



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV POZEMNÍCH KOMUNIKACÍ

INSTITUTE OF ROAD STRUCTURES

VLIV POUŽITÍ ROZPTÝLENÝCH VLÁKEN NA VLASTNOSTI ASFALTOVÝCH SMĚSÍ

EFFECT OF THE USE OF DISPERSED FIBRES ON THE PROPERTIES OF ASPHALT MIXTURES

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Petr Provazník

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Pavel Šperka

BRNO 2023

Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav pozemních komunikací
Student:	Bc. Petr Provazník
Vedoucí práce:	Ing. Pavel Šperka
Akademický rok:	2022/23
Studijní program:	N0732A260026 Stavební inženýrství – konstrukce a dopravní stavby

Děkan fakulty Vám v souladu se zákonem č. 111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Vliv použití rozptýlených vláken na vlastnosti asfaltových směsí

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Diplomová práce se bude zabývat použitím rozptýlených výztužných vláken do asfaltových směsí.

V teoretické části práce bude provedena rešerše odborné české a zahraniční literatury věnující se dané problematice.

V praktické části práce budou do asfaltových směsí přidávány různé druhy rozptýlených vláken (např. desintegrovaná skelná vlákna nebo výztužná vlákna z jiných materiálů). Vlastnosti připravených směsí budou ověřeny pomocí vhodně zvolených zkušebních metod. Získané poznatky z praktické části budou vyhodnoceny v závěru práce, kde bude také doporučení pro možný navazující výzkum.

Cíle a výstupy diplomové práce:

Cílem práce je ověření možnosti použití rozptýlených skelných vláken do asfaltových směsí a porovnání vlivu těchto vláken na vlastnosti směsí se směsmi, do kterých budou použita volná výztužná vlákna z jiných materiálů.

Seznam doporučené literatury a podklady:

Normy ČSN 73 6121, ČSN EN 15381 a normy řady ČSN EN 12697

Technické předpisy TP 87, TP 115, TP 147

Vybrané bakalářské a diplomové práce z předchozích let

Odborné články věnující se dané problematice

Materiály od dodavatelů vláken

Internetové zdroje

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku.

V Brně, dne 31. 3. 2022

L. S.

doc. Dr. Ing. Michal Varaus
vedoucí ústavu

Ing. Pavel Šperka
vedoucí práce

prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA, dr. h. c.
děkan

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá tématem použití rozptýlených skelných vláken v asfaltových směsích. V teoretické části jsou popsány obecné vlastnosti skelných vláken, jejich výroba a využití. Dále je zde popsána problematika rozptýlených vláken, která se v současné době používají jako aditivum v asfaltové směsi. Praktická část se zabývá chováním asfaltové směsi, jenž obsahuje rozptýlená skelná vlákna. Z tohoto důvodu bylo vyrobeno několik zkušebních sad s různým dávkováním skelných vláken. Jednotlivé vlastnosti těchto zkušebních sad byly následně srovnány s referenční směsí bez vláken. Byla posouzena zpracovatelnost skelných vláken do asfaltové směsi a následně byly provedeny vybrané laboratorní zkoušky vyrobené asfaltové směsi, a to: odolnost vůči vodě (ITSR), tuhost, odolnost proti trvalým deformacím a odolnost vůči únavě.

KLÍČOVÁ SLOVA

asfaltová směs, asfalt, rozptýlená vlákna, skelná vlákna, pevnost v příčném tahu ITS, odolnost vůči vodě ITSR, tuhost, odolnost vůči trvalým deformacím, odolnost vůči únavě

ABSTRACT

Diploma thesis deals with the topic of using dispersed glass fibers in asphalt mixtures. The theoretical part describes the general properties of glass fibres, their production and use. It also describe issue of dispersed fibers which are currently used as an additive in asphalt mixtures. The practical part deals with behaviour of asphalt mixture which contains dispersed glass fibers. For that reason several test sets with different glass fibre dosages were made. Then individual properties of these test sets were compared with a reference mixture without fibres. The workability of the glass fibres in the asphalt mixture was assessed and after that selected laboratory tests were performed on the produced asphalt mixture namely: water resistance (ITSR), stiffness, wheel tracking, resistance to fatigue.

KEYWORDS

asphalt mixture, bitumen, dispersed fibers, glass fibers, indirect tensile strength (ITS), indirect tensile strength ratio (ITSR), stiffness, wheel tracking, resistance to fatigue

BIBLIOGRAFICKÉ ÚDAJE

Bc. Petr Provazník. *Vliv použití rozptýlených vláken na vlastnosti asfaltových směsí.*
Brno, 2023. 87 s., 28 s. příl. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta
stavební, Ústav pozemních komunikací. Vedoucí práce: Ing. Pavel Šperka

PROHLÁŠENÍ O SHODĚ LISTINNÉ A ELEKTRONICKÉ FORMY ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že elektronická forma odevzdané diplomové práce s názvem *Vliv použití rozptýlených vláken na vlastnosti asfaltových směsí* je shodná s odevzdanou listinnou formou.

V Brně dne 03. 1. 2023

Bc. Petr Provazník
autor práce

PROHLÁŠENÍ O PŮVODNOSTI ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci s názvem *Vliv použití rozptýlených vláken na vlastnosti asfaltových směsí* zpracoval(a) samostatně a že jsem uvedl(a) všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 03. 1. 2023

Bc. Petr Provazník
autor práce

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu mé diplomové práce Ing. Pavlu Šperkovi za jeho odborné vedení, cenné rady, profesionální přístup a za časté konzultace při zpracování této práce. Velký dík patří také pracovníkům laboratoře Ústavu pozemních komunikací Fakulty stavební za jejich cenné rady a za spolupráci při výrobě a testování zkušebních těles. Dále bych chtěl poděkovat Jihomoravské obalovně, s.r.o. za poskytnuté kamenivo a firmě Saint-Gobain ADFORS CZ s. r. o. za poskytnutá skelná vlákna. Na závěr bych chtěl poděkovat mé přítelkyni, rodině a kamarádům za podporu během celého studia.

OBSAH

1	ÚVOD	11
2	CÍLE PRÁCE	12
3	TEORETICKÁ ČÁST	13
3.1	Použití rozptýlených vláken v asfaltových směsích	13
3.2	Historie používání vláken v asfaltových směsích	13
3.3	Vlákna využívaná v současnosti	14
3.3.1	Vlákna celulózy	14
3.3.2	Vlákna syntetická (aramidová)	15
3.4	Skleněná vlákna – historie a současnost	18
3.4.1	Složení a vlastnosti skleněných vláken	19
3.4.2	Výroba skelného vlákna	20
3.4.3	Aplikace skelných textilních vláken	25
3.4.4	Aplikace skelných vláken ve stavebních konstrukcích	26
3.4.5	Komerčně vyráběná vlákna pro použití do betonu	27
3.4.6	Aplikace skelných vláken v asfaltových směsích	29
3.4.7	Krátkodobé a dlouhodobé vlastnosti skleněných vláken asfaltových směsí vyztužených skelnými vlákny	31
3.5	Shrnutí teoretické části	35
4	PRAKTICKÁ ČÁST – POUŽITÉ ZKUŠEBNÍ METODY	36
4.1	Kvartace a Homogenizace materiálu	36
4.2	Sítový rozbor	37
4.3	Zkoušky asfaltového pojiva	38
4.3.1	Stanovení penetrace jehlou	38
4.3.2	Stanovení bodu měknutí metodou kroužek kulička	39
4.4	Příprava asfaltových směsí	39
4.4.1	Ruční míchání asfaltových směsí	40
4.4.2	Strojní příprava laboratorní směsi	40
4.5	Výroba a hutnění Marshallových těles	41
4.6	Výroba a hutnění deskových těles	42
4.7	Příprava zkušebních trapezoidů	43
4.8	Základní vlastnosti asfaltových směsí	44
4.8.1	Objemová hmotnost směsi	44
4.8.2	Maximální objemová hmotnost	45
4.8.3	Stanovení mezerovitosti asfaltové směsi V_m	46

4.8.4	Mezerovitost směsi kameniva VMA	47
4.8.5	Stupeň vyplnění mezer pojivem VFB.....	47
4.9	Laboratorní zkoušky asfaltových směsí	48
4.9.1	Zkouška odolnosti vůči vodě (ITSR)	48
4.9.2	Odolnost proti trvalým deformacím (zkouška poježdění kolem)	51
4.9.3	Stanovení modulů tuhosti.....	53
4.9.4	Zkouška stanovení odolnosti vůči únavě asfaltové směsi	54
5	PRAKTICKÁ ČÁST – POUŽITÉ MATERIÁLY	55
5.1	Kamenivo	55
5.2	Asfaltové pojivo	57
5.3	Skelná vlákna.....	58
5.3.1	R 131 A101.....	58
5.3.2	U H 50 /1.....	59
5.4	Návrh asfaltové směsi	60
5.4.1	Zrnitost.....	60
5.4.2	Skladba kameniva ve směsi.....	61
5.4.3	Dávkování skelných vláken	61
6	PRAKTICKÁ ČÁST – VÝSLEDKY.....	62
6.1	Výsledky – Část 1) Hodnocení použitých skelných vláken.....	63
6.2	Výsledky – Část 2) Zpracovatelnost skelných vláken jako komponenty v asfaltové směsi.....	63
6.3	Výsledky – Část 3) Vliv použití skelných vláken v asfaltových směsích na vybrané vlastnosti směsí a jejich porovnání s referenční směsí bez skelných vláken	66
6.3.1	Stanovení odolnosti asfaltové směsi vůči vodě (ITSR).....	66
6.3.2	Odolnost proti trvalým deformacím (poježdění kolem)	69
6.3.3	Stanovení modulů tuhosti.....	70
6.3.4	Odolnost vůči únavě.....	72
7	SHRNUTÍ A ZÁVĚR.....	74
8	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	77
9	SEZNAM OBRÁZKŮ	82
10	SEZNAM TABULEK	84
11	SEZNAM GRAFŮ	85
12	SEZNAM ROVNIC.....	86
13	SEZNAM PŘÍLOH	87

1 ÚVOD

S nárůstem automobilové dopravy a s rozšiřující se dopravní infrastrukturou jsou kladeny poměrně velké nároky na kvalitu a životnost dopravních komunikací. V současné době je převážná část silničních cest tvořena netuhým asfaltobetonovým souvrstvím. Pro udržení co možná nejdélejší životnosti musí netuhé vozovky vykazovat dobrou odolnost proti trvalým deformacím, odolnost proti únavě, odolnost proti vodě, chemickým látkám aj. Pokud nejsou asfaltové směsi správně navrženy a provedeny může docházet k celé řadě poruch. Oprava takto vzniklých deformací bývá zpravidla časově i finančně náročná a často vyžaduje vynaložení nových finančních prostředků. Nicméně nemalá spotřeba stavebních hmot z neobnovitelných zdrojů, zejména kameniva a asfaltu vede ke snaze využívat i alternativní stavební materiály při výrobě asfaltových směsí.

Přidáváním určitých aditiv do asfaltových směsí by mohlo být jedním ze způsobů, jakým by se aspoň částečně mohl kompenzovat úbytek přírodních zdrojů. Aditiva se do asfaltových směsí přidávají mimo jiné za účelem zlepšení vzájemné interakce asfaltového pojiva a kameniva, což může vést k požadované finanční a materiální úspoře. [1],[2]

Zajímavou myšlenkou se jeví použití vláken jako rozptýlené výztuže. Tyto vlákna by ve směsi měla vlivem spolupůsobení přebírat část zatížení a přispívat tak k delší životnosti vozovky. Nejrozšířenějším výztužným prvkem, který se dnes již používá do asfaltových směsí je vlákno aramidové. Nevýhodou použití tohoto typu vlákna je především jeho relativně vysoká pořizovací cena. [2], [3]

Skelné vlákno, jež je neodmyslitelnou součástí moderního světa, by se díky svým vlastnostem mohlo stát předmětem zájmu dopravního stavitelství. Tento materiál už několikrát prošel laboratorním testováním a ukazuje se, že by mohl mít pozitivní vliv na funkčnost asfaltových směsí. Důležitým faktorem je i jeho cena, která je ve srovnání s vláknem aramidovým nesrovnatelně nižší. Pokud by došlo k prokazatelnému pozitivnímu působení skelných vláken na asfaltovou směs, mohlo by se jednat o zajímavou alternativu zlepšení asfaltových vrstev netuhých vozovek.[4]

2 CÍLE PRÁCE

V rámci mé diplomové práce se budu snažit co nejvíce prozkoumat problematiku skelných vláken, jakožto výztužného materiálu pro asfaltové směsi. Práce se dělí na dvě hlavní části: teoretickou část a praktickou část.

Teoretická část se zaměří na rešerši dostupné české i zahraniční literatury na téma vyztužování asfaltových vozovek pomocí rozptýlených vláken. Dalším tématem teorie budou samotná skelná vlákna. Jelikož skelná vlákna jsou zásadním tématem pro diplomovou práci, bude jim v rámci rešerše věnována velká pozornost. Hlavním cílem je popsat vlastnosti skelných vláken, jakožto výztužného materiálu. V neposlední řadě budou probrány mechanické a fyzikální vlastnosti těchto vláken. Zaměřím se také na využívání vláken ve stavebnictví, a to především v dopravním stavitelství. Na základě poznatků teoretické části se pokusím zjistit, jakým způsobem by mohla skelná vlákna ovlivnit chování asfaltových směsí.

Praktická část se bude zabývat samotnou výrobou a testováním asfaltové směsi, s obsahem skelných vláken. Za tímto účelem se vyrobí směs asfaltového betonu. Z vyrobené směsi se zhotoví sady zkušebních těles s různým procentuálním zastoupením vláken. Následně budou takto připravená tělesa podrobena laboratornímu zkouškám. Důležitým cílem praktické části je porovnání vlastností zhotovených směsí s referenční směsí bez skelných vláken.

Účelem diplomové práce je zejména zodpovědět otázky, které by mohly mít zásadní vliv na používání skelných vláken jakožto výztuže asfaltové směsi.

Tyto otázky jsou:

- Je vůbec možné vyrobit asfaltovou směs, která obsahuje skelná vlákna a pokud ano jaký vliv mají vlákna na zpracovatelnost směsi?
- Jaký vliv má aplikace těchto vláken na zhotovenou asfaltovou směs?
- Jak ovlