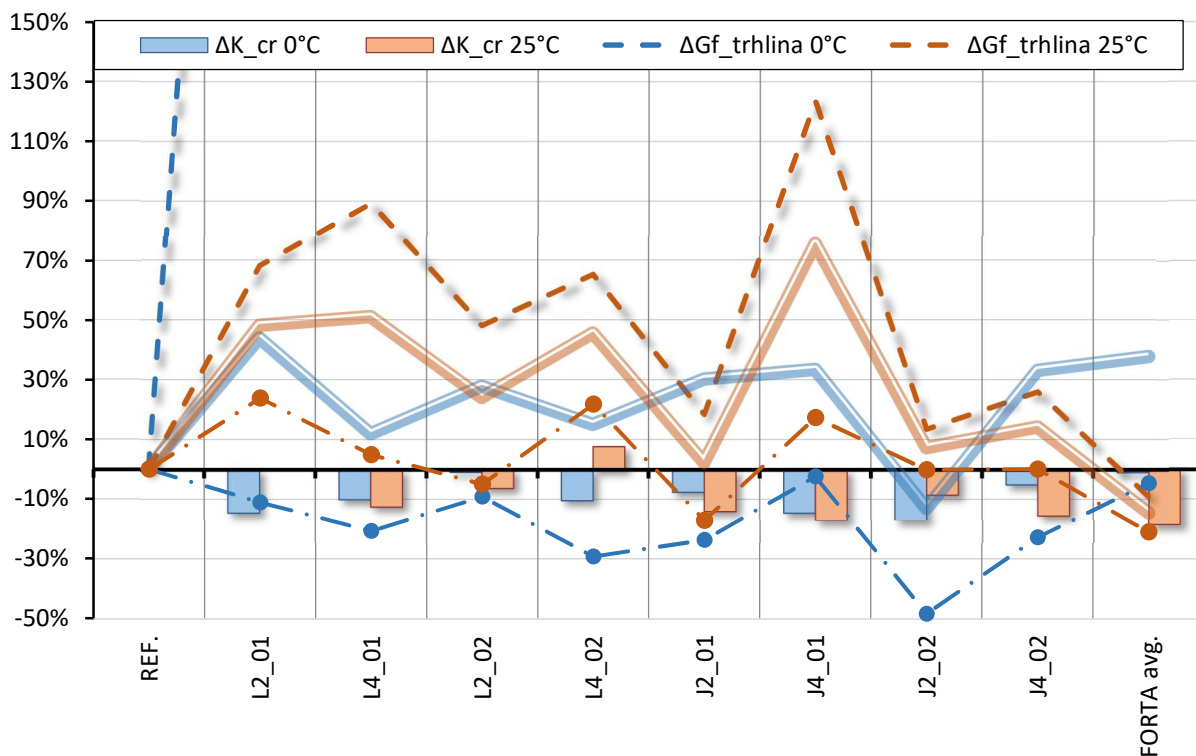
V porovnaní s referenčnou zmesou ukázali výsledky zmesí s vláknami z 1. fázy výskumu ukazujú trend zníženia kritickej hodnoty lomovej húževnatosti a lomovej energie do maximálnej sily. Naopak, došlo u nich k nárastu lomovej energie trhliny a aj celkovej lomovej energie pri oboch testovaných teplotách. Výnimku tvorí zmes J2\_02, ktorá dosiahla najhoršie parametre lomových charakteristík. Na druhej strane spektra sa ocitli zmesi s 40 mm dlhými vláknami. O chlp lepšie dopadli lepšie zmesi s 1 miešacím cyklom. Zmes FORTA dosiahla dobré lomové charakteristiky pri teplote 0 °C, avšak pri vyššej teplote dopadla najhoršie zo všetkých. Bohužiaľ, druhýkrát nemohlo byť odobrané dostatočné množstvo materiálu pre výrobu 6 ks Marshallových telies a tak bola znovu testovaná len teplota 0 °C, pri ktorej bola dosiahnutá podobná kritická hodnota aj lomová energia do maxima, avšak celková energia



skúšky sa dostala na hodnotu 1890 J/m<sup>2</sup>, čo predstavuje najlepší výsledok z 1. fázy výskumu. S najväčšou pravdepodobnosťou by teda táto zmes dosiahla lepšie výsledky pri 25 °C.

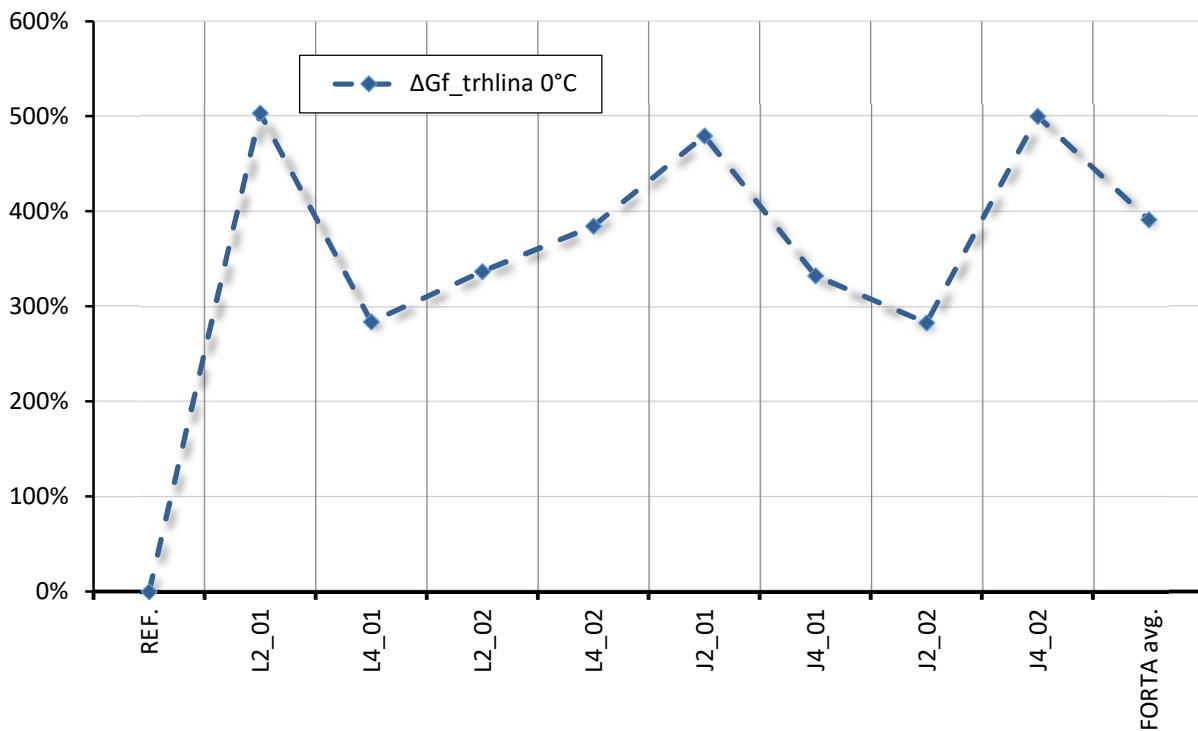


Obrázok 56: Odolnosť voči šíreniu trhlin zmesí ACL 16+ z 1. fázy výskumu.

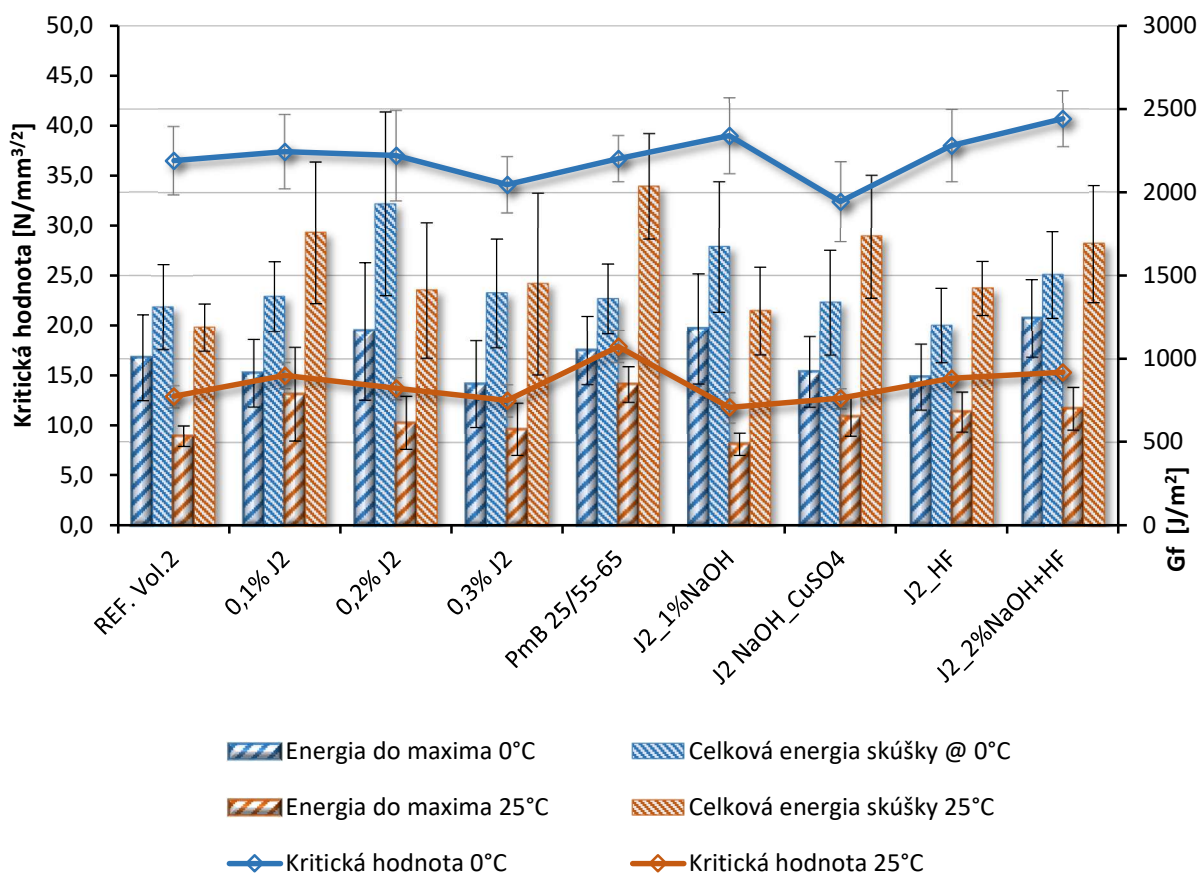


Obrázok 57: Percentuálne rozdiely lomových parametrov zmesí ACL 16+ z 1. fázy výskumu.

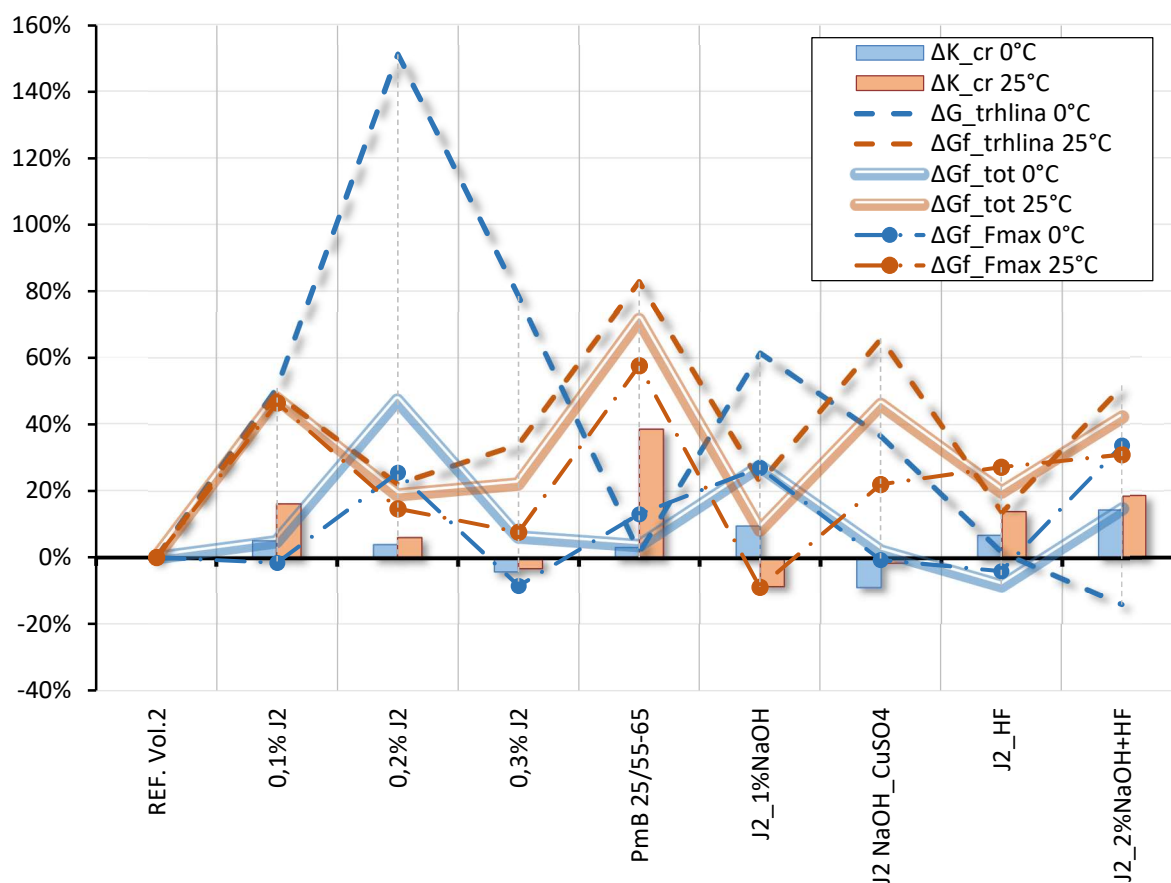




Obrázok 58: Percentuálne rozdiely lomovej energie trhliny zmesí ACL 16+ z 1. fázy výskumu.



Obrázok 59: Odolnosť voči šíreniu trhlin zmesí ACL 16+ z 2. fázy výskumu.

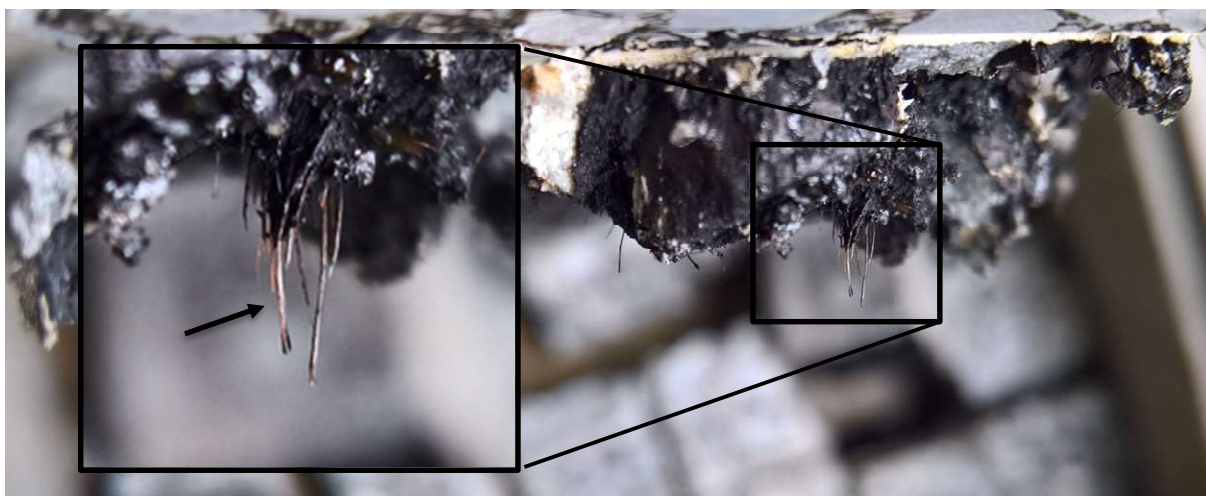


**Obrázok 60: Percentuálne rozdiely lomových parametrov zmesí ACL 16+ z 2. fázy výskumu.**

V 2. fáze sa v zásade tiež prejavil nárast lomovej energie trhliny u zmesí s vláknami, avšak nie pri zmesiach J2 NaOH\_CuSO4 a J2\_HF a teplote 0 °C. U zmesí HF došlo k zaujímavému efektu poklesu lomovej energie trhliny a naopak nárastu kritickej hodnoty lomovej húževnatosti a energie do maximálnej sily. Lepšou z dvojice bola zmes s mercerovanými vláknami (HF+NaOH). Vplyv hydrofobizácie možno porovnať s ďalšími zmesami s mercerovanými vláknami. Pravdepodobný mechanizmus vzniku je lepšie spolupôsobenie matrice s vláknom. To dovolilo efektívnejší prenos napätia pri namáhaní. Po iniciácii trhliny však naakumulované napätie prekračovalo medze pevnosti v ťahu vlákien. Vďaka dobrému medzifázovému spolupôsobeniu však nemohlo dôjsť k preklzu a k zníženiu napätia, tak ako pri neošetrených vláknach (Obrázok 61). Na ňom si môžeme všimnúť odhalený povrch elementárnych vlákien jutovej priadze. Túto teóriu podporujú výsledky ekvivalentných zmesí 0,2% J2 a J2\_1%NaOH (pri 0 °C). Zmes s modifikovaným spojivom dosiahla minimálne zlepšenie sledovaných parametrov pri teplote 0 °C a naopak, najvyššie hodnoty kritickej hodnoty, lomovej energie do maximálnej sily a celkovej energie pri 25 °C. Pri rôznom obsahu vlákien v zmesi bol



pozorovaný trend optima 0,2 % vláken pri 0 °C. Zmes s 0,1 % vláken mala najlepšie správanie pri teplote 25 °C a zvýšenie obsahu vláken na 0,3 % už znamenalo všeobecný pokles sledovaných charakteristík. Ako najlepšie možno označiť zmes modifikovaným spojivom a zmes J2\_HF+NaOH, pri ktorej síce došlo k poklesu energie trhliny, avšak bola potrebná jedna najvyšších energií na jej iniciáciu. Dobré výsledky dosiahla taktiež zmes 0,2% J2, ktorá napr. dosiahla absolútne najvyššiu celkovú lomovú energiu pri 0 °C (1930 J/m<sup>2</sup>). Tento výsledok však trochu znižuje vypočítaná vysoká smerodajná odchýlka. Tá je už typicky pri teste odolnosti voči šíreniu trhlín na vysokých hodnotách. Zdá sa však, že jej hodnota ešte rastie u niektorých zmesí s vláknami. Upravená verzia testu na menších telesách poskytuje pomerne jednoduché vysvetlenie. Navyše, náhodne orientovaná výstuž môže lokálne spôsobiť iniciáciu, či propagáciu trhliny, miesto zabráneniu jej šírenia. Z celkového počtu testovaných zmesí sú však badať určité trendy vplyvu rastlinných vláken a ich funkcia v teste odolnosti voči šíreniu trhlín.



**Obrázok 61: Detail telesa zmesi J2\_01 po teste odolnosti voči šíreniu trhlín pri 0 °C. Šípka ukazuje na odhalené jutové vlákno po strate adhézie spojiva.**



### 4.3.5 Odolnosť proti trvalým deformáciám

Z dôvodu šetrenia materiálom boli skúšobné dosky s normou [72] predpísanou výškou 60 mm vyrobené len pri zmesiach z 1. fázy výskumu. Pre zmesi typu ACL 16+ stanovuje norma ČSN 736121:2019 požiadavky maximálnych hodnôt parametrov prírastku hĺbky koľaje (max.  $WTS_{AIR} = 0,06 \text{ mm}/10^3 \text{ cyklov}$ ) a pomernej hĺbky koľaje (max.  $PRD_{AIR} = 4 \%$ ). Možno teda konštatovať, že všetky zmesi splnili normou dané požiadavky a ukázali výbornú odolnosť proti trvalým deformáciám. Zo zmesí z 1. fázy testovania dopadla najlepšie zmes FORTA, v tesnom závесе so zmesou J2\_01. Dĺžka vlákien 20 mm sa ukázala byť mierne lepšia. Naopak za najhoršie výsledky možno považovať hodnoty sledovaných parametrov referenčnej zmesi. V 2. fáze dopadla najlepšie zmes J2\_2%NaOH+HF. Vlákna teda, až na výnimku v podobe zmesi J2\_HF, prispeli k zníženiu priemernej hĺbky koľaje po 10 000 cykloch a k zníženiu pomernej hĺbky koľaje  $PRD_{AIR}$ .

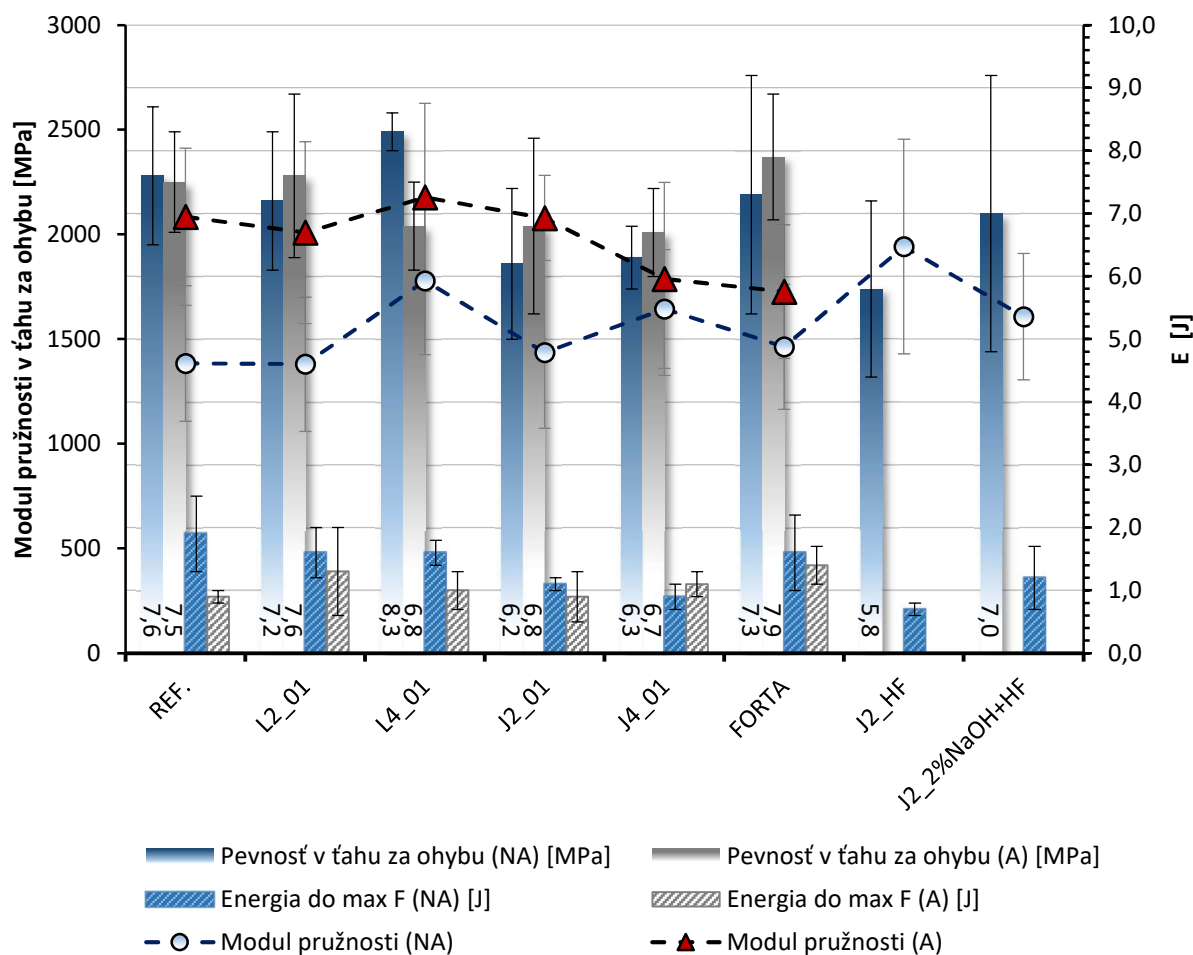
Tabuľka 7: Výsledky odolnosti proti trvalým deformáciám vybraných zmesí ACL 16+.

zmes	hrúbka [mm]	obj. hmotnosť [g.cm <sup>-3</sup> ]	miera zhutnenia [%]	priem. hl. koľaje po 10 000 cykl. [mm]	$WTS_{AIR}$ [mm/10 <sup>3</sup> cyk lov]	$PRD_{AIR}$ [%]
REF.	60,66	2,382	98,7	1,22	0,017	1,9
L2_01	60,94	2,344	98,7	0,99	0,020	1,5
L4_01	60,65	2,342	98,5	1,03	0,017	1,6
J2_01	60,87	2,316	99,1	0,90	0,014	1,4
J4_01	60,47	2,318	99,7	1,11	0,019	1,7
FORTA	60,50	2,364	100,8	0,84	0,013	1,3
REF. Vol.2	50,15	2,383	98,7	1,21	0,035	2,1
J2_HF	50,25	2,402	100,0	1,29	0,015	2,4
J2_2%NaOH+HF	51,20	2,367	99,1	1,05	0,025	1,8



### 4.3.6 Pevnosť v ťahu za ohybu

V porovnaní s referenčnou zmesou došlo k zvýšeniu pevnosti v ťahu za ohybu len v prípade zmesi L4\_01. Obidve zmesi s ľanovými priadkami dosiahli vyššie hodnoty pevnosti v priečnom ťahu, než tomu bolo u zmesi s jutovými priadkami. Zmesi s vláknami taktiež dosiahli nižšiu lomovú energiu na nezostarnutých telesách. Naopak, na zostarnutých telesách došlo k miernemu nárastu lomovej energie. Najvýraznejší nárast a najvyššia pevnosť v ťahu za ohybu zostarnutých telies boli zaznamenané pri zmesi FORTA. Zaujímavým je fakt, že pri zostarnutých telesách zmesi s vláknami nedošlo oproti nezostarnutým k tak veľkému nárastu modulu pružnosti, ako tomu bolo v prípade referenčnej zmesi. U dvoch zmesí z 2. fázy výskumu (HF) bohužiaľ došlo k zmiznutiu testovaných trámikov po starnutí a tak nemohli byť otestované.



Obrázok 62: Parametre testu pevnosti v ťahu za ohybu vybraných zmesí ACL 16+.



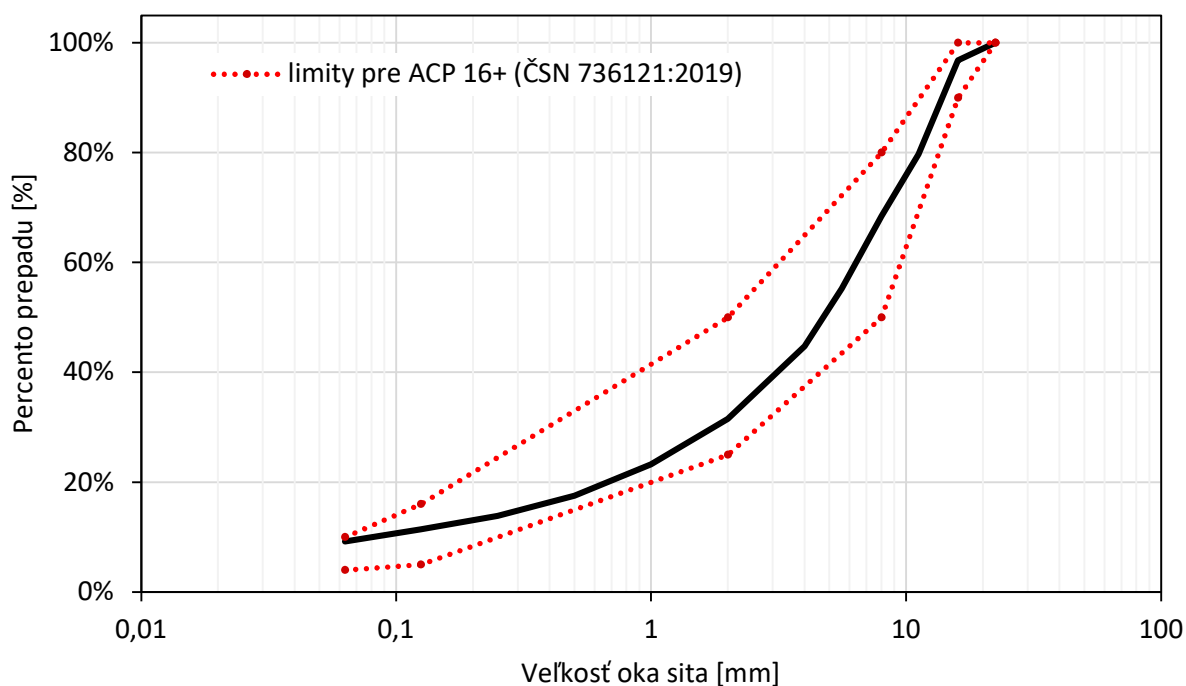
## 4.4 Podkladová vrstva – ACP 16+ 50/70 30 % RA

Tabuľka 8: Receptúra zmesi ACP 16+

ACP 16 + 50/70 30 % RA	
11/16 Zbraslav	19,1 %
8/11 Zbraslav	10,7 %
4/8 Zbraslav	14,0 %
0/4 Zbraslav	10,5 %
0/4 Lašovice	10,5 %
JMV (filer)	2,5 %
Spojivo 50/70	2,7 %
R-materiál 0/8 (RA)	30,0 %
	100 %

Keďže by výhľadovo malo dôjsť na 100% recykláciu asfaltových vozoviek, pre zistenie účinku výstužných prvkov v podkladovej vrstve bola zvolená zmes s R-materiálom, v angličtine označeného ako RA. Jeho obsah bol 30 % hm. Receptúry predošlých dvoch zmesí boli rokmi overené praxou v Cestnom laboratóriu FSv ČVUT. Preto nebol vykonaný sitový rozbor. Zmes ACP 16+ však obsahovala R-

materiál, ktorého zrnitosť a obsah spojiva sa môže líšiť v závislosti na jeho zdroji. Preto bola v tomto prípade urobená extrakcia s následným sitovým rozborom. Zistený celkový obsah asfaltu v zmesi bol 4,3 %. Zrnitosť zmesi bola medzi vymedzenými limitmi a zmes tak vyhovela požiadavkám normy ČSN 736121:2019.



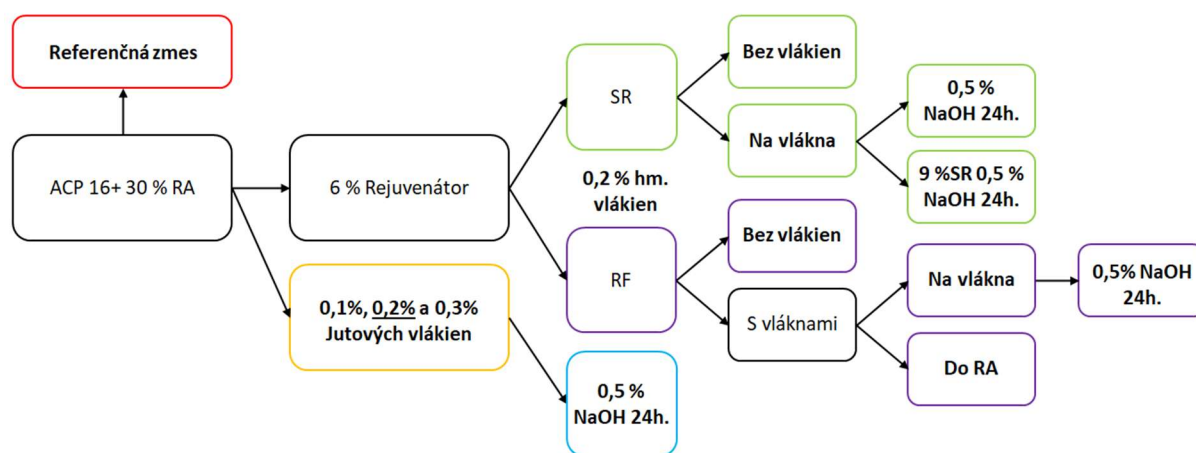
Obrázok 63: Sitový rozbor zmesi ACP 16+ 50/70 30 % RA

Pre všetky zmesi bola použitá rovnaká receptúra a cestné asfaltové spojivo 50/70. Teplota miešania a hutnenia bola 150 °C. Vzhľadom k použitému RA bol do väčšiny zmesí aplikovaný rejuvenátor pre obnovenie vlastností zostarnutého spojiva. Na trhu v súčasnej dobe existuje



celý rad rejuvenátorov, ako na prírodnej, tak ropnej báze, prípadne kombináciou oboch. Rejuvenátory by mali správne reagovať so zostarnutým spojivom, aby vzniklo kvalitné oživené spojivo a následne kvalitná asfaltová zmes. Preto je dôležité zvoliť vhodný typ a dávkovanie týchto prostriedkov. Boli vybrané dva komercializované rejuvenátory na biologickej báze – „RF“ a „SR“. Prísada „RF“ je na báze rastlinných olejov a „SR“ je získaná zo surového talového oleja a surového terpentínového oleja. Obe prísady boli dávkované v zhodnom množstve 6 % hmotnosti asfaltového spojiva v R-materiáli. Dávkovanie bolo určené na základe vykonania skúšok zostarnutého asfaltového spojiva extrahovaného z R-materiálu s rôznymi koncentraciami prísad. Vykonané skúšky boli penetrácia, bodu mäknutia, skúška frekvenčného rozptylu a MSCR. Hodnotenie týchto skúšok nie je súčasťou tejto práce.

Do zmesi ACP 16+ boli pridané jutové vlákna s dĺžkou elementov 20 mm. Priadza bola narezaná na požadovanú dĺžku a umiestnená do vodného kúpeľa s izbovou teplotou na 4 hodiny. Týmto krokom došlo k rozpadu priadze na jednotlivé vlákna. Po saturácii vo vodnom kúpeli boli vlákna ručne vyžmýkané, rozložené na nerezový plech a umiestnené do sušiarne s nútenou cirkuláciou vzduchu, kde boli ponechané po dobu 12 hodín pri teplote 50 °C. V **1. fáze** výskumu bol preverovaný vplyv ich obsahu v zmesi. Zvolené boli hodnoty 0,1 %, 0,2 % a 0,3 % hm. celkovej zmesi. Navyše bola vyrobená ešte zmes s mercerovanými vláknami, ktoré boli ponorené do roztoku 0,5% NaOH po dobu 24 hodín. Potom boli vlákna z roztoku vybrané, premyté čistou vodou z vodovodu a usušené v sušiarne po dobu minimálne 12 hodín a teplote 50 °C.



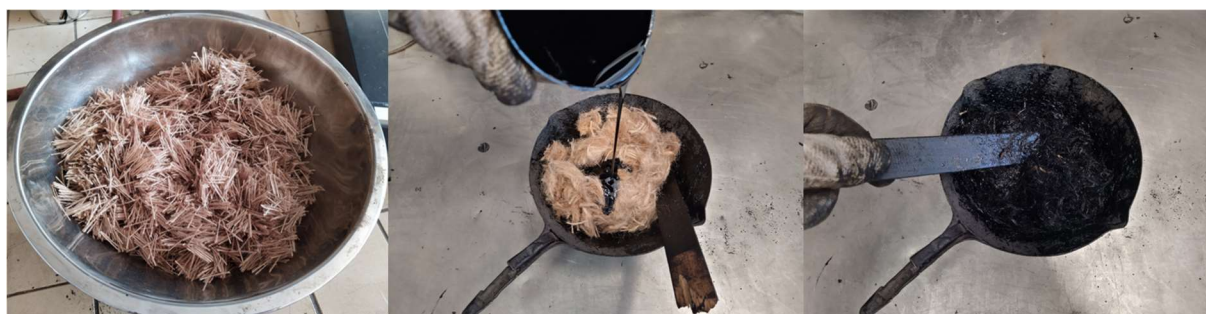
Obrázok 64: Schéma plánu výroby zmesí ACP 16+.



**2. fáza** výskumu bola zameraná na zmesi s rejuvenátormi. Rejuvenátor bol do asfaltovej zmesi pridávaný dvomi rôznymi spôsobmi: priamo do R-materiálu pri výrobe asfaltovej zmesi (RF) alebo do vlákien (oba typy). Rejuvenátory boli ručne (dlaňami) zmiešané s vláknami pri izbovej teplote. Ich dávkovanie bolo mierne vyššie ako požadované množstvo, aby sa vyrovnali zvyšky adsorbované na rukaviciach a povrchu misky. Potom boli vlákna premiestnené do čistej nádoby a vložené na 5 minút do sušiarne vyhriatej na 155 °C. Po tomto kroku bola na vlákna nanesená časť rozohriateho asfaltového spojiva. Zložky sa rýchlo ručne premiešali a vlákna obalené asfaltovým spojivom sa pridali do zmesi, spolu so zvyškom spojiva. Podobným spôsobom prebiehalo zamiešanie vlákien bez rejuvenátoru. Z dôvodu nízkeho množstva čerstvého spojiva by inak nedošlo k obaleniu všetkých vlákien. Opäť došlo aj na výrobu zmesí s mercerovanými vláknami. V prípade zmesi s rejuvenátorom „SR“ bol vyskúšaný aj jeho zvýšený obsah, ktorý činil 9 % hmotnosti spojiva.

Výsledky zmesí bez vlákien 6%SR a 6%RF boli poskytnuté kolegyňou MSc. Majdy Belhaj, ktorá sa majoritne podieľala aj na testovaní ostatných zmesí, za čo je patrí veľká vďaka.

Pri zmesi typu ACP 16+ nedošlo k testovaniu odolnosti proti trvalým deformáciám ale bolo vykonané testovanie dynamického modulu tuhosti, ktoré túto skúšku z časti nahrádza.



**Obrázok 65: Nastrihané elementy jutovej priadze, aplikácia spojiva na jednotlivé vlákna po rozpade prierezu a vlákna obalené spojivom, pripravené na zamiešanie do zmesi.**

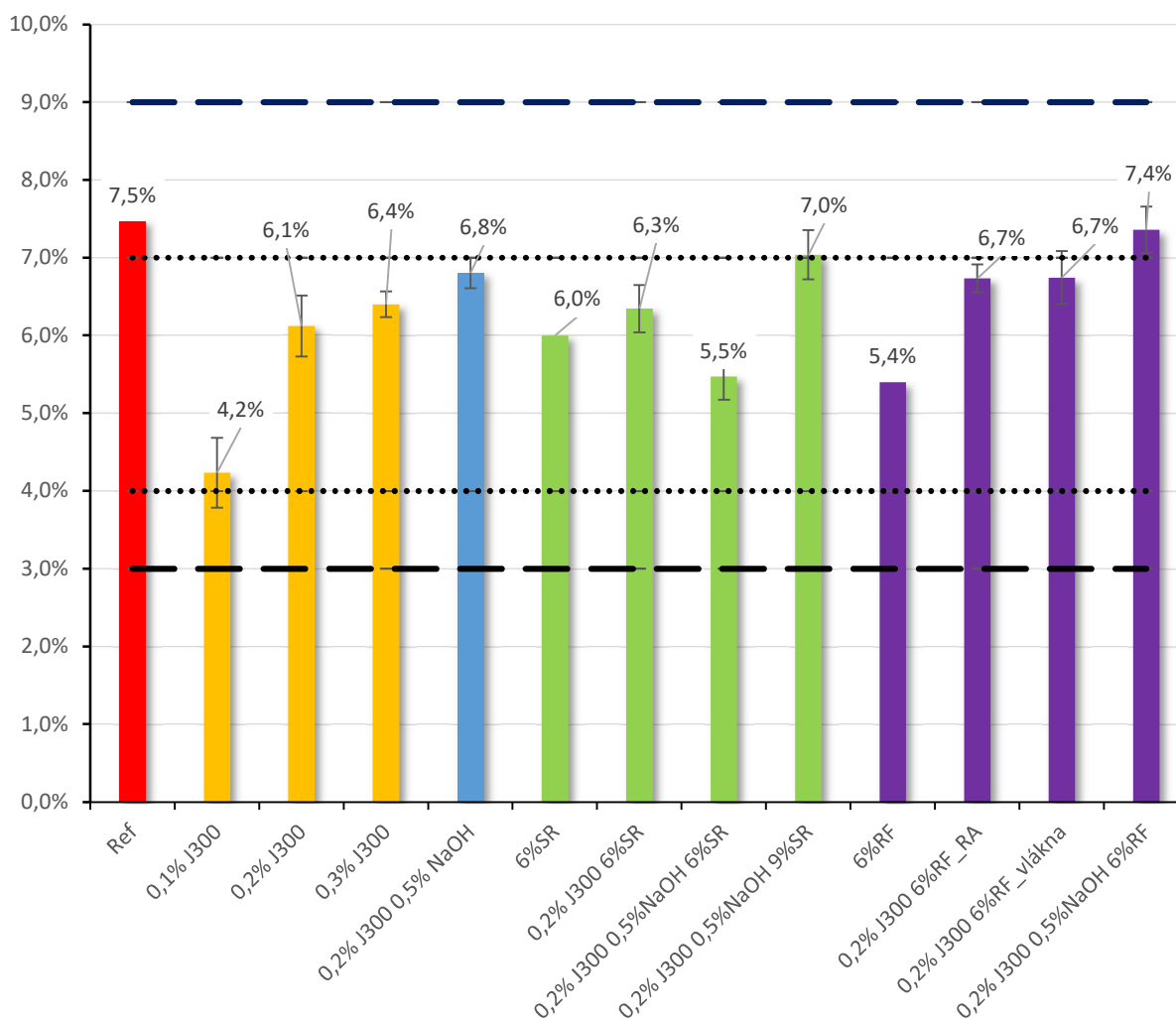
#### 4.4.1 Objemová hmotnosť a medzerovitosť

Zo všetkých testovaných zmesí prekročili limity pre skúšku typu (podľa ČSN 736121:2019) len dve zmesi: referenčná a zmes 0,2% J300 0,5%NaOH 6%RF, s obsahom rejuvenátoru „RF“. Prekvapujúco sa na hranicu 7 % dostala zmes so zvýšeným obsahom rejuvenátoru (9%SR). Možno si všimnúť, že zmesi s mercerovanými vláknami dosiahli, až na výnimku v podobe zmesi 0,5%NaOH 6%SR, vždy vyššie hodnoty medzerovitosti. Zvýšená drsnosť – zväčšenie





povrchu mercerovaných vláken môže byť pravdepodobnou príčinou tohto nárastu. Tento trend bol v zásade pozorovaný aj pri zmesi ACL 16+. Rovnako sa ukázalo, že vyšší obsah vláken vedie k zvýšeniu medzerovitosti. Neobvykle vysoká je však medzerovitosť referenčnej zmesi, ktorá však bola potvrdená aj výrobou overovacích telies (medzerovitosť 7,2 %). U zmesí s rejuvenátormi však došlo k očakávanému trendu zvýšenia medzerovitosti po pridaní vláken, až na spomínanú zmes 0,2% J300 0,5%NaOH 6%SR. Všetky zmesi vyhoveli limitom pre kontrolné skúšky. Zmena obsahu vláken viedla k očakávanému zvýšeniu medzerovitosti s ich narastajúcim množstvom. Spôsob pridávania rejuvenátoru RF nemal na medzerovitosť zmesí vplyv.

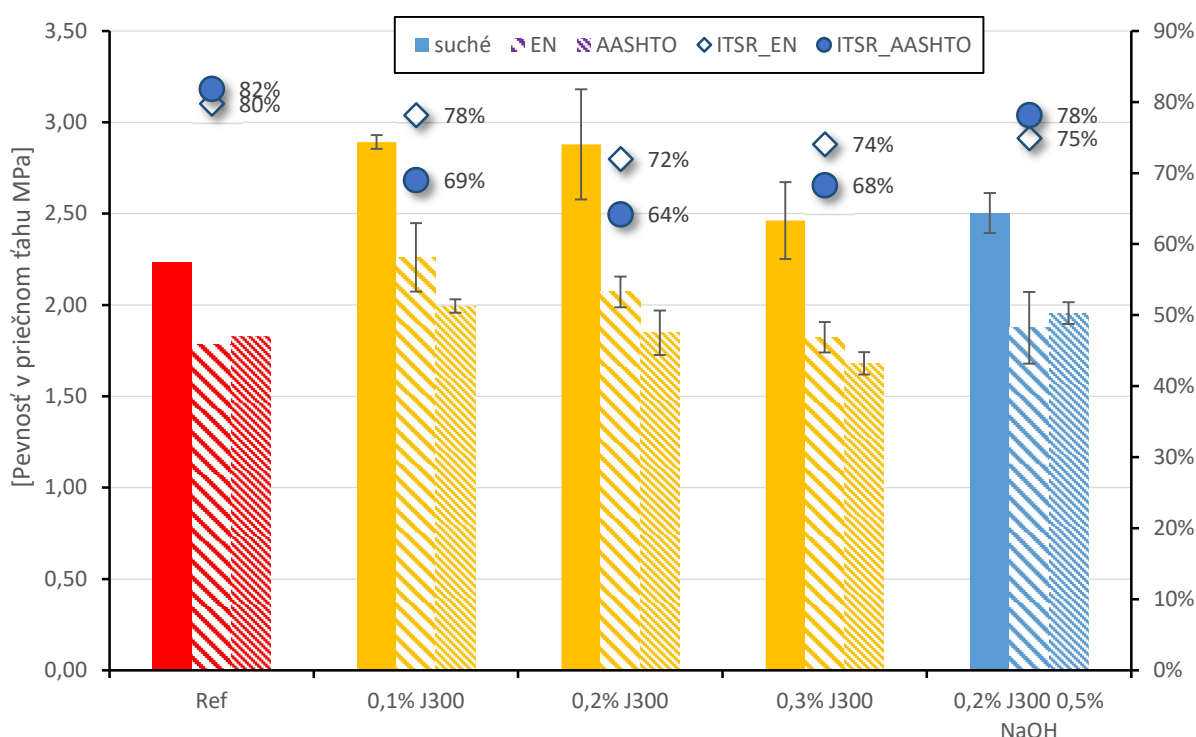


Obrázok 66: Medzerovitost zmesí ACP 16+. Bodkované čiary vymedzujú limity pre skúšku typu.



#### 4.4.2 Citlivosť voči účinkom vody a mrazu

Výsledky potvrdili trend poklesu hodnoty ITSR po pridaní vlákien. Pri skúške citlivosti voči účinku mrazu bol pokles vo väčšine prípadov ešte výraznejší. Zo zmesí z 1. fázy výskumu vykázala najlepšie hodnoty ITSR referenčná zmes, nasledovaná zmesou s mercerovanými vláknami (0,2% J300 0,5% NaOH). U oboch bol zaznamenaný mierny nárast ITSR po zmrazovacom cykle. U všetkých zmesiach s vláknami došlo k zvýšeniu suchej pevnosti v priečnom ťahu. Po klimatickom namáhaní ich pevnosť neklesla pod úroveň referenčnej zmesi, čo kompenzuje nižšiu hodnotu ITSR. Najnižšie pevnosti v priečnom ťahu dosiahla zmes 0,3% J300 s najvyšším obsahom vlákien.

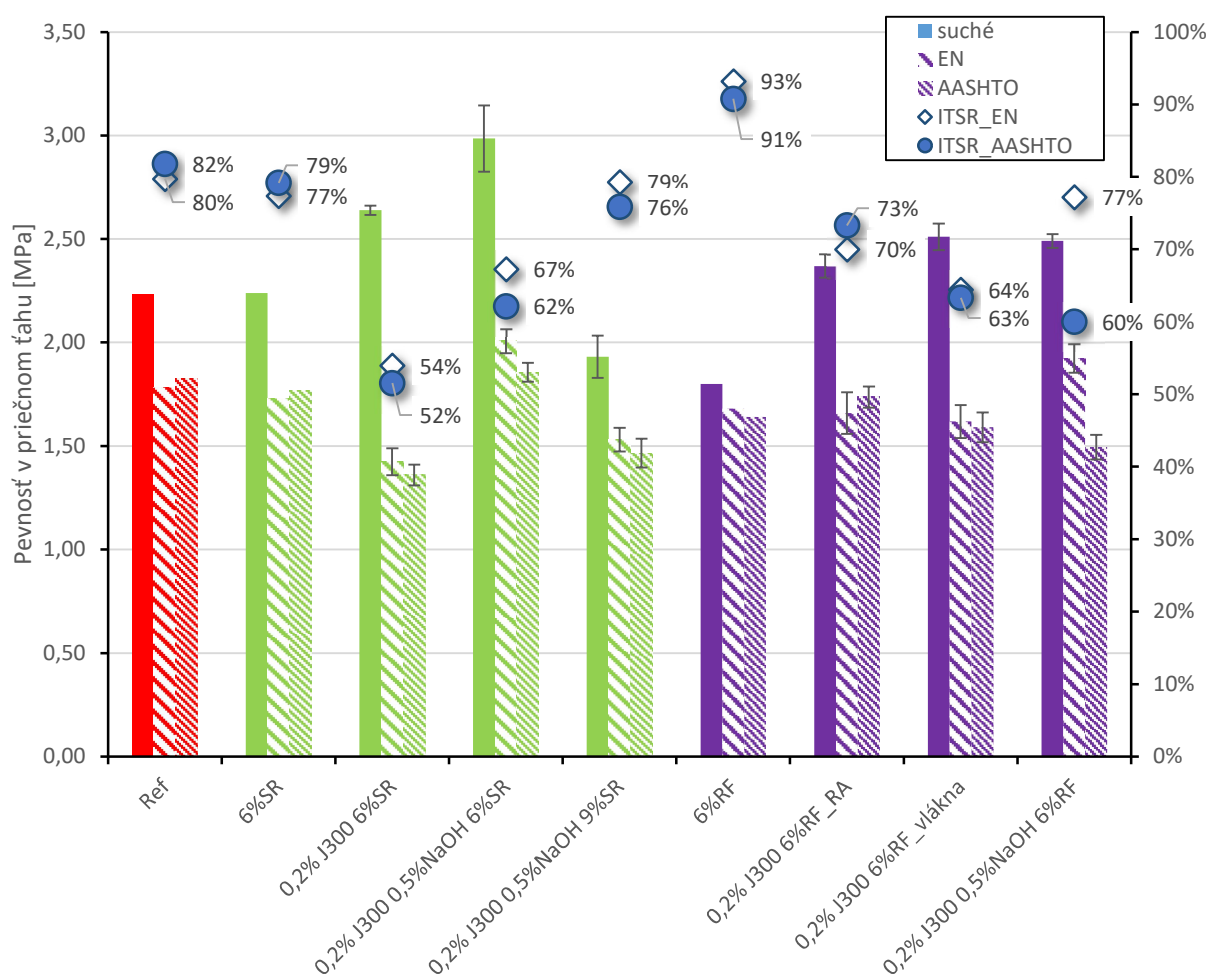


Obrázok 67: Citlivosť voči účinkom vody a mrazu zmesí ACP 16+ z 1. fázy výskumu.

V 2. fáze výskumu opäť došlo k poklesu oboch hodnôt ITSR pri zmesiach s vláknami. Najvýraznejší dosiahla zmes 0,2% J300 6%SR, čo znamenalo najnižšie hodnoty zo všetkých testovaných zmesí. Mercerizácia vlákien viedla v prípade rejuvenátoru „SR“ a základným obsahom 6 % k výraznému nárastu suchej pevnosti v priečnom ťahu. Zvýšenie obsahu rejuvenátoru na 9 % z hm. spojiva však viedlo k opačnému efektu. Na druhú stranu, hodnoty ITSR vystúpili nad hranicu 70 %. Zmes s rejuvenátorom „SR“ bez vlákien prekvapivo nezvýšila ani jeden sledovaný parameter v porovnaní s referenčnou zmesou. Oproti tomu, aplikácia rejuvenátoru „RF“ bez vlákien viedla k najvyšším hodnotám ITSR a k poklesu pevností



v priechnom ťahu. Túto hodnotu za sucha opäť zvýšilo pridanie vlákien. Rovnako tak došlo k poklesu hodnôt po klimatickom zaťažení. Rozdiel medzi aplikovaním rejuvenátoru na vlákna a do R-materiálu bol malý, avšak mierne lepšie výsledky dosiahla zmes 6%RF\_RA. Zmes s mercerovanými vláknami dosiahla vysokú pevnosť v priechnom ťahu za mokra. Podstúpenie zmrazovacieho cyklu však viedlo k poklesu na najnižšiu úroveň zo zmesí „RF“. Výraznejšie zníženie hodnôt ITSR možno pripísať nižšiemu obsahu čerstvého spojiva. Rozdiel je badateľný v porovnaní so zmesou ACL 16+. Pridanie rejuvenátoru do zmesí s vláknami však nevedlo k očakávanému zníženiu citlivosti. Tento fenomén by si zaslúžil ďalšie výskumné práce. Zmesi typu ACP síce podľa ČSN 736121:2019 nemajú stanovené limity ITSR, avšak pre použitie v praxi je dobré pre každú zmes mať čo najvyššie hodnoty. K výmene stmelenej podkladovej vrstvy nedochádza pri rekonštrukciách vozoviek často. Po vzniku trhlin vo vrstvách krytu by mohlo dôjsť k potenciálne rýchlejšej degradácii a k nutnosti vymeniť všetky stmelené vrstvy.

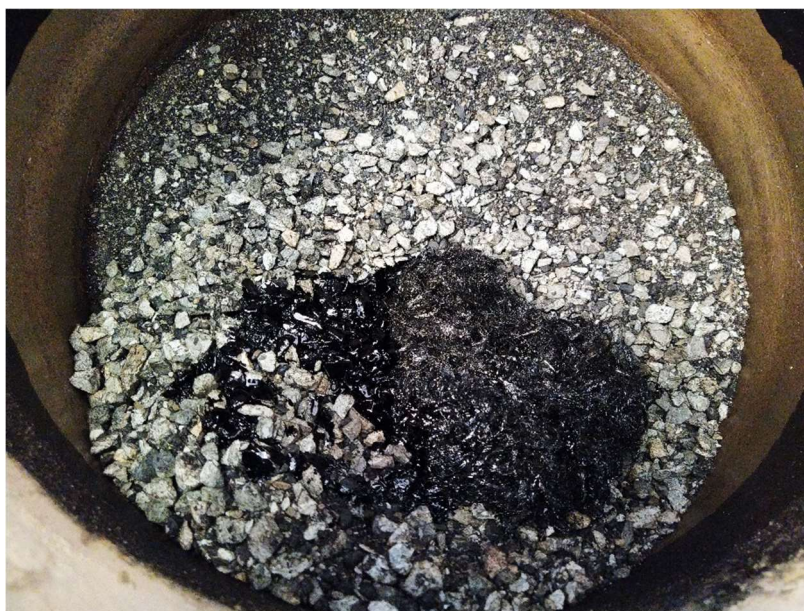


Obrázok 68: Citlivosť voči účinkom vody a mrazu zmesí ACP 16+ z 2. fázy výskumu.



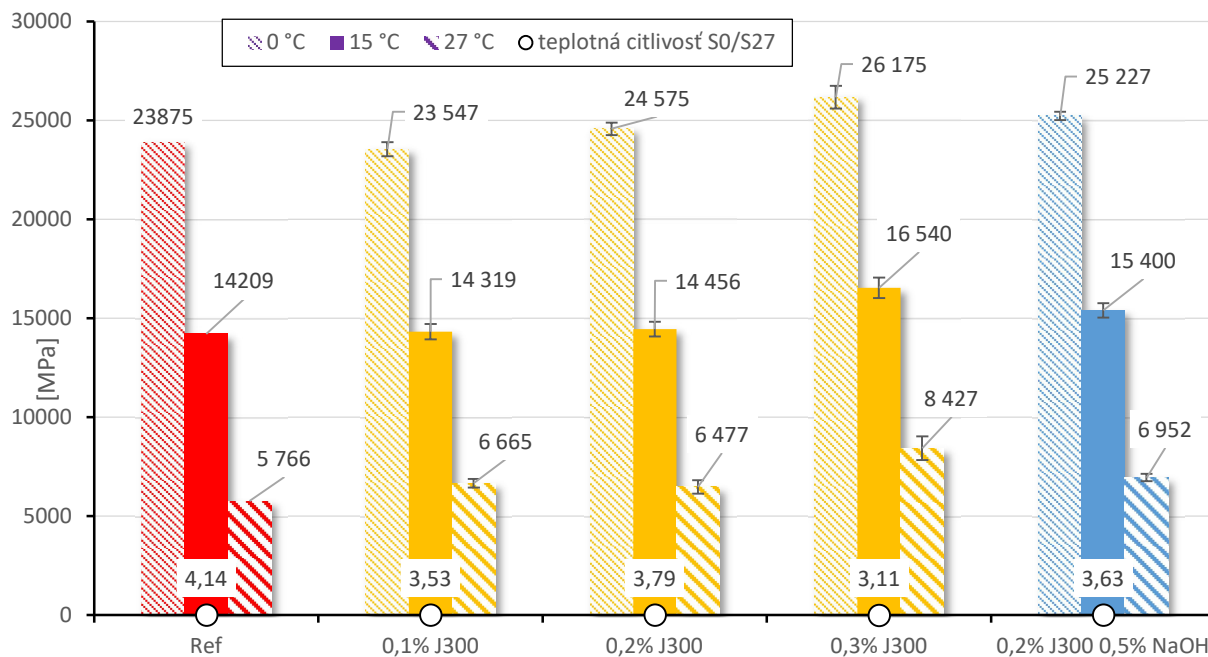
#### 4.4.3 Tuhosť

Testovanie modulu tuhosti znovu prinieslo poznanie, že pridanie vlákien zvyšuje tuhosť zmesi. Zo zmesí z 1. fázy výskumu dosiahli zmesi s vláknami pri všetkých testovaných teplotách vyššiu tuhosť, ako zmes referenčná. Jedine zmes 0,1% J300 dosiahla o chlp nižšiu tuhosť pri 0 °C. Rovnako však došlo k zníženiu teplotnej citlivosti. Zmes s mercerovanými vláknami mala vyššiu tuhosť, ako ekvivalentná zmes 0,2% J300. So zvyšujúcim sa obsahom vlákien bol pozorovaný nárast tuhosti. V predchádzajúcich kapitolách bol podobný trend zaznamenaný v prípade zmesi SMA 11 S PMB. Výsledky tuhosti zmesi ACL 16+ ukázali pokles hodnôt pri obsahu vlákien 0,3 %, avšak problémy pri miešaní zmesi a jej následná vysoká medzerovitosť ponúkajú relevantné dôvody myslieť si, že pri správnom obalení vlákien by tuhosť kopírovala trendy zo zvyšných dvoch typov testovaných zmesí (SMA a ACP).

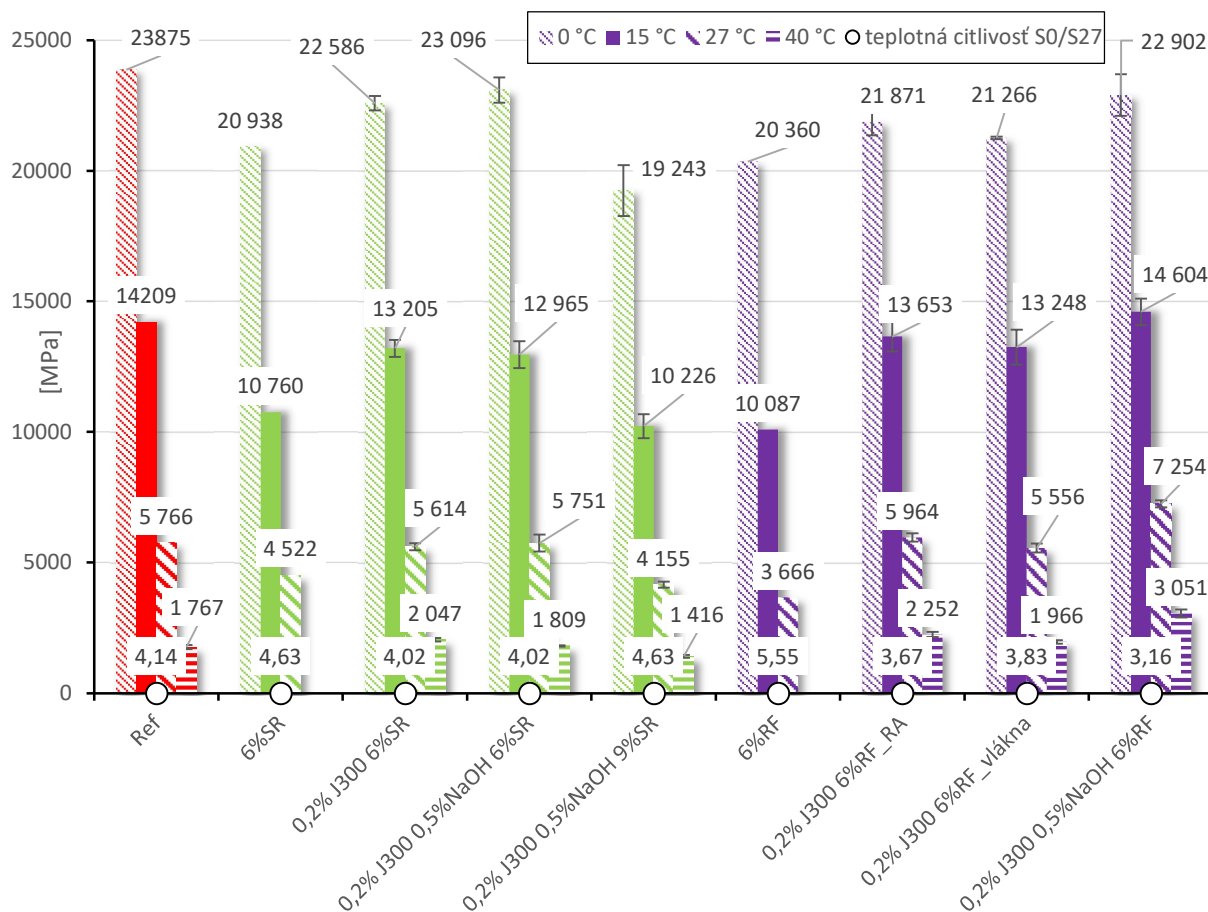


**Obrázok 69: Obalené jutové vlákna so zvyškom spojiva pri výrobe zmesi ACP 16+ 30%RA 0,2% J300.**

Aplikácia rejuvenátoru priniesla logické zníženie tuhosti zmesí. Po pridání vlákien hodnota narástla, čo sa netýkalo jedine zmesi s vyšším obsahom rejuvenátoru (9%SR). Okrem posledne menovanej došlo tiež k obligátnemu zníženiu teplotnej citlivosti. Pri rejuvenátore „SR“ nedošlo v prípade mercerovaných vlákien k všeobecnému nárastu tuhosti oproti ekvivalentnej zmesi 0,2% J300 6%SR. Aplikácia rejuvenátoru „RF“ znamenala dosiahnutie najvyššej hodnoty teplotnej citlivosti zo všetkých testovaných zmesí. Po pridání vlákien došlo k výraznému zníženiu tohto parametru a k až dvojnásobnému nárastu tuhosti pri 15 °C u zmesi s mercerovanými vláknami. Táto zmes prekonala aj tuhosť referenčnej zmesi (Ref).



Obrázok 70: Moduly tuhosti zmesí ACP 16+ z 1. fázy výskumu.

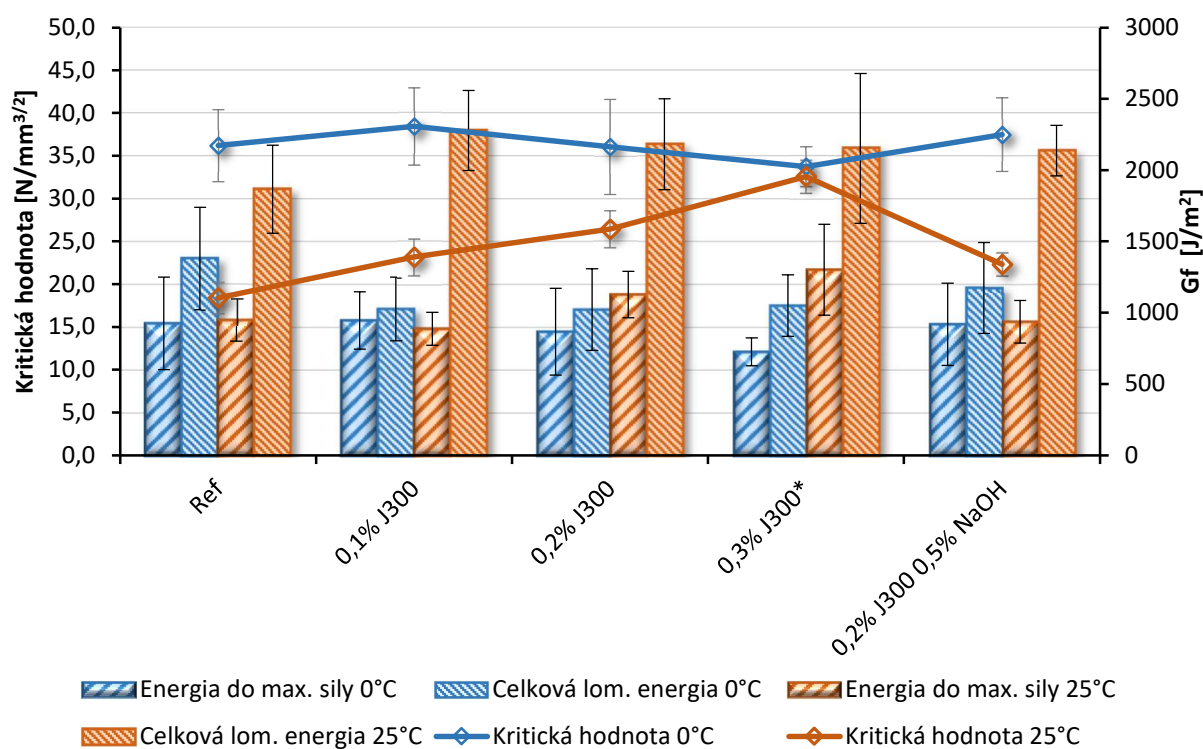


Obrázok 71: Moduly tuhosti zmesí ACP 16+ z 2. fázy výskumu.



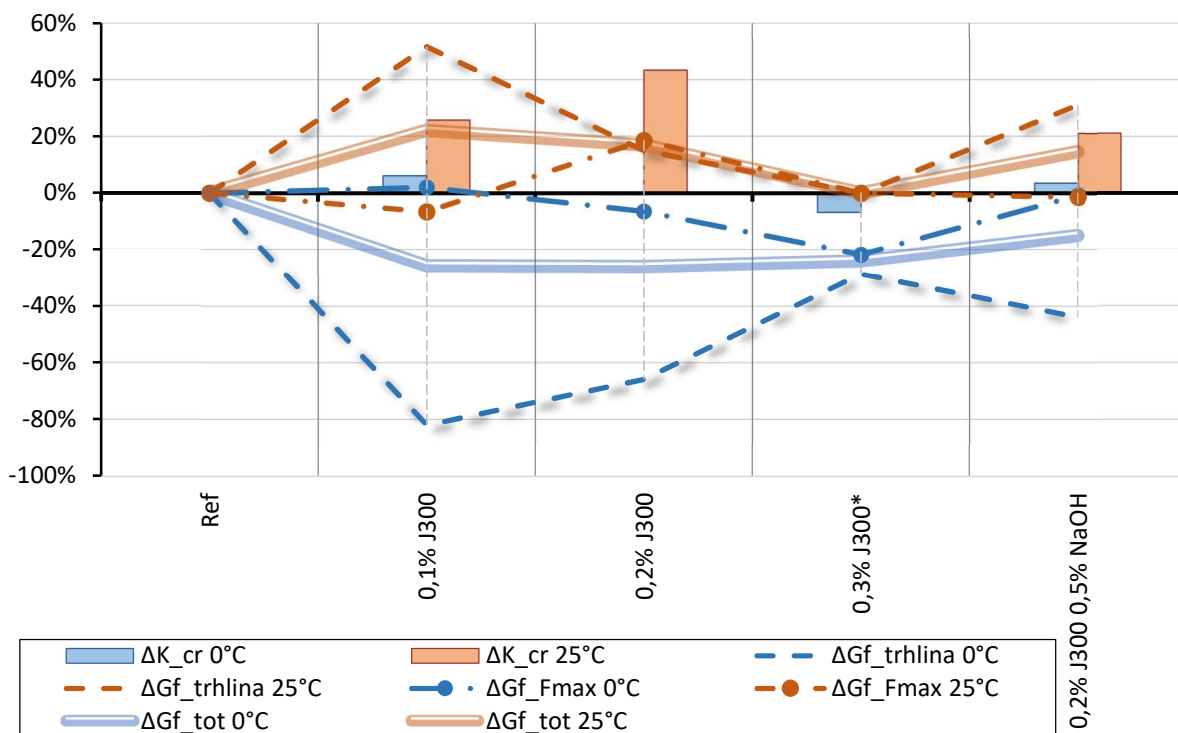
#### 4.4.4 Odolnosť voči šíreniu trhlín

Testovanie odolnosti voči šíreniu trhlín zmesí prinieslo nasledujúce, v niektorých prípadoch veľmi prekvapivé zistenia. Medzi najväčšie patrí všeobecne nižšia hodnota lomovej energie trhliny pri 0 °C ( $\Delta G_f$ \_trhlina 0°C) zmesí, v porovnaní s referenčnou zmesou. Túto sa podarilo v dvoch prípadoch len vyrovnať (zmesi 0,3 % J300 a 6%RF). Vlákna teda nepomohli túto hodnotu zvýšiť tak, ako to bolo pozorované pri predchádzajúcich typoch zmesí. Efekt bol pozorovaný v zmesiach s vláknami bez ohľadu na aplikáciu rejuvenátoru, ktorý by potenciálne mohol spôsobiť degradačné chemické reakcie pri vyšších teplotách. Koreň problému bude teda ležať inde. Čiastočné vysvetlenie môže priniesť vyššia tuhosť zmesí s vláknami a nasiakavosť rastlinných vlákien, ktoré absorbovali časť voľného spojiva. Túto teóriu mierne podporujú výsledky najlepších zmesí s rejuvenátormi, u ktorých došlo k poklesu rozdielu energie trhliny od referenčnej zmesi.

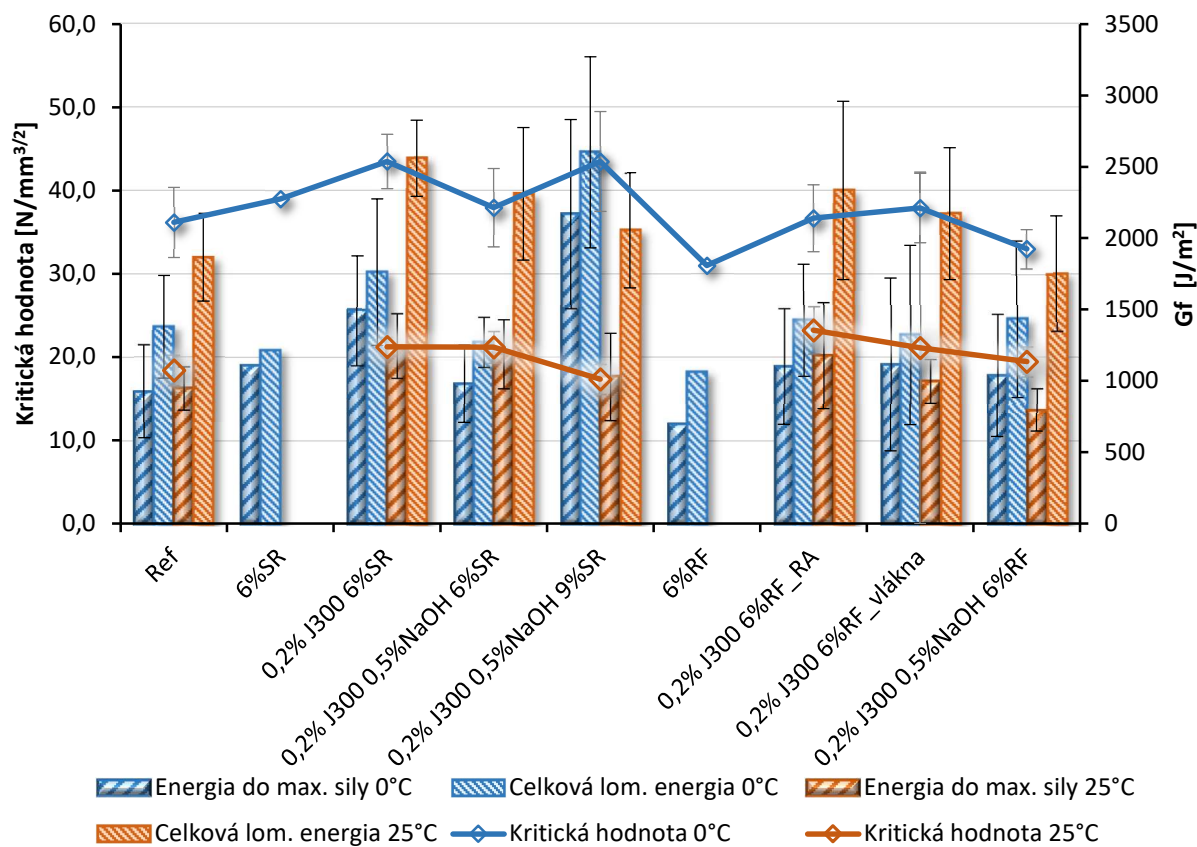


Obrázok 72: Lomové parametre zmesí ACP 16+ z 1. fázy výskumu.

Vlákna v zmesiach z 1. fázy výskumu fungovali dobre pri teplote 25 °C. Tu je potrebné uviesť, že zmes 0,3% J300 bola nedopatrením testovaná pri teplote 15 °C a preto bola vylúčená z percentuálneho porovnania (rozdiel 0 %). Kritická hodnota lomovej húževnatosti tejto zmesi pri „25 °C“ je uvedená len pre zaujímavosť. Pri ostatných zmesiach s vláknami bol zaznamenaný nárast kritickej hodnoty lomovej húževnatosti pri 25 °C.



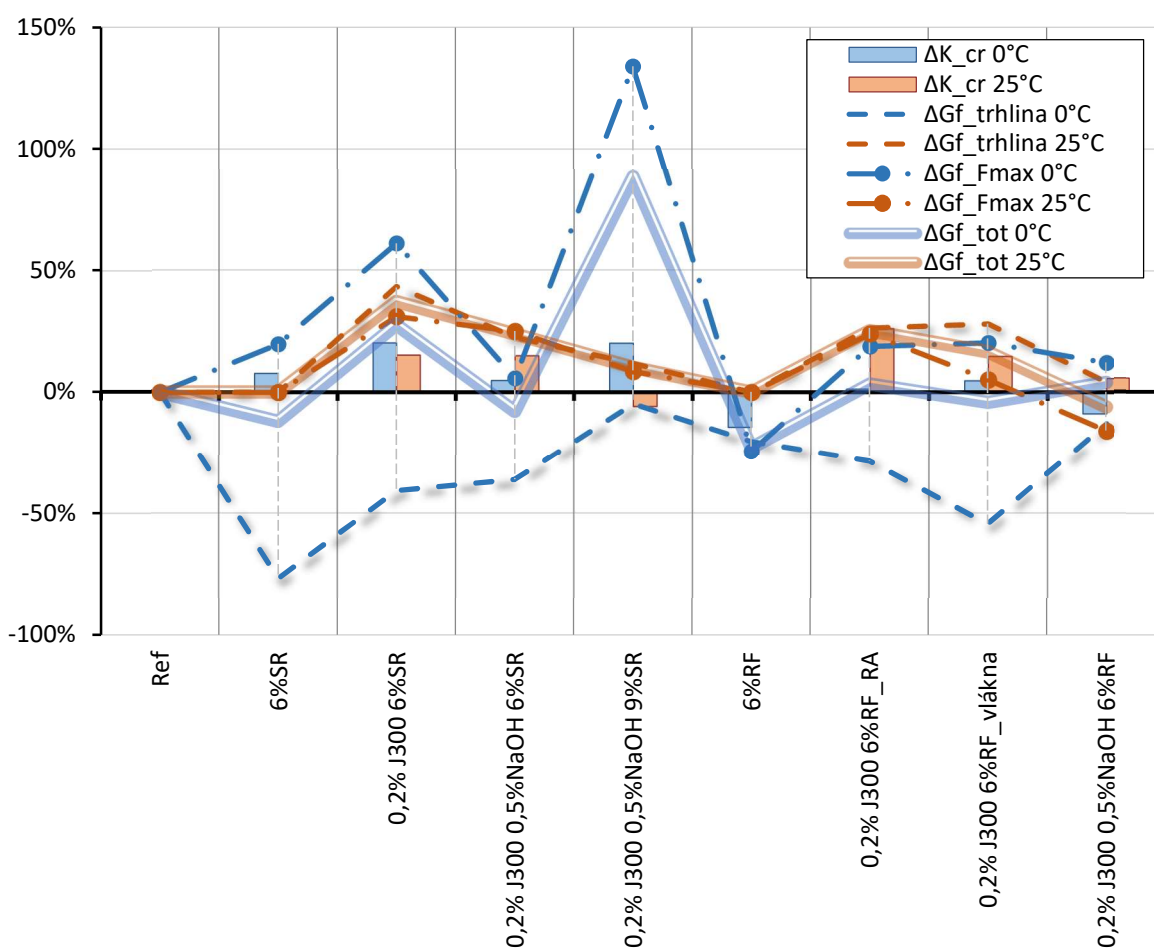
Obrázek 73: Percentuální rozdíly v lomových parametrech zmesí ACP 16+ z 1. fázy výskumu.



Obrázek 74: Lomové parametre zmesí ACP 16+ z 2. fázy výskumu.



U zmesí z rejuvenátormi došlo teda tiež k poklesu energie trhliny ( $\Delta G_f$ \_trhlna) pri 0 °C. Najvýraznejší pokles bol zaznamenaný u zmesi 6%SR. Pri ostatných zmesiach bol pokles mitigovaný a v dvoch prípadoch došlo aj k výraznejším nárastom celkovej lomovej energie (0,2% J300 6%SR a 0,5% NaOH 9%SR). Druhá menovaná dosiahla vôbec najvyššie hodnoty lomovej energie do maximálnej sily a celkovej lomovej energie, spolu s minimálnym rozdielom v energii trhliny. Ostatné zmesi vo všeobecnosti dosiahli vyššie hodnoty kritickej hodnoty lomovej húževnatosti. Parametre lomových energií pri 25 °C neboli žiaľ v prípade zmesí bez vlákien zaznamenané. Pri tejto teplote bol zaznamenaný došlo vo všeobecnosti ku miernemu nárastu lomových energií a až na zmes 0,5%NaOH 9%SR, aj k nárastu kritických hodnôt lomovej húževnatosti. Ako najlepšie možno pri 25 °C vyhodnotiť zmesi 0,2 J300 6%SR a 0,2% J300 6%RF\_RA. Mierne zlepšenie lomových parametrov bolo teda dosiahnuté aplikáciou rejuvenátora do R-materiálu.



Obrázok 75: Percentuálne rozdiely v lomových parametroch zmesí ACP 16+ z 2. fázy výskumu.





#### 4.4.5 Dynamický modul tuhosti

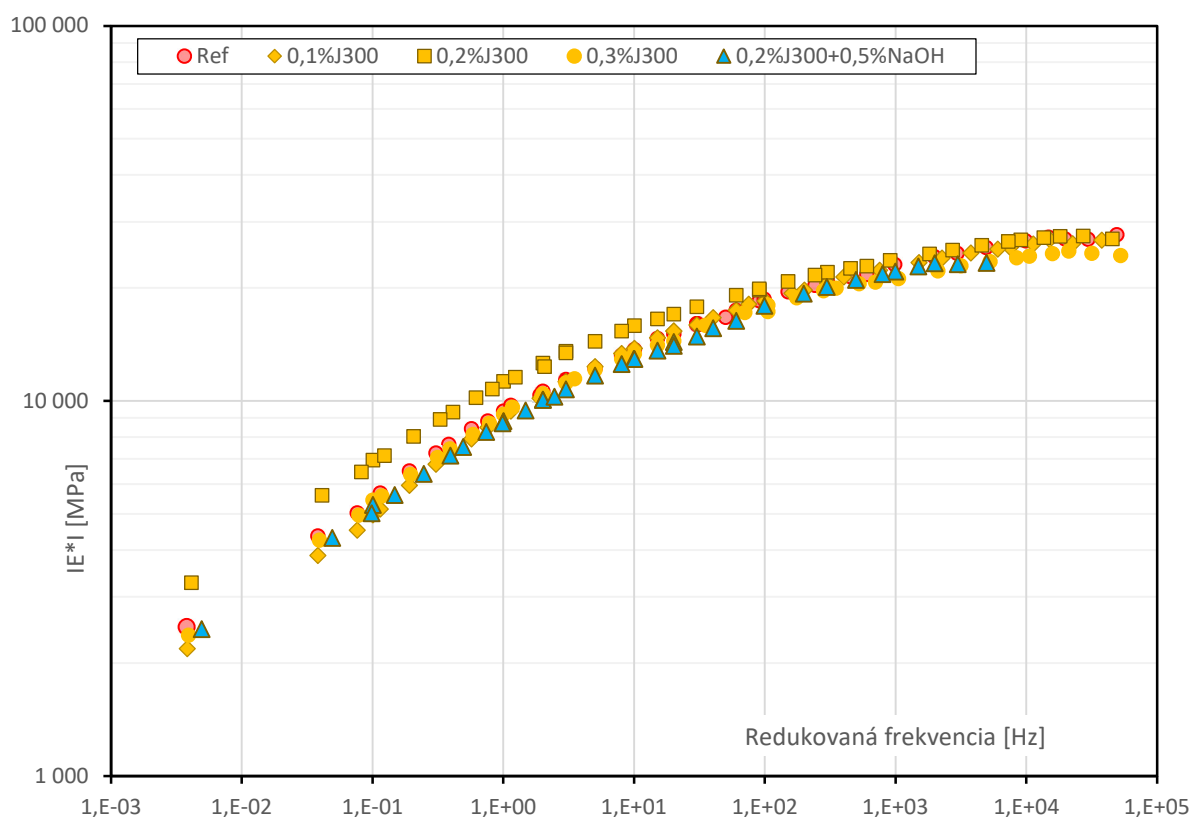
Skúška dynamického modulu tuhosti bola vykonaná na trémikovom telese skúšobnou metódou 4PB-PR podľa normy EN 12697-26. Skúška bola vykonaná pri štyroch teplotách: 0 °C, 10 °C, 20 °C a 30 °C a jedenástich zvolených skúšobných frekvenciách 50, 30, 20, 15, 10, 8, 5, 3, 2, 1 a 0,1 Hz pre každú teplotu. Táto skúška sa vykonáva pôsobením sínovej sily tak, aby bola dosiahnutá cieľová amplitúda deformácie 50 microstrain. Pôvodne sa mali skúšobné vzorky skúšať od najvyššej po najnižšiu teplotu, avšak na základe predchádzajúcich skúseností s touto skúškou bolo meranie pri 30 °C vykonané až na konci skúšobného procesu, čiže ako posledné po ostatných teplotách. Pri teplote 30 °C dochádza pri niektorých vzorkách opakovane k ich porušeniu a deformácii. Všeobecne sa dynamický modul používa na charakterizáciu lineárnej viskoelasticity asfaltových zmesí. Je dôležitou súčasťou novších mechanicko-empirických metodík pre navrhovanie vozoviek, ktoré sa používajú na zohľadnenie vplyvu teploty a miery zaťaženia na asfaltovú zmes vo fáze návrhu. Z hodnôt komplexného modulu pružnosti sa vykreslia izotermické krivky, ktoré sa následne posúvajú pomocou princípu časovo-teplotnej superpozície, kým krivky nesplynú do jednej hladkej funkcie. Táto funkcia sa nazýva riadiaca krivka (tzv. master curve). Riadiaca krivka predstavuje najkomplexnejší spôsob analýzy deformácie asfaltovej zmesi v širšom rozsahu podmienok.

Riadiace krivky všetkých zmesí zobrazených boli zostrojené pre referenčnú teplotu 20 °C s využitím princípu časovo-teplotnej superpozície. Hodnota dynamického komplexného modulu  $|E^*|$  predstavuje tuhosť materiálu, ktorá je nástrojom pre lepšie pochopenie rozloženia zaťaženia v štruktúre vozovky.

Pri pohľade na *Obrázok 76* je badateľný nárast tuhosti zmesi 0,2% J300 v oblasti vysokých a stredných teplôt, v porovnaní s referenčnou zmesou. Pri nízkych teplotách (vysokých frekvenciách) došlo k vyrovnaniu tuhosti. Tieto zistenia korešpondujú s testovaním tuhosti metódou IT-CY (kap. 4.4.3) a jedná sa o žiaduce správanie zmesi. Ostatné zmesi bez rejuvenátoru však koreláciu nepotvrdili a pri testovaní dynamického modulu tuhosti došlo k vyrovnaniu, či poklesu tuhosti. Najhoršie možno hodnotiť zmes 0,1% J300, kde z vyrovnanej oblasti nízkych teplôt nastal pokles tuhosti so znižujúcou sa frekvenciou zaťaženia (zvyšujúcou sa teplotou). Zmes s 0,3 % vlákien naopak zaznamenala žiaduci pokles



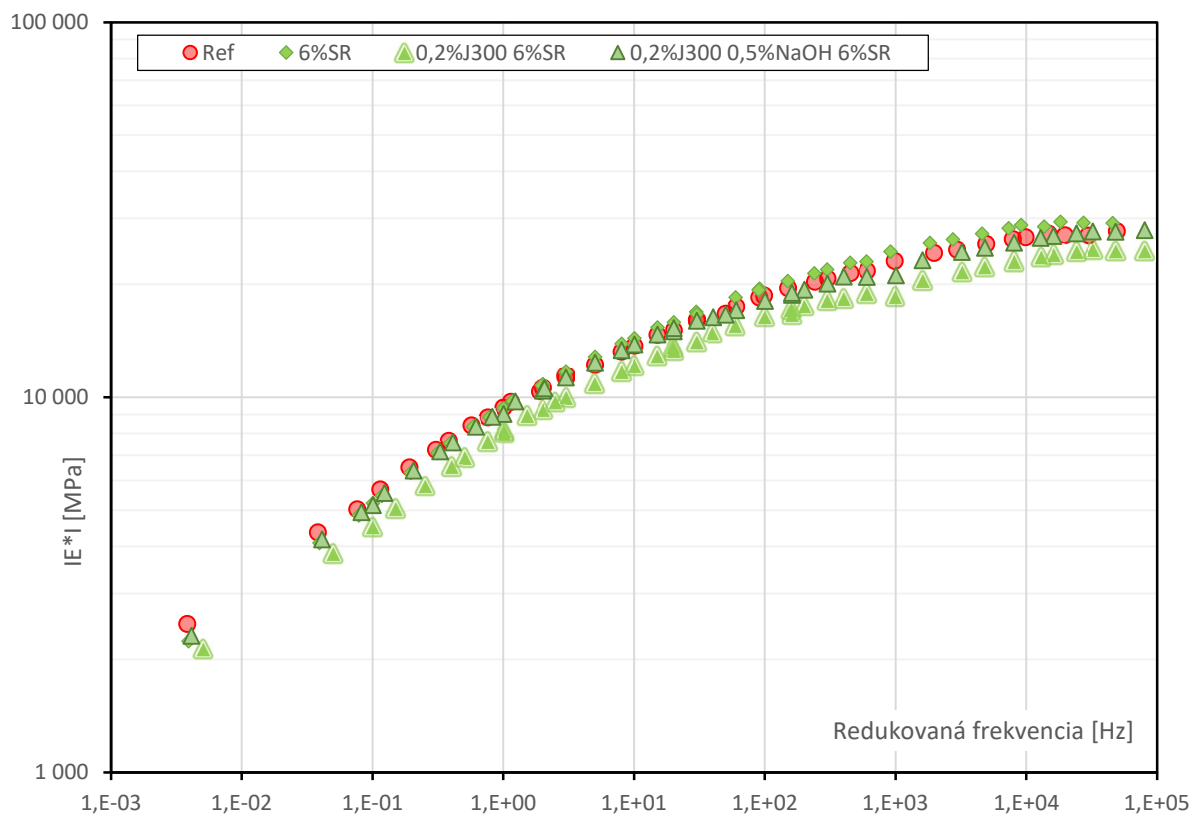
pri vysokých frekvenciách a snahu vyrovnať sa referenčnej zmesi v oblasti vysokých teplôt. Krivka tuhosti zmesi s mercerovanými vláknami v zásade kopírovala krivku referenčnej zmesi.



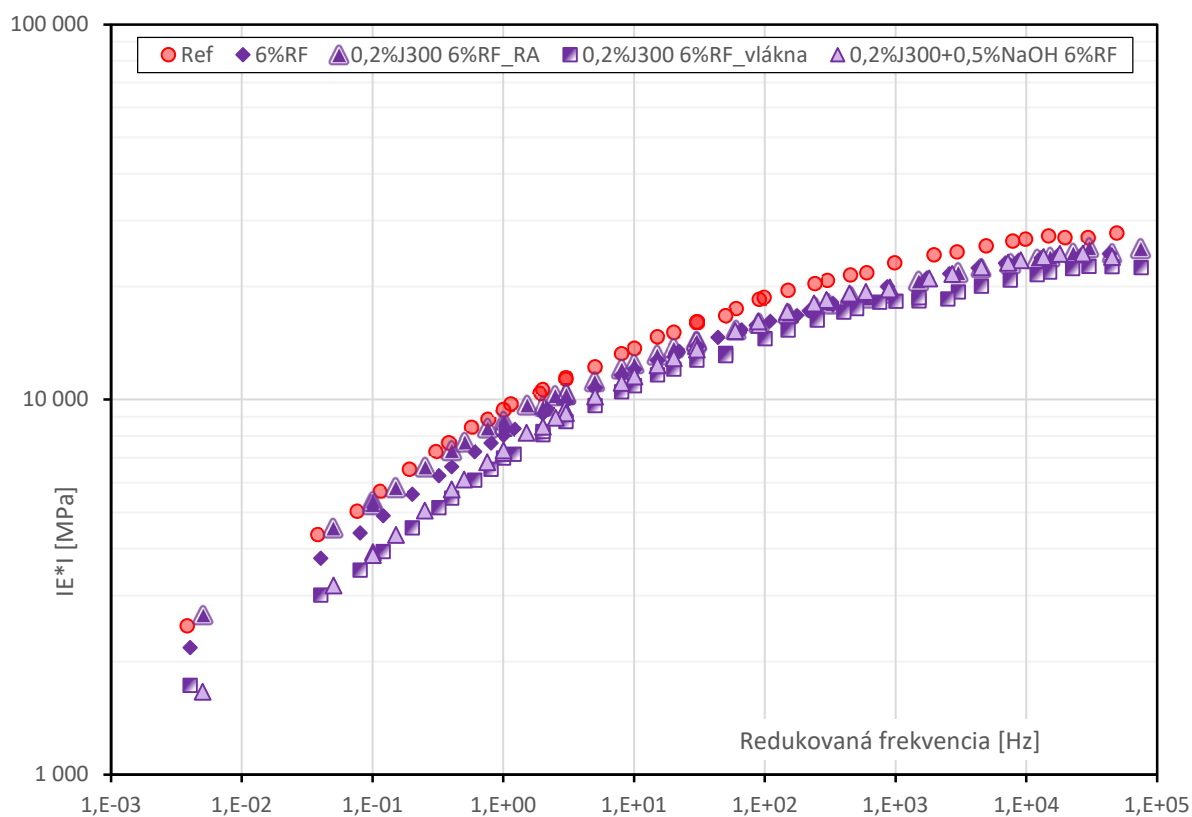
**Obrázok 76: Dynamický komplexný modul zmesí ACP 16+ bez rejuvenátoru.**

V zmesiach s rejuvenátorom „SR“ (Obrázok 77) bol zaznamenaný všeobecný pokles tuhosti. Výnimku tvorí zmes bez vlákien 6%SR, pri ktorej bol pokles zaznamenaný len v oblasti vysokých teplôt a naopak, nárast v oblasti nízkych teplôt. Toto nežiadúce správanie podporuje aj dosiahnutá vysoká hodnota teplotnej citlivosti z testovania tuhosti metódou IT-CY (kap. 4.4.3). Najnižšiu tuhosť v celom rozsahu frekvencií (teplôt) dosiahla zmes 0,2%J300 6%SR. Zmes s mercerovanými vláknami mala podobnú tuhosť, ako referenčná zmes. Krivky tuhosti obidvoch posledných menovaných zmesí kopírovali krivku referenčnej zmesi.

Na Obrázku 78 sú potom znázornené zmesi s rejuvenátorom „RF“, u ktorých došlo k najväčšiemu poklesu tuhosti. Žiadúce správanie nižšej tuhosti v oblasti vysokých frekvencií a zvýšenie tuhosti pri nízkych frekvenciách zaznamenala zmes 0,2%J300 6%RF\_RA. Opačný trend bol potom zaznamenaný pri zmesi s mercerovanými vláknami. Krivky zvyšných dvoch zmesí v zásade kopírovali referenčnú zmes.



Obrázok 77: Dynamický komplexný modul zmesí ACP 16+ s rejuvenátorom „SR“.



Obrázok 78: Dynamický komplexný modul zmesí ACP 16+ s rejuvenátorom „RF“.



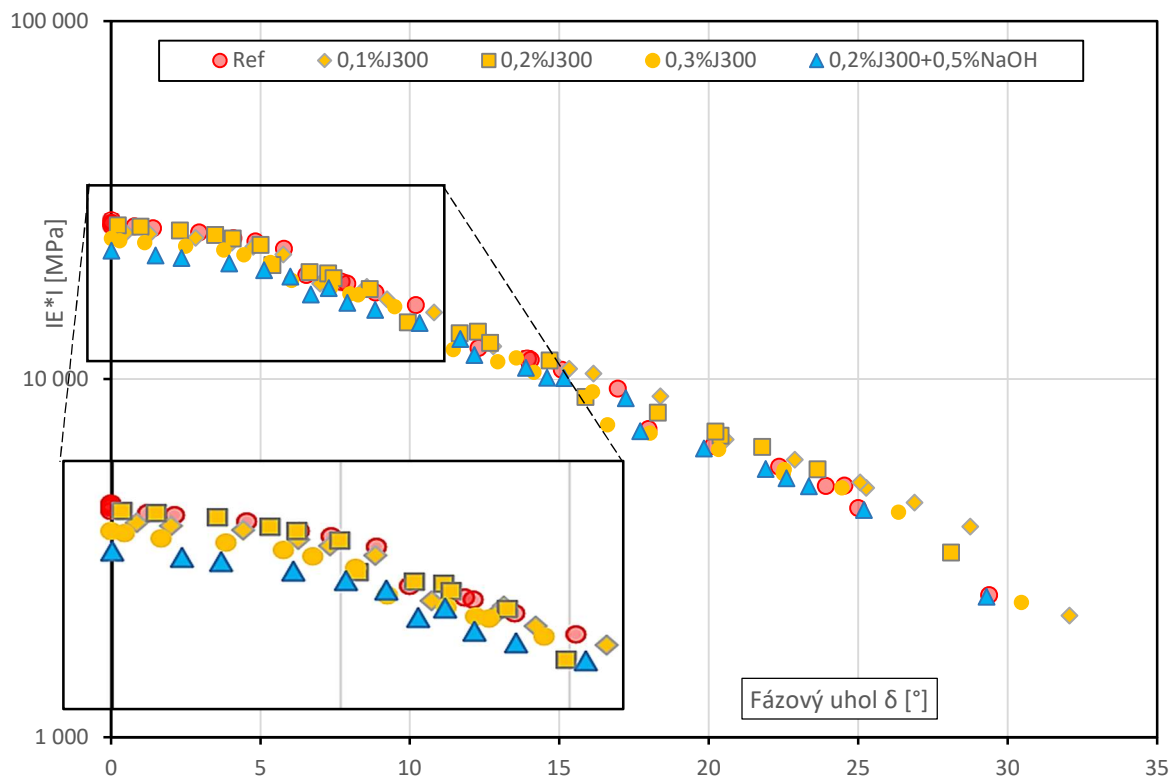
Black space diagram je graf dynamického komplexného modulu  $|E^*|$  v závislosti na fázovom uhle  $\delta$ . Je považovaný za cenný reologický nástroj, pretože umožňuje používateľom vyhodnotiť vzťah medzi tuhosťou materiálu a jeho pružnosťou nezávisle na princípe časovo-teplotnej superpozície. Je známe, že s rastúcim dynamickým modulom  $|E^*|$  a klesajúcim fázovým uhlom  $\delta$  má zmes väčšiu tendenciu k vzniku trhlín. Čo sa týka fázového uhla  $\delta$ , ten predstavuje elastickú (nízke hodnoty) alebo viskóznú prevahu zmesi.

U zmesí bez rejuvenátora (*Obrázok 79*) došlo k vyrovnaniu tuhostí pri nízkom fázovom uhle. Mierny pokles bol zaznamenaný pri zmesi s 0,3 % vlákien. Najvýraznejší pokles dosiahla zmes s mercerovanými vláknami. Táto zmes mala aj najlepšie výsledky odolnosti voči šíreniu trhlín pri 0 °C, spomedzi zmesí s vláknami a bez rejuvenátora (kap. 4.4.4). Zo zvyšujúcim sa fázovým uhlom sa tuhosť zmesí približovala k referenčnej zmesi, či dostávala nad jej úroveň.

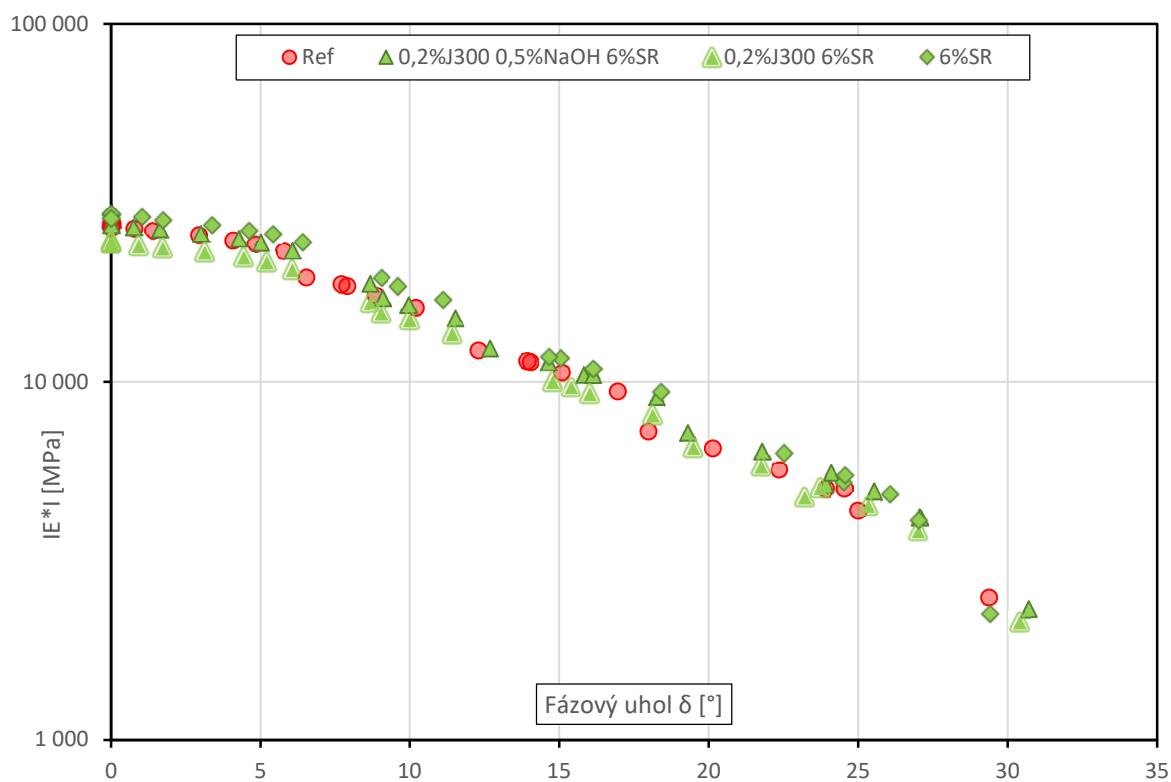
Tento trend bol pozorovaný aj pri zmesiach s rejuvenátorom „SR“ (*Obrázok 80*). V prípade zmesi bez vlákien však nastal nárast tuhosti už v oblasti nízkeho fázového uhlu, čo značí vyššie riziko vzniku trhlín. Zmes s mercerovanými vláknami mala v tejto oblasti rovnakú tuhosť. Z pohľadu rizika vzniku trhlín dopadla najlepšie zmes 0,2%J300 6%SR. Opäť tak možno nájsť koreláciu s kap. 4.4.4.

Aplikácia rejuvenátora „RF“ viedla k všeobecnému zníženiu tuhosti pri nízkych hodnotách fázového uhla. Dostať sa nad krivku referenčnej zmesi pri zvyšujúcom sa fázovom uhle sa však podarilo len zmesi s mercerovanými vláknami.

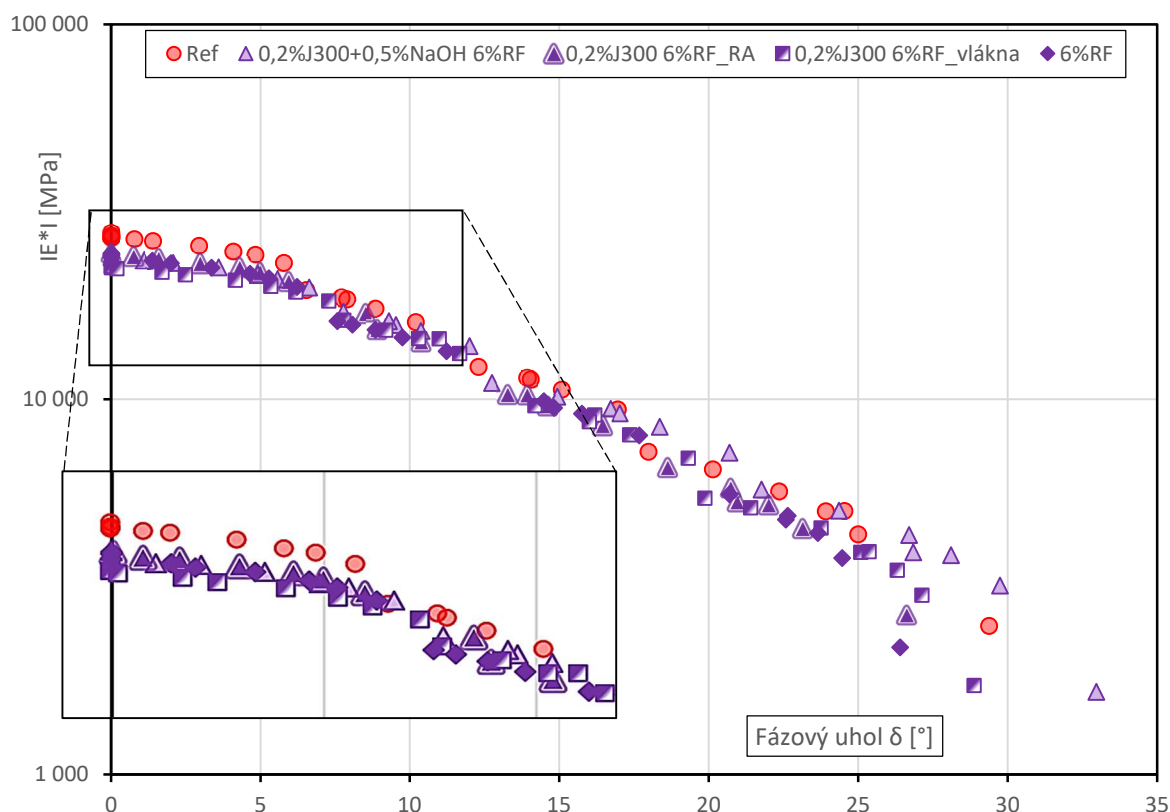
Po zmeraní komplexného modulu pružnosti pri všetkých skúšobných teplotách boli trámiky vystavené procesu tepelno-oxidačného starnutia, popísaného v kap. 4.1.6 (jeden z postupov z prEN 12697-52). Po starnutí boli trámiky následne testované na dynamický modul pružnosti pri teplotách 10 °C a 20 °C. Na základe výsledkov bol vypočítaný index starnutia ako pomer medzi hodnotou dynamického modulu po starnutí a pôvodnou hodnotou dynamického modulu. Čím je index starnutia nižší (v tomto prípade bližší jednej), tým je asfaltová zmes menej náchylná na starnutie, a tým je predpokladaná jej dlhšia životnosť. Hodnota nižšia ako 1,0 teda znamená nižšiu tuhosť po procese tepelno-oxidačného starnutia. Tá však zjavne môže byť spôsobená napr. aj vznikom mikrotrhlín pri namáhaní veľmi tvrdého zostarnutého spojiva, keďže tepelno-oxidačné testovanie spojiva pokles jeho tuhosti v žiadnom prípade neimplikuje (kap. 4.3).



Obrázok 79: Black space diagram zmesí ACP 16+ bez rejuvenátoru.



Obrázok 80: Black space diagram zmesí ACP 16+ s rejuvenátorom „SR“.



Obrázok 81: Black space diagram zmesí ACP 16+ s rejuvenátorom „RF“.

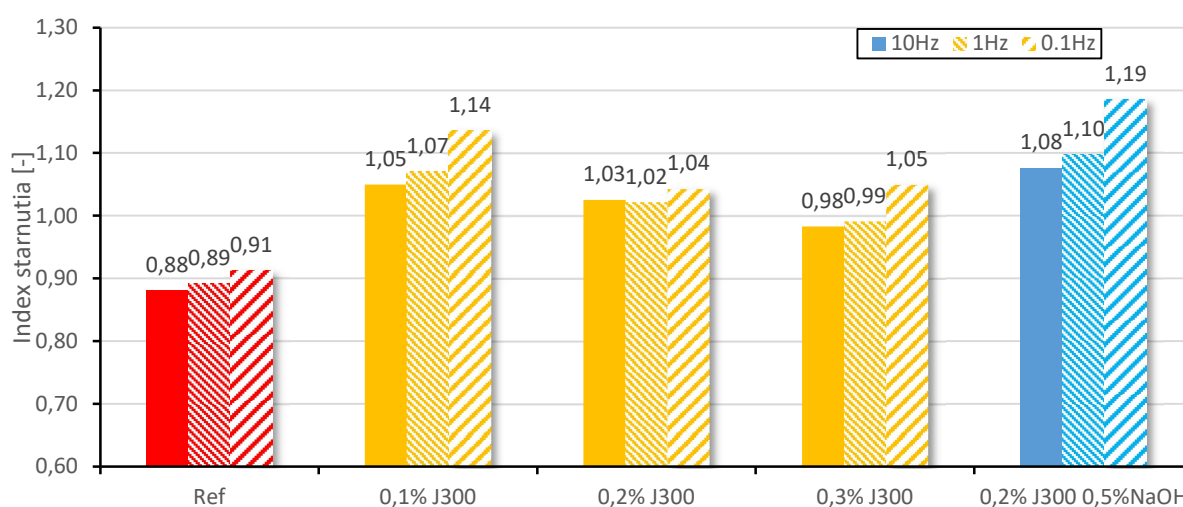
Ako bolo uvedené vyššie, testovanie dynamického modulu pružnosti sa vykonáva pri 11 frekvenciách. Vďaka nim je možné skúmať výkon v širšom rozsahu frekvencií a neobmedzovať sa na rezonanciu. V tejto súvislosti je na obrázkoch uvedený vplyv troch zvolených frekvencií - 0,1 Hz, 1 Hz a 10 Hz na index starnutia. Z výsledkov je zrejmé, že index starnutia rastie s poklesom frekvencie a frekvencia 0,1 Hz ilustruje frekvenciu, pri ktorej zmes vykazuje najväčšiu náchylnosť k starnutiu.

Rozdiely indexu starnutia medzi testovanými teplotami boli veľké. Pri teplote 10 °C dosiahla referenčná zmes hodnoty nižšie, ako 1,0 pri všetkých testovaných frekvenciách. Z tohto pohľadu sa jedná najlepšiu testovanú zmes. Pomerne výrazný pokles indexu starnutia pod 1,0 je však prekvapivý a nemôžem naň poskytnúť uspokojivé vysvetlenie. Vyššie spomenutá teória o mikrotrhlinách poskytuje čiastočné uspokojenie. U zmesí bez rejuvenátoru znamenal nárast obsahu vlákien pokles indexu starnutia. Navyše, zmes s mercerovanými vláknami dosiahla najvyššie sledované hodnoty, čo podporuje lepšie spolupôsobenie s matricou.

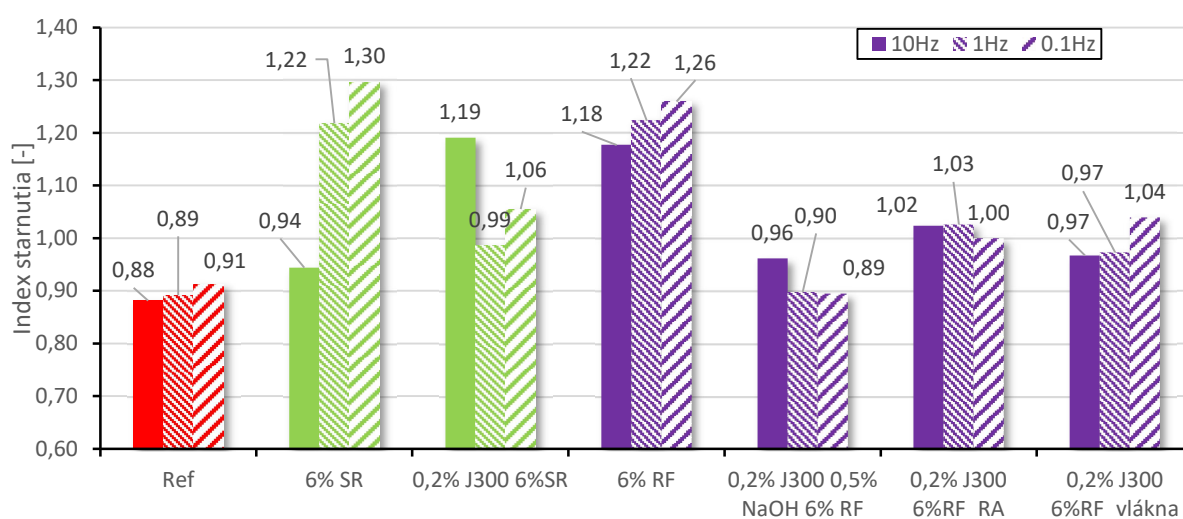
Po pridaní rejuvenátoru boli pri teplote 10 °C zaznamenané najvyššie indexy starnutia v zmesiach bez vlákien. Je všeobecne známe, že rejuvenačné prísady majú za úlohu



zmäkčovať zostarnuté spojivo v R-materiáli a pomáhajú mu vrátiť sa do „pôvodného“ stavu. Po zostarnutí sa výsledky s niektorými rejuvenačnými prísadami zhoršujú, čo by mal byť jeden z aspektov porovnania medzi rejuvenátormi s dobrým a trvalým účinkom na zostarnuté spojivo a tými s menej dlhodobým rejuvenačným účinkom. Taktiež je nutné uviesť, že asfaltové zmesi s nižším modulom tuhosti sú spravidla viac náchylné na starnutie (zvýšenie modulu tuhosti) ako tuhé asfaltové zmesi. Aj keď sa z *Obrázku 24* zdá, že nárast ketónov a sulfoxidov pokračuje lineárnym trendom do nekonečna, z princípu veci sa po nejakom čase reakcia musí spomaliť, keď sa zníži množstvo prekursorov chemických reakcií vedúcich k ich vzniku.



**Obrázok 82: Index starnutia zmesí bez rejuvenátoru. Testované pri 10 °C.**



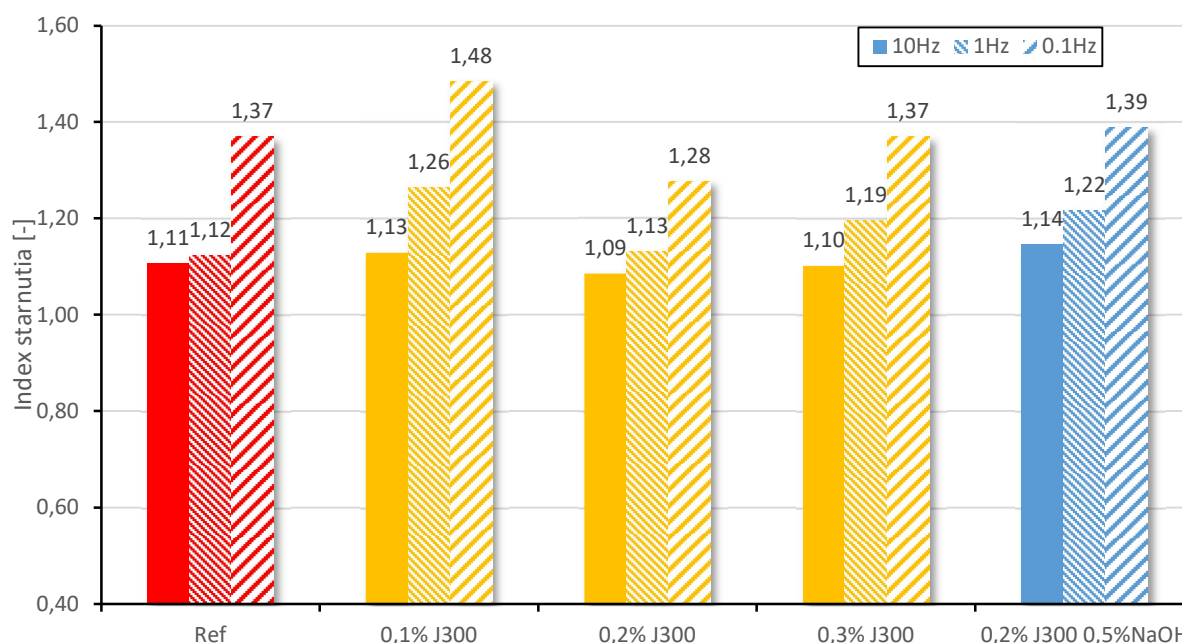
**Obrázok 83: Index starnutia zmesí s rejuvenátormi. Testované pri 10 °C.**



Zvýšenie teploty testovania na 20 °C viedlo k zvýšeniu indexu starnutia nad úroveň 1,0. U zmesí bez rejuvenátorov dopadla najlepšie zmes s 0,2 % vlákien a na opačnej strane spektra skončila zmes 0,1%J300.

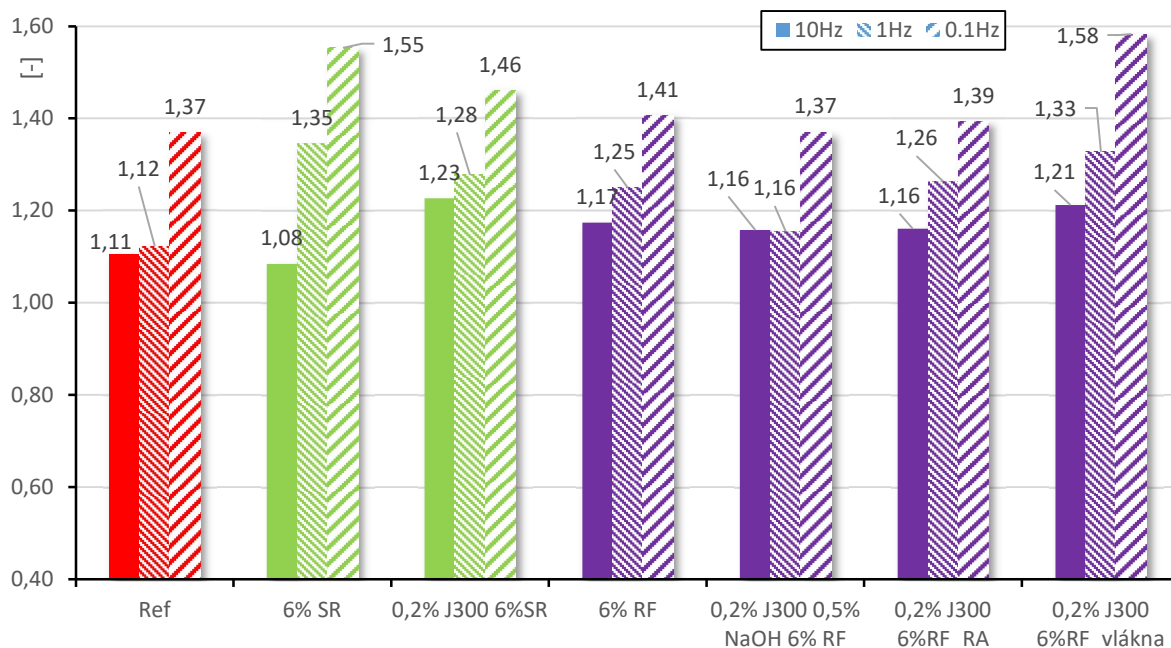
Po pridaní rejuvenátora „SR“ došlo v zmesi bez vlákien k zníženiu indexu starnutia pri frekvencii 10 Hz a naopak, táto prísada vykazovala najvyššie (najhoršie) hodnoty pri frekvencii 1 Hz aj 0,1 Hz v porovnaní so všetkými zmesami. Pridanie vlákien viedlo ku zvýšeniu hodnoty pri 10 Hz a k opačnému efektu pri zvyšných frekvenciách. Aplikácia rejuvenátora „RF“ viedla ku zvýšeniu indexu starnutia v porovnaní s referenčnou zmesou. Po pridaní vlákien tieto hodnoty mierne klesli pri všetkých frekvenciách. Ako mierne lepšia sa ukázala byť zmes s mercerovanými vláknami, čo potvrdilo trend z testovania pri 10 °C. Variácia aplikácie rejuvenátora na RA a na vlákna ukázala podobné hodnoty pri 10 °C a vyššie indexy starnutia pri 20 °C a zmesi 0,2% J300 6%RF\_vlákná.

Na určenie najlepšieho rejuvenátora podľa dlhodobého účinku je teda potrebné vziať do úvahy viac charakteristík. Prídavok jutových vlákien a testovanej teploty 20 °C znamenal najlepší výsledok pri všetkých frekvenciách v porovnaní s ostatnými zmesami.



Obrázok 84: Index starnutia zmesí bez rejuvenátora. Testované pri 20 °C.





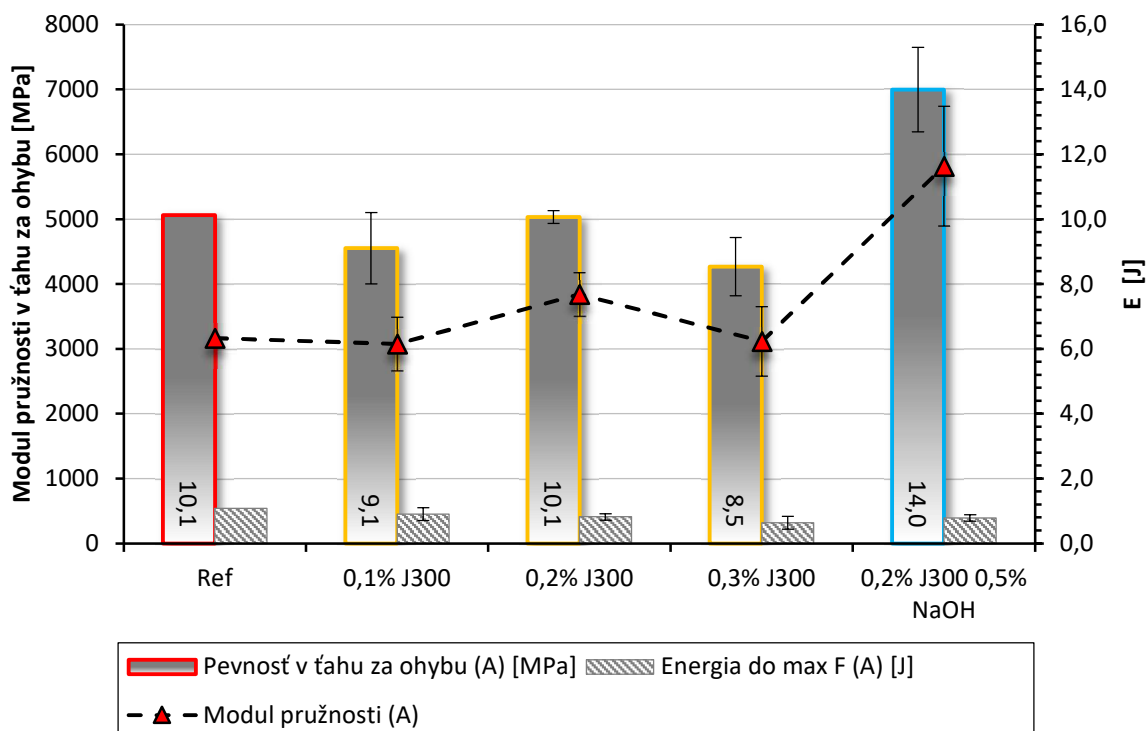
Obrázok 85: Index starnutia zmesí s rejuvenátormi. Testované pri 20 °C.

#### 4.4.6 Pevnosť v ťahu za ohybu

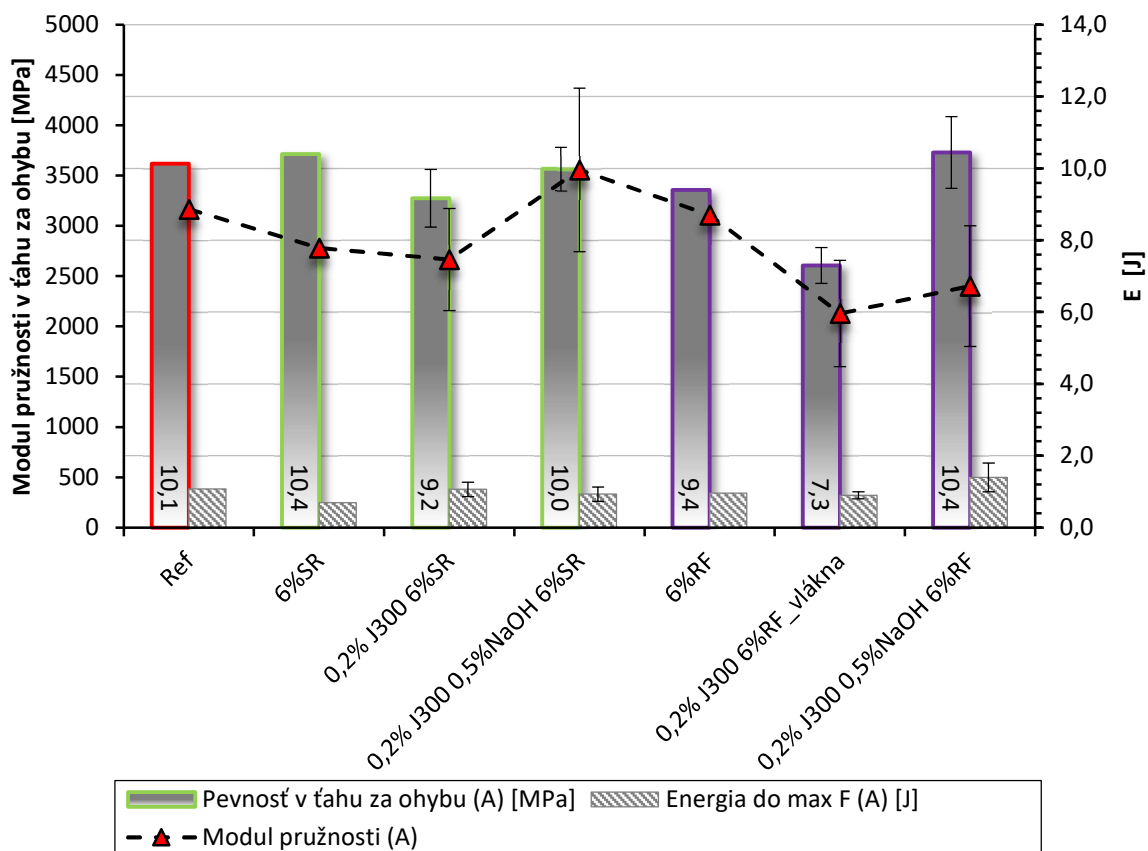
Všetky testované trávky boli už po procese tepelno-oxidačného starnutia (A).

Zo zmesí bez rejuvenátorov bola zaznamenaná najvyššia pevnosť v ťahu za ohybu a najvyšší modul pružnosti u zmesi s mercerovanými vláknami. Môže to byť dôsledok lepšieho spolupôsobenia matrice a vlákien, keďže pri ostatných zmesiach bol zaznamenaný skôr pokles pevnosti a rovnaký, či mierne vyšší modul pružnosti. Rovnako však došlo k poklesu lomovej energie do maximálnej sily pri všetkých zmesiach s vláknami. Okrem tak trochu odchylného výsledku zmesi s mercerovanými vláknami došlo k nárastu modulu pružnosti pri zmesi 0,2% J300. Výsledky teda z časti kopírujú hodnoty dosiahnuté pri testovaní dynamického modulu tuhosti (Obrázok 76). V tomto prípade sa však jedná o deštruktívnu skúšku, ktorá sa neodohráva len v elastickej oblasti.

Pridanie rejuvenátorov viedlo ku zvýšeniu modulu pružnosti len v prípade zmesi 0,2% J300 0,5%NaOH 6%SR. Zmes 6%RF vykázala rovnaký modul pružnosti a u ostatných bol zaznamenaný pokles. Oproti zmesiam bez rejuvenátorov však došlo k zvýšeniu lomových energií do maximálnej sily. Mercerizácia vlákien viedla opäť k zvýšeniu modulu pružnosti a pevnosti v ťahu za ohybu. Najnižšie hodnoty sledovaných charakteristík boli zaznamenané u zmesi s neošetrenými vláknami a rejuvenátormi.



Obrázok 86: Parametre testu pevnosti v ťahu za ohybu zmesí ACP 16+ z 1. fázy výskumu.



Obrázok 87: Parametre testu pevnosti v ťahu za ohybu vybraných zmesí ACP 16+ z 2. fázy výskumu.



## 5. ZÁVER

Zlepšovať vlastnosti vozoviek a predlžovať ich životnosť je smer, o ktorý sa ľudia snažia už od vzniku cestnej siete. 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 pridávaním zlepšujúcich prísad, ktoré na konci životného cyklu nebude možné efektívne recyklovať.

Ďalším aspektom problémov nielen s asfaltovými vozovkami, ale aj so spoločnosťou ľudí je extenzívne využívanie ropy a surovín z neobnoviteľných zdrojov. Následná nadmerná produkcia skleníkových plynov vedie ku globálnym zmenám klímy, ktoré ovplyvňujú životné prostredie na celej planéte Zem. Stále sa nájde veľa ľudí popierajúcich, či bagatelizujúcich tento fakt. Dáta o priemernej teplote, distribúcii úhrnu zrážok či výskyte extrémnych udalostí a vyčíslených škodách sú však v dnešnej dobe ľahko dostupné, rovnako ako vedecké články zaoberajúce sa týmto problémom.

Táto práca prináša snahu o zlepšenie vlastností asfaltových vozoviek pomocou rastlinných vlákien. Sú netoxické, biologicky odbúrateľné a ich produkcia vplýva na životné prostredie v minimálnej miere. Tým, že pri ich výrobe rastliny viažu CO<sub>2</sub> z atmosféry dokonca fungujú ako úložisko tohto skleníkového plynu. Oproti syntetickým alternatívam majú teda potenciál nezaťažovať životné prostredie po konci ich životnosti. Na druhú stranu, medzi ich hlavné nevýhody patrí hydrofilnosť, riziko predčasnej degradácie a otázná je taktiež ich funkčnosť po tepelnej záťaži a rokoch strávených vo vozovkách, ako bolo spomenuté v kapitolách 2.3 a 3.3. Výsledky testovania vlákien vo forme priadzí, obsiahnuté v tejto dizertačnej práci, ukázali ich reálnu tepelnú odolnosť. Pokles pevnosti v ťahu priadzí po tepelnej záťaži činil od 13 do 39 % a pevnosť v ťahu bola od 125 do 217 MPa. Dosiahnuté hodnoty ukazujú, že rastlinné vlákna majú dostatočnú pevnosť aj po tepelnom zaťažení odpovedajúcim procesom miešania a dopravy asfaltovej zmesi. Experimentálne bola preskúmaná aj absorpcia spojiva a kinetika transportu vody v priadzach a vplyv ošetrenia mercerizáciou a hydrofobizáciou. Ukázala rozdiely v spôsobe vedenia vody v závislosti na spôsobe ošetrenia vlákien.



Overenie vplyvu vybraných rastlinných vlákien na charakteristiky asfaltových zmesí prebehlo v troch typoch zmesí. Zvolené boli tak, aby odpovedali celej skladbe asfaltovej vozovky. Vo všeobecnosti výsledky priniesli nasledujúce zistenia:

- Pridanie rastlinných vlákien vedie k zvýšeniu medzerovitosti zmesi. S ich rastúcim množstvom rastie aj medzerovitosť. Súvisí to s vytvorením 3D štruktúry výstužných prvkov a so schopnosťou týchto materiálov absorbovať asfaltové spojivo. Vďaka poslednému dokážu plniť stabilizačnú funkciu v zmesiach s vyšším obsahom asfaltu.
- Rastlinné vlákna znižujú ITSR a zvyšujú citlivosť voči účinkom vody a mrazu. Pokles ITSR bol v niektorých prípadoch kompenzovaný nárastom absolútnych hodnôt pevností v priečnom ťahu, takže neklesli pod úroveň referenčnej zmesi ani za mokra.
- U zmesí s rastlinnými vláknami zaznamenaný nárast tuhosti, okrem zmesí z 1. fázy výskumu zmesi ACL 16+. K nárastu došlo hlavne v oblasti vyšších teplôt (nad 20 °C), čo viedlo k žiadanému zníženiu teplotnej citlivosti. Znamená to, že rastlinné vlákna majú potenciál zvyšovať odolnosť proti trvalým deformáciám a znižovať riziko výskytu mrazových trhlín. U spomínanej 1. fázy výskumu zmesi ACL 16+ sa zistilo, že zmesi s vláknami dlhými 40 mm vykazujú žiadané správanie zvyšovania tuhosti v oblasti vyšších teplôt a pomerne významné zníženie tuhosti pri 0 °C, keď zmes absolvovala len jeden miešací cyklus. Pri dĺžke vlákien 20 mm tento trend nebol pozorovaný.
- Zmesi s vláknami dosiahli podobné (nízke) hodnoty parametrov odolnosti proti trvalým deformáciám u zmesi SMA 11 S a v prípade zmesi ACL 16+ došlo k zníženiu priemernej hĺbky koľaje po 10 000 cykloch a  $PRD_{AIR}$  v porovnaní s referenčnou zmesou. Testovanie dynamického modulu tuhosti zmesi ACP 16+ taktiež indikovalo zlepšenie odolnosti proti trvalým deformáciám niektorých zmesí s rastlinnými vláknami.
- Predpoklad zníženia rizika tvorby mrazových trhlín zmesí s rastlinnými vláknami potvrdzujú výsledky zobrazené v Black space diagramoch zmesi ACP 16+ (časť 4.4.5) a tiež testovaním odolnosti voči šíreniu trhlín 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 badateľný rozdiel medzi fázami výskumu. V 1. fáze bol pri 0 °C bol 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. Druhá fáza výskumu priniesla, až na výnimky, všeobecné zlepšenie sledovaných parametrov odolnosti voči šíreniu trhlín. Zvýšenie teploty na 25 °C viedlo k nižšej lomovej húževnatosti, k rovnakej alebo vyššej lomovej energii do maximálnej sily a k vyšším hodnotám lomovej energie trhliny a celkovej energie u zmesí z 1. fázy výskumu a k všeobecnému nárastu lomových energií u zmesí z 2. fázy výskumu. Výsledky testovania zmesi **ACP 16+** s 30 % RA taktiež ukázali na rozdiely medzi testovacími fázami, resp. medzi 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. Pridanie rejuvenátorov viedlo k zvýšeniu sledovaných charakteristík, avšak lomová energia trhliny ostala stále pod úrovňou referenčnej zmesi. Tento prekvapujúci fenomén teda platil pre všetky zmesi ACP 16+ 30%RA s vláknami, bez rozdielu použitia rejuvenátora. Vyššia skúšobná teplota 25 °C znamenala, až na výnimky, zvýšenie sledovaných parametrov zmesí s rastlinnými vláknami.

- Skúška trojbodového ohybu paradoxne priniesla najvyššie zlepšenie sledovaných charakteristík 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. Možno konštatovať, že 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 mercerovanými vláknami. Naopak, pridanie neošetrených rastlinných vlákien a rejuvenátorov viedlo k najhorším výsledkom.
- Rastlinné priadze vykazujú nízku úroveň zabránenia stekania asfaltového spojiva v zmesi typu SMA.
- Doporučené dávkovanie rastlinných vlákien je 0,2 % pri zmesiach typu ACL a ACP a 0,3 % u zmesi typu SMA. Ukázalo sa, že zmes je lepšie homogenizovaná, pokiaľ je prierez priadze rozpadnutý na jednotlivé vlákna. V ideálnom prípade by malo dôjsť k predobaleniu vlákien. To je dôležité v zmesiach s nižším obsahom pridávaného asfaltu a rovnako aj pre praktickú aplikáciu na obalovni asfaltových zmesí, kde sa miešacie časy pohybujú v rádoch sekúnd.



- Všeobecne odporúčaná dĺžka výstužných elementov z rastlinných vlákien je 20 mm. Podľa dosiahnutých výsledkov je však zrejmé, že sa môže líšiť v závislosti od žiadaného efektu. Rovnako boli dosiahnuté zaujímavé výsledky pomocou použitia rôznych dĺžok elementov zamiešané do jednej zmesi. Testovaný pomer rôznych dĺžok bol 50:50, avšak opäť sa môže líšiť.
- Ošetrovanie rastlinných vlákien hydrofobizáciou neprineslo významné zlepšenie hodnoty ITSR, avšak viedlo k nárastu objemovej hmotnosti telies, pevnosti v priečnom ťahu, modulov tuhosti a lomovej húževnatosti. Odolnosť proti trvalým deformáciám bola najlepšia pri kombinácii hydrofobizácie a mercerizácie.
- Mercerizácia rastlinných vlákien vedie k vyššej medzerovitosti asfaltových zmesí.
- Rastlinné vlákna majú malý, či žiadny vplyv na zvyšovanie tuhosti pri starnutí asfaltových zmesí.

Aj napriek vyššie uvedeným zisteniam a snahe priniesť komplexný pohľad na problematiku použitia rastlinných vlákien v asfaltových zmesiach ostali niektoré časti výskumu neprebádané. Jedná sa najmä o zistenie únavových charakteristík zmesí, ktoré by viedlo k poznatku, či tieto prísady môžu predĺžiť životnosť vozoviek pod cyklickým zaťažením. Taktiež by v ideálnom prípade malo dôjsť k prevereniu správania rastlinných vlákien v reálnej vozovke pri všetkých externých vplyvoch, či už od zaťaženia dopravou alebo klimatických a biologických činiteľov. Na druhú stranu, táto práca priniesla cenné poznatky, ktoré otvárajú dvere k ďalším cestičkám na poli cestného inžinierstva. Osobne považujem za dôležité venovať sa hlbšie téme ošetrovania vlákien. Aj keď sa v realite stavebného trhu jedná o zvyšovanie nákladov na výrobu prísady, výsledky dokazujú, že môže ísť o perspektívnu cestu. Benefity vytvorenia prísady so stabilným a žiadaným správaním, ktoré by viedlo k zlepšeniu prevádzkových vlastností a k predĺženiu životnosti môžu ospravedlniť vyššiu cenu. Súčasne bude vhodné, pokiaľ budú rastlinné vlákna získavané z odpadných surovín. Pokiaľ by náhodou došlo k renesancii pestovania ľanu a konope v našich krajoch, cena týchto materiálov by zaznamenala pokles. Pozitívom je ekologicky nenáročné pestovanie a možnosť spracovať celé rastliny, dokonca pre výrobu produktov s vyššou pridanou hodnotou. Cesta k reálnemu uplatneniu rastlinných vlákien v asfaltových zmesiach je teda stále dlhá. Počiatočný kúsok z nej je však už známy a ukazuje nám, že rastlinné vlákna môžu plniť výstužnú funkciu v asfaltových zmesiach.



## LITERATÚRA

- [1] Historical Estimates of World Population. In: *United States Census Bureau* [online]. 2022 [cit. 2023-06-05]. Dostupné z: <https://www.census.gov/data/tables/time-series/demo/international-programs/historical-est-worldpop.html>
- [2] ROSER, Max, Esteban ORTIZ-OSPINA a Hannah RITCHIE. *Life Expectancy* [online]. In: . 2013 [cit. 2023-06-05]. Dostupné z: <https://ourworldindata.org/life-expectancy>
- [3] PETR, Hýzl. PRAKTICKÉ APLIKACE V POZEMNÍCH KOMUNIKACÍCH: MODUL 6. In: [Http://lences.cz](http://lences.cz) [online]. Brno: VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ, FAKULTA STAVEBNÍ, 2006, 2015-12-07 [cit. 2015-12-07]. Dostupné z: <http://lences.cz/skola/subory/-%20-%20PREDMETY%20%20%28semester%20I%20-%2010%29%20-%20-%20-6-semester/-%20BM02%20-%20Pozemni%20komunikace%20II/Prednasky/T%C3%A9ma%207%20text%20-%20Asfaltov%C3%A9%20sm%C4%9Bsi.pdf>
- [4] MONDSCHNEIN, Petr. *Silniční stavby 2: Přednáška č.1 - Úvod*. In: [Files.mondy.webnode.cz](http://files.mondy.webnode.cz) [online]. Praha: ČVUT Fakulta stavební, -, 2015 [cit. 2015-12-07]. Dostupné z: <http://files.mondy.webnode.cz/200000453-7f321802be/p%C5%99edn%C3%A1%C5%A1ka%201%20student.pdf>
- [5] TP 82: Katalog *poruch netuhých vozovek*. -. -: Ministerstvo dopravy, 2010.
- [6] MCDANIEL, Rebecca. *Fiber additives in asphalt mixtures*. 1. Washington, DC: Transportation Research Board of the National Academies, 2015, pages cm. ISBN 9780309271776.
- [7] SAAR, T. a O. TALVIK. Automatic Asphalt pavement crack detection and classification using Neural Networks. In: 2010 *12th Biennial Baltic Electronics Conference* [online]. IEEE, 2010, s. 345-348 [cit. 2023-06-09]. ISBN 978-1-4244-7356-4. Dostupné z: [doi:10.1109/BEC.2010.5630750](https://doi.org/10.1109/BEC.2010.5630750)
- [8] LING, Meng, Yu CHEN, Sheng HU, Xue LUO a Robert LYTTON. Enhanced model for thermally induced transverse cracking of asphalt pavements. *Construction and Building*



- Materials [online]. 2019, 206, 130-139 [cit. 2023-06-10]. ISSN 09500618. Dostupné z: doi:10.1016/j.conbuildmat.2019.01.179
- [9] LUO, Yao, Hao WU, Weimin SONG, Jian YIN, Yiqun ZHAN, Jia YU a Surajo ABUBAKAR WADA. Thermal fatigue and cracking behaviors of asphalt mixtures under different temperature variations. *Construction and Building Materials* [online]. 2023, **369** [cit. 2023-06-10]. ISSN 09500618. Dostupné z: doi:10.1016/j.conbuildmat.2023.130623
- [10] Review of Low-Temperature Crack (LTC) Developments in Asphalt Pavements. *The International Journal of Multiphysics* [online]. 2018, 12(2) [cit. 2023-06-10]. ISSN 17509548. Dostupné z: doi:10.21152/1750-9548.12.2.169
- [11] CANESTRARI, Francesco a Lorenzo INGRASSIA. A review of top-down cracking in asphalt pavements: Causes, models, experimental tools and future challenges. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)* [online]. 2020, **7**(5), 541-572 [cit. 2023-06-23]. ISSN 20957564. Dostupné z: doi:10.1016/j.jtte.2020.08.002
- [12] MONDSCHNEIN, Petr. Silniční stavby 3: Přednáška 4 - Poruchy netuhých vozovek. In: Mondy.webnode.cz [online]. Praha: ČVUT Fakulta stavební, -, - [cit. 2015-12-13].
- [13] CEYLAN, Halil, Kasthurirangan GOPALAKRISHNAN a Robert LYTTON. Neural Networks Modeling of Stress Growth in Asphalt Overlays due to Load and Thermal Effects during Reflection Cracking. *Journal of Materials in Civil Engineering* [online]. 2011, 23(3), 221-229 [cit. 2023-06-10]. ISSN 0899-1561. Dostupné z: doi:10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000153
- [14] SLABEJ, Martin. Degradáční funkcia priečnej nerovnosti. In: Silnice-Železnice [online]. Ostrava: KONSTRUKCE Media, s.r.o., 2013, s. 6 [cit. 2023-06-10]. ISSN 1803-8441. Dostupné z: <http://old.silnice-zeleznice.cz/clanek/degradacna-funkcia-priecej-nerovnosti/>
- [15] KOWALSKI, Karol, Jan KRÓL, Piotr RADZISZEWSKI et al. Eco-friendly Materials for a New Concept of Asphalt Pavement. *Transportation Research Procedia* [online]. 2016, **14**, 3582-3591 [cit. 2023-06-23]. ISSN 23521465. Dostupné z:





doi:10.1016/j.trpro.2016.05.426

- [16] 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
- [17] 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
- [18] 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>
- [19] 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
- [20] 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
- [21] CHEN, Huaxin, Qinwu XU, Shuanfa CHEN a Zhengqi ZHANG. *Evaluation and design of fiber-reinforced asphalt mixtures*. Materials & Design [online]. 2009, 30(7), 2595-2603 [cit. 2023-06-25]. ISSN 02613069. Dostupné z: doi:10.1016/j.matdes.2008.09.030
- [22] JIA, Haichuan, Huaxin CHEN, Yanping SHENG, Jiandang MENG, Shian CUI, Y. KIM, Shouchao HUANG a Hao QIN. *Effect of laboratory aging on the stiffness and fatigue cracking of asphalt mixture containing bamboo fiber*. Journal of Cleaner Production [online]. 2022, 333 [cit. 2023-06-26]. ISSN 09596526. Dostupné z:



doi:10.1016/j.jclepro.2021.130120

- [23] YU, Demei, Anming JIA, *Chao FENG*, *Wendi LIU*, Tengfei FU a Renhui QIU. Preparation and mechanical properties of asphalt mixtures reinforced by modified bamboo fibers. *Construction and Building Materials* [online]. 2021, 286 [cit. 2023-06-26]. ISSN 09500618. Dostupné z: doi:10.1016/j.conbuildmat.2021.122984
- [24] ZHAO, Hua, Bowen GUAN, Rui XIONG a Aiping ZHANG. Investigation of *the Performance of Basalt Fiber Reinforced Asphalt Mixture*. *Applied Sciences* [online]. 2020, 10(5) [cit. 2023-06-25]. ISSN 2076-3417. Dostupné z: doi:10.3390/app10051561
- [25] QIN, Xiao, Aiqin SHEN, Yinchuan GUO, Zhennan LI a Zhenghua LV. *Characterization of asphalt mastics* reinforced with basalt fibers. *Construction and Building Materials* [online]. 2018, **159**, 508-516 [cit. 2023-06-25]. ISSN 09500618. Dostupné z: doi:10.1016/j.conbuildmat.2017.11.012
- [26] Overview of materials for Polyethylene Terephthalate (PET), *Unreinforced*. In: *MatWeb: Material property data* [online]. [cit. 2023-06-27]. Dostupné z: <https://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=a696bdcdff6f41dd98f8eec3599eaa20&ckck=1>
- [27] TAPIA-PICAZO, J., J. LUNA-BÁRCENAS, A. GARCÍA-CHÁVEZ, R. GONZALEZ-NUÑEZ, A. BONILLA-PETRICIOLET a A. ALVAREZ-CASTILLO. Polyester fiber production using virgin and recycled PET. *Fibers and Polymers* [online]. 2014, 15(3), **547-552** [cit. 2023-06-27]. ISSN 1229-9197. Dostupné z: doi:10.1007/s12221-014-0547-7
- [28] Mechanical Properties Of Polyester Fiber. In: *Huacaifiber.com* [online]. [cit. 2023-06-27]. Dostupné z: <https://www.huacaifiber.com/news/mechanical-properties-of-polyester-fiber-34855715.html>
- [29] RAHMAN, Md a Abbas *MOHAJERANI*. *Use of bitumen* encapsulated cigarette butts in stone mastic asphalt. *Construction and Building Materials* [online]. 2020, 261. ISSN 09500618. Dostupné z: doi:10.1016/j.conbuildmat.2020.120530
- [30] JIN, *Jimei*, Zhaorong WU, Jin SONG a Xue LIU. Research on the road performance of



- cigarette butts modified asphalt mixture. *Journal of Physics: Conference Series* [online]. 2019, **1168**. ISSN 1742-6588. Dostupné z: doi:10.1088/1742-6596/1168/2/022053
- [31] TATARANNI, Piergiorgio a Cesare SANGIORGI. *A Preliminary Laboratory Evaluation on the Use of Shredded Cigarette Filters as Stabilizing Fibers for Stone Mastic Asphalts*. *Applied Sciences* [online]. 2021, 11(12). ISSN 2076-3417. Dostupné z: doi:10.3390/app11125674
- [32] BASTOLA, Nitish, Mena SOULIMAN, Ashish TRIPATI a Alexander PEARSON. *Mechanistic Analysis and Economic Benefits of Fiber-Reinforced Asphalt Overlay Mixtures*. *JOURNAL OF MATERIALS AND ENGINEERING STRUCTURES* [online]. 2020, 7, 83-96 [cit. 2023-06-29]. ISSN 2170-127X. Dostupné z: <https://revue.ummtto.dz/index.php/JMES/article/view/2237>
- [33] When will fossil fuels run out?. In: *MET.com* [online]. 2021 [cit. 2023-06-30]. Dostupné z: <https://group.met.com/en/mind-the-fyouture/mindthefyouture/when-will-fossil-fuels-run-out>
- [34] When will we run out of fossil fuels?. In: *FairPlanet.org* [online]. 2023 [cit. 2023-06-30]. Dostupné z: <https://www.fairplanet.org/story/when-will-we-run-out-of-fossil-fuels/>
- [35] Does the world have enough oil to meet our future needs?. In: *Eia.gov* [online]. U.S. Energy Information Administration, 2021 [cit. 2023-06-30]. Dostupné z: <https://www.eia.gov/tools/faqs/faq.php?id=38&t=6>
- [36] SANTER, Benjamin, Stephen PO-CHEDLEY, Lilong ZHAO et al. *Exceptional stratospheric contribution to human fingerprints on atmospheric temperature*. *Proceedings of the National Academy of Sciences* [online]. 2023, 120(20) [cit. 2023-08-07]. ISSN 0027-8424. Dostupné z: doi:10.1073/pnas.2300758120
- [37] VON DER GATHEN, Peter, Rigel KIVI, Ingo WOHLTMANN, Ross SALAWITCH a Markus REX. *Climate change favours large seasonal loss of Arctic ozone*. *Nature Communications* [online]. 2021, 12(1) [cit. 2023-08-07]. ISSN 2041-1723. Dostupné z: doi:10.1038/s41467-021-24089-6



- [38] ABIOLA, O.S., W.K. KUPOLATI, E.R. SADIKU a J.M. NDAMBUKI. *Utilisation of natural fibre as modifier in bituminous mixes: A review*. *Construction and Building Materials* [online]. 2014, 54, 305-312 [cit. 2023-06-30]. ISSN 09500618. Dostupné z: doi:10.1016/j.conbuildmat.2013.12.037
- [39] ETALE, Anita, Amaka ONYIANTA, Simon TURNER a Stephen EICHHORN. *Cellulose: A Review of Water Interactions, Applications in Composites, and Water Treatment*. *Chemical Reviews* [online]. 2023, 123(5), 2016-2048 [cit. 2023-06-30]. ISSN 0009-2665. Dostupné z: doi:10.1021/acs.chemrev.2c00477
- [40] KUMAR GUPTA, Praveen, Shreeya SAI RAGHUNATH, Deepali VENKATESH PRASANNA et al. *An Update on Overview of Cellulose, Its Structure and Applications*. In: RODRÍGUEZ PASCUAL, Alejandro a María E. EUGENIO MARTÍN, ed., Alejandro RODRÍGUEZ PASCUAL, María E. EUGENIO MARTÍN. *Cellulose* [online]. IntechOpen, 2019 [cit. 2023-06-30]. ISBN 978-1-83968-056-4. Dostupné z: doi:10.5772/intechopen.84727
- [41] SCHELLER, Henrik a Peter ULVSKOV. *Hemicelluloses*. *Annual Review of Plant Biology* [online]. 2010, 61(1), 263-289 [cit. 2023-07-01]. ISSN 1543-5008. Dostupné z: doi:10.1146/annurev-arplant-042809-112315
- [42] ZIMNIEWSKA, Malgorzata. *Hemp Fibre Properties and Processing Target Textile: A Review*. *Materials* [online]. 2022, 15(5) [cit. 2023-07-06]. ISSN 1996-1944. Dostupné z: doi:10.3390/ma15051901
- [43] 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
- [44] TELI, M. a Sanket VALIA. *Acetylation of Jute fiber to improve oil absorbency*. *Fibers and Polymers* [online]. 2013, 14(6), 915-919 [cit. 2023-07-04]. ISSN 1229-9197. Dostupné z: doi:10.1007/s12221-013-0915-8
- [45] SHAHINUR, Sweety, Mahbub HASAN, Qumrul AHSAN a Julfikar HAIDER. *Effect of Chemical Treatment on Thermal Properties of Jute Fiber Used in Polymer Composites*.



- Journal of Composites Science* [online]. 2020, 4(3) [cit. 2023-07-02]. ISSN 2504-477X. Dostupné z: doi:10.3390/jcs4030132
- [46] Příze. In: *Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-2015, 2015-11-12 [cit. 2015-12-16]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/P%C5%99%C3%ADze>*
- [47] Interní norma č . 12-108-01/01: *Definice. Geometrické vlastnosti staplových přízí. -. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2002.*
- [48] WANG, Xue, Lulu CHANG, Xiaolong SHI a Lihai WANG. *Effect of Hot-Alkali Treatment on the Structure Composition of Jute Fabrics and Mechanical Properties of Laminated Composites. Materials* [online]. 2019, 12(9) [cit. 2023-07-28]. ISSN 1996-1944. Dostupné z: doi:10.3390/ma12091386
- [49] GALLO, Peter. *Využití přírodních vláken v asfaltových směsích. Praha, 2016. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta stavební. Vedoucí práce Petr Mondschein, Ph.D.*
- [50] REDELIUS, Per a Hilde SOENEN. *Relation between bitumen chemistry and performance. Fuel* [online]. 2015, 140, 34-43 [cit. 2023-07-04]. ISSN 00162361. Dostupné z: doi:10.1016/j.fuel.2014.09.044
- [51] CAMARGO, Ingrid, Bernhard HOFKO, Johannes MIRWALD a Hinrich GROTHE. *Effect of Thermal and Oxidative Aging on Asphalt Binders Rheology and Chemical Composition. Materials* [online]. 2020, 13(19) [cit. 2023-07-04]. ISSN 1996-1944. Dostupné z: doi:10.3390/ma13194438
- [52] PETERSEN, J. a Ronald GLASER. *Asphalt Oxidation Mechanisms and the Role of Oxidation Products on Age Hardening Revisited. Road Materials and Pavement Design* [online]. 2011, 12(4), 795-819 [cit. 2023-07-05]. ISSN 14680629. Dostupné z: doi:10.3166/rmpd.12.795-819
- [53] MANNA, Suwendu, Prosenjit SAHA, Debasis ROY, Ramkrishna SEN, Basudam ADHIKARI a Sancharini DAS. *Enhanced biodegradation resistance of biomodified jute fibers.*



- Carbohydrate Polymers* [online]. 2013, 93(2), 597-603 [cit. 2023-07-05]. ISSN 01448617. Dostupné z: doi:10.1016/j.carbpol.2012.11.061
- [54] GHABCHI, Rouzbeh a Marco PEREIRA CASTRO. *Effect of laboratory-produced cellulose nanofiber as an additive on performance of asphalt binders and mixes*. *Construction and Building Materials* [online]. 2021, 286 [cit. 2023-07-05]. ISSN 09500618. Dostupné z: doi:10.1016/j.conbuildmat.2021.122922
- [55] LI, Ning, He ZHAN, Xin YU, Wei TANG a Qinglei XUE. *Investigation of the aging behavior of cellulose fiber in reclaimed asphalt pavement*. *Construction and Building Materials* [online]. 2021, 271 [cit. 2023-07-05]. ISSN 09500618. Dostupné z: doi:10.1016/j.conbuildmat.2020.121559
- [56] VISKOVIĆ, Jelena, Valtcho ZHELJAZKOV, Vladimír SIKORA, Jay NOLLER, Dragana LATKOVIĆ, Cynthia OCAMB a Anamarija KOREN. *Industrial Hemp (Cannabis sativa L.) Agronomy and Utilization: A Review*. *Agronomy* [online]. 2023, 13(3) [cit. 2023-07-06]. ISSN 2073-4395. Dostupné z: doi:10.3390/agronomy13030931
- [57] EKUNDAYO, Gbenga. *Reviewing the Development of Natural Fiber Polymer Composite: A Case Study of Sisal and Jute*. *American Journal of Mechanical and Materials Engineering* [online]. 2019, 3(1) [cit. 2023-08-05]. ISSN 2639-9628. Dostupné z: doi:10.11648/j.ajmme.20190301.11
- [58] Prirodni rostlinna vlakna.ppt - KMT. In: *Www.kmt.tul.cz [online]*. -: Katedra materiálů, Technická univerzita v Liberci, -, - [cit. 2015-12-16]. Dostupné z: [http://www.kmt.tul.cz/edu/podklady\\_kmt\\_magistri/NEkM/NeM%20Kro/prirodni%20rostlinna%20vlakna.ppt](http://www.kmt.tul.cz/edu/podklady_kmt_magistri/NEkM/NeM%20Kro/prirodni%20rostlinna%20vlakna.ppt)
- [59] BURITATUM, Apinun, Apichat SUDDEEPPONG, Kongsak AKKHARAWONGWHATTHANA, Suksun HORPIBULSUK, Teerasak YAOWARAT, Menglim HOY, Arul ARULRAJAH a Ahmad RASHID. *Hemp Fiber-Modified Asphalt Concretes with Reclaimed Asphalt Pavement for Low-Traffic Roads*. *Sustainability* [online]. 2023, 15(8) [cit. 2023-07-08]. ISSN 2071-1050. Dostupné z: doi:10.3390/su15086860



- [60] SALEEM, Muhammad, Shafaqat ALI, Saddam HUSSAIN et al. *Flax (Linum usitatissimum L.): A Potential Candidate for Phytoremediation? Biological and Economical Points of View*. *Plants* [online]. 2020, 9(4) [cit. 2023-07-06]. ISSN 2223-7747. Dostupné z: doi:10.3390/plants9040496
- [61] RAHMAN, Khussboo, Naznin AHMED, Md. RAIHAN, Farzana NOWROZ, Faria JANNAT, Mira RAHMAN a Mirza HASANUZZAMAN. *Jute Responses and Tolerance to Abiotic Stress: Mechanisms and Approaches*. *Plants* [online]. 2021, 10(8) [cit. 2023-07-06]. ISSN 2223-7747. Dostupné z: doi:10.3390/plants10081595
- [62] BANERJEE, Prabir a Mahuya GHOSH. *Studies on jute–asphalt composites*. *Journal of Applied Polymer Science* [online]. 2008, 109(5), 3165-3172 [cit. 2023-07-06]. ISSN 00218995. Dostupné z: doi:10.1002/app.28325
- [63] HAMAD, Sameer, Nicola STEHLING, C. HOLLAND, J.P. FOREMAN a C. RODENBURG. *Low-Voltage SEM of Natural Plant Fibers: Microstructure Properties (Surface and Cross-Section) and their Link to the Tensile Properties*. *Procedia Engineering* [online]. 2017, **200**, 295-302 [cit. 2023-07-27]. ISSN 18777058. Dostupné z: doi:10.1016/j.proeng.2017.07.042
- [64] *Natural Fibre Composites in Structural Components: Alternative Applications for Sisal?*. In: [Http://www.fao.org](http://www.fao.org) [online]. [cit. 2015-12-24]. Dostupné z: <http://www.fao.org/docrep/004/Y1873E/y1873e0a.htm>
- [65] ČSN EN 12697 - 30+A1. *Asfaltové směsi - Zkušební metody - Část 30: Příprava zkušebních těles rázovým zhutňovačem*. Praha: Česká agentura pro standardizaci, 2007.
- [66] ČSN EN 12697 - 29. *Asfaltové směsi - Zkušební metody - Část 29: Stanovení rozměrů asfaltových zkušebních těles*. Praha: Česká agentura pro standardizaci, 2003.
- [67] ČSN EN 12697 - 33. *Asfaltové směsi - Zkušební metody - Část 33: Příprava zkušebních těles zhutňovačem desek*. Praha: Česká agentura pro standardizaci, 2005.
- [68] ČSN EN 12697 - 6. *Asfaltové směsi - Zkušební metody - Část 6: Stanovení objemové hmotnosti asfaltového zkušebního tělesa*. Praha: Česká agentura pro standardizaci,



2012.

- [69] ČSN EN 12697 - 5. *Asfaltové směsi - Zkušební metody - Část 5: Stanovení maximální objemové hmotnosti*. Praha: Česká agentura pro standardizaci, 2010.
- [70] ČSN EN 12697 - 12. *Asfaltové směsi - Zkušební metody - Část 12: Stanovení odolnosti zkušebního tělesa vůči vodě*. Praha: Česká agentura pro standardizaci, 2009.
- [71] ČSN EN 12697 - 23. *Asfaltové směsi - Zkušební metody - Část 23: Stanovení pevnosti v příčném tahu*. Praha: Česká agentura pro standardizaci, 2007.
- [72] ČSN EN 12697 - 22+A1. *Asfaltové směsi - Zkušební metody - Část 22: Zkouška pojiždění kolem*. Praha: Česká agentura pro standardizaci, 2007.
- [73] SHAHINUR, Sweety, Mahbub HASAN, Qumrul AHSAN, Nayer SULTANA, Zakaria AHMED a Julfikar HAIDER. Effect of Rot-, Fire-, and Water-Retardant Treatments on Jute Fiber and Their Associated Thermoplastic Composites: A Study by FTIR. *Polymers* [online]. 2021, **13**(15) [cit. 2023-07-20]. ISSN 2073-4360. Dostupné z: doi:10.3390/polym13152571





## ZOZNAM OBRÁZKOV

Obrázok 1: Konštrukcia asfaltovej vozovky .....	7
Obrázok 2: Vznik mrazovej trhliny v závislosti od teploty a ťahovej pevnosti vozovky [10] ...	10
Obrázok 3: Mechanizmus vzniku mrazovej trhliny vo vozovke [8] .....	10
Obrázok 4: Trhlina typu „top-down“ od zaťaženia dopravou [11] .....	11
Obrázok 5: Schéma vzniku trhlín typu „bottom-up“ [13] .....	12
Obrázok 6: Sieťové trhliny [10] .....	12
Obrázok 7: Trvalé deformácie vozovky s asfaltovým krytom - koľaje [14] .....	13
Obrázok 8: Mechanizmus funkcie vlákien v asfaltovej zmesi pri namáhaní v priečnom ťahu [19] .....	15
Obrázok 9: Zmes aramidových a polyolefínových vlákien od firmy FORTA® .....	23
Obrázok 10: Jutové vlákna s repkovým olejom a) pred teplotnou záťažou b) po teplotnej záťaži 150 °C a 2 hodinách.....	26
Obrázok 11: Štruktúrny vzorec celulózy [39] .....	29
Obrázok 12: Schematický prierez vlákna a stavba bunkovej steny rastlín. [39] .....	29
Obrázok 13: Výsledky testu kinetiky transportu vody v jutovej priadzi.....	32
Obrázok 14: Detail testovaných vzoriek v 5. až 10. minúte testu. Zľava: 20% 1h., HF, HF 2% 2h. a ref. ....	33
Obrázok 15: Schematické znázornenie vplyvu vody na rastlinné vlákna v asfaltovej matrici. Časť a) reprezentuje východzí stav, b) vlákna po napučaní a c) zmraštenie vlákna po desorpcii vody. ....	33
Obrázok 16: Súprava na nanášanie spojiva na priadze a schéma spôsobu nanášania.....	34
Obrázok 17: Termogravimetrická krivka jutového vlákna. Prechodový bod (1), bod termálnej stability (2), aktivačný bod (3) a reziduálny bod (4). [45] .....	36
Obrázok 18: Priemer priadze $d$ a substančný priemer priadze $d_s$ [47] .....	37
Obrázok 19: Jutová priadza v 10% roztoku NaOH.....	38
Obrázok 20: Detail jutového vlákna (g) pred a (h) po mercerizácii 6 % NaOH, 120 °C a 90 min. [48] .....	39
Obrázok 21: Pevnosť v ťahu testovaných priadzí. V časti napravo (R) sú vzorky po teplotnej záťaži.....	39



Obrázok 22: Modul pružnosti v ťahu testovaných priadzí. Napravo (R) sú vzorky po teplotnej záťaži.....	40
Obrázok 23: Pokles ťahového napätia a modulu pružnosti po teplotnej záťaži .....	41
Obrázok 24: Kinetika formovania ketónov a sulfoxidov (ľavá zvislá os) a prírastok viskozity (pravá zvislá os) v závislosti na čase (v hodinách). Test dlhodobého starnutia PAV (80 °C a 2,03 MPa). [52] .....	43
Obrázok 25: Hlavné reakčné cesty duálneho oxidačného mechanizmu asfaltu. Rýchle reakčné obdobie na začiatku oxidácie (a) a pomalé reakčné obdobie po zvyšok doby oxidácie (b). [52] .....	44
Obrázok 26: Detail elementárneho vlákna ľanu (vľavo) a juty. [63] .....	50
Obrázok 27: Elementy testovaných priadzí. Zľava: konope 100x3 tex, ľan 500 tex a juta 300 tex. Konopná priadza bola zložená z 3 nití s jemnosťou 100 tex. Ich mierny zákrut dovoľoval ľahký rozpad po nastrihaní na požadovanú dĺžku elementov. ....	51
Obrázok 28: Skúšobné čeľuste v priebehu skúšky stanovenia pevnosti v priečnom ťahu. ....	53
Obrázok 29: Zariadenie pre meranie modulu tuhosti metódou IT-CY.....	54
Obrázok 30: Konfigurácia testu odolnosti voči trhlinám. ....	55
Obrázok 31: Malé skúšobné zariadenie pre skúšku vyjazďovania kolesom. ....	56
Obrázok 32: Ukážka strihania priadzí na výstužné prvky. ....	57
Obrázok 33: Objemová hmotnosť (zelená čiara) s medzerovitou (biele stĺpce) zmesí SMA 11 S. Červené bodkované čiary vymedzujú limity pre skúšky typu, čiarkované pre kontrolné skúšky. ....	58
Obrázok 34: ITSR a pevnosť v priečnom ťahu zmesí SMA 11 S s 0,1% a 0,6% obsahom vlákien. ....	60
Obrázok 35: ITSR a pevnosť v priečnom ťahu zmesí SMA 11 S s 0,3% obsahom vlákien. ....	60
Obrázok 36: Moduly tuhosti zmesí SMA 11 S 0,1% a 0,6% pri 0 °C, 15 °C a 27 °C.....	61
Obrázok 37: Moduly tuhosti zmesí SMA 11 S 0,1% a 0,6% pri 0 °C, 15 °C a 27 °C.....	62
Obrázok 38: Krivky modulu tuhosti v závislosti na teplote vybraných zmesí SMA 11 S.....	62
Obrázok 39: Odolnosť voči šíreniu trhlín zmesí SMA 11 S s 0,1 % vlákien.....	63
Obrázok 40: Odolnosť voči šíreniu trhlín zmesí SMA 11 S s 0,2 % a 0,3 % vlákien. ....	64
Obrázok 41: Percentuálne rozdiely lomových parametrov zmesí SMA od referenčnej (Scell 0,3%). ....	64
Obrázok 42: Odolnosť voči šíreniu trhlín zmesí SMA 11 S s 0,6 % vlákien.....	65



Obrázok 43: Parametre testu pevnosti v ťahu za ohybu zmesí SMA 11 S a 0,3 % vlákien. ....	66
Obrázok 44: Elementy priadze dĺžky 20 mm (vľavo) a jednotlivé vlákna po rozpade prierezu. .....	68
Obrázok 45: Detail elementu ľanovej priadze po jednom miešacom cykle.....	69
Obrázok 46: Obj. hmotnosť (zelená čiara) s medzerovitosťou (biele stĺpce) zmesí ACL 16+ z 1. fázy výskumu. Červené bodkované čiary značia limity pre skúšky typu, čiarkované pre kontrolné skúšky. ....	70
Obrázok 47: Objemová hmotnosť a medzerovitosť zmesí ACL 16+ z 2. fázy výskumu. ....	70
Obrázok 48: ITSR a pevnosť v priečnom ťahu zmesí ACL 16+ v 1. fáze výskumu. ....	72
Obrázok 49: ITSR a pevnosť v priečnom ťahu zmesí ACL 16+ v 2. fáze výskumu. ....	72
Obrázok 50: Moduly tuhosti zmesí ACL 16+. Dĺžka vlákien 20 mm, 1. fáza výskumu. ....	73
Obrázok 51: Moduly tuhosti zmesí ACL 16+. Dĺžka vlákien 40 mm, 1. fáza výskumu. ....	73
Obrázok 52: Rozdiel modulov tuhosti v závislosti na čase miešania: JX_01 - JX_02.....	74
Obrázok 53: Moduly tuhosti zmesí ACL 16+. 2. fáza výskumu.....	74
Obrázok 54: Priebeh tuhosti v závislosti od teploty vybraných zmesí ACL 16+ z 2. fázy výskumu.....	75
Obrázok 55: Detail tuhosti v závislosti od teploty vybraných zmesí ACL 16+ z 2. fázy výskumu. .....	76
Obrázok 56: Odolnosť voči šíreniu trhlín zmesí ACL 16+ z 1. fázy výskumu. ....	77
Obrázok 57: Percentuálne rozdiely lomových parametrov zmesí ACL 16+ z 1. fázy výskumu.	77
Obrázok 58: Percentuálne rozdiely lomovej energie trhliny zmesí ACL 16+ z 1. fázy výskumu. .....	78
Obrázok 59: Odolnosť voči šíreniu trhlín zmesí ACL 16+ z 2. fázy výskumu. ....	78
Obrázok 60: Percentuálne rozdiely lomových parametrov zmesí ACL 16+ z 2. fázy výskumu.	79
Obrázok 61: Detail telesa zmesi J2_01 po teste odolnosti voči šíreniu trhlín pri 0 °C. Šípka ukazuje na odhalené jutové vlákno po strate adhézie spojiva. ....	80
Obrázok 62: Parametre testu pevnosti v ťahu za ohybu vybraných zmesí ACL 16+.....	82
Obrázok 63: Sitový rozbor zmesi ACP 16+ 50/70 30 % RA.....	83
Obrázok 64: Schéma plánu výroby zmesí ACP 16+. ....	84
Obrázok 65: Nastrihané elementy jutovej priadze, aplikácia spojiva na jednotlivé vlákna po rozpade prierezu a vlákna obalené spojivom, pripravené na zamiešanie do zmesi.....	85



Obrázok 66: Medzerovitost' zmesí ACP 16+. Bodkované čiary vymedzujú limity pre skúšku typu.....	86
Obrázok 67: Citlivosť voči účinkom vody a mrazu zmesí ACP 16+ z 1. fázy výskumu.....	87
Obrázok 68: Citlivosť voči účinkom vody a mrazu zmesí ACP 16+ z 2. fázy výskumu.....	88
Obrázok 69: Obalené jutové vlákna so zvyškom spojiva pri výrobe zmesí ACP 16+ 30%RA 0,2% J300.....	89
Obrázok 70: Moduly tuhosti zmesí ACP 16+ z 1. fázy výskumu.....	90
Obrázok 71: Moduly tuhosti zmesí ACP 16+ z 2. fázy výskumu.....	90
Obrázok 72: Lomové parametre zmesí ACP 16+ z 1. fázy výskumu.....	91
Obrázok 73: Percentuálne rozdiely v lomových parametroch zmesí ACP 16+ z 1. fázy výskumu.....	92
Obrázok 74: Lomové parametre zmesí ACP 16+ z 2. fázy výskumu.....	92
Obrázok 75: Percentuálne rozdiely v lomových parametroch zmesí ACP 16+ z 2. fázy výskumu.....	93
Obrázok 76: Dynamický komplexný modul zmesí ACP 16+ bez rejuvenátoru. ....	95
Obrázok 77: Dynamický komplexný modul zmesí ACP 16+ s rejuvenátorom „SR“.....	96
Obrázok 78: Dynamický komplexný modul zmesí ACP 16+ s rejuvenátorom „RF“.....	96
Obrázok 79: Black space diagram zmesí ACP 16+ bez rejuvenátoru. ....	98
Obrázok 80: Black space diagram zmesí ACP 16+ s rejuvenátorom „SR“.....	98
Obrázok 81: Black space diagram zmesí ACP 16+ s rejuvenátorom „RF“.....	99
Obrázok 82: Index starnutia zmesí bez rejuvenátoru. Testované pri 10 °C.....	100
Obrázok 83: Index starnutia zmesí s rejuvenátormi. Testované pri 10 °C.....	100
Obrázok 84: Index starnutia zmesí bez rejuvenátoru. Testované pri 20 °C.....	101
Obrázok 85: Index starnutia zmesí s rejuvenátormi. Testované pri 20 °C.....	102
Obrázok 86: Parametre testu pevnosti v ťahu za ohybu zmesí ACP 16+ z 1. fázy výskumu..	103
Obrázok 87: Parametre testu pevnosti v ťahu za ohybu vybraných zmesí ACP 16+ z 2. fázy výskumu.....	103



## ZOZNAM TABULIEK

Tabuľka 1: Prírastok asfaltového spojiva po nanosení na priadze .....	35
Tabuľka 2: Vstupné parametre pre výpočet ťahových napätí a modulu pružnosti .....	38
Tabuľka 3: Prehľad vybraných materiálových charakteristík zvolených vlákien [30] [64].....	51
Tabuľka 4: Receptúra zmesi SMA 11 S .....	57
Tabuľka 5: Výsledky testu trvalých deformácií zmesí SMA 11 S a obsahom vlákien 0,3 % .....	66
Tabuľka 6: Receptúra zmesi ACL 16+ .....	67
Tabuľka 7: Výsledky odolnosti proti trvalým deformáciám vybraných zmesí ACL 16+ .....	81
Tabuľka 8: Receptúra zmesi ACP 16+ .....	83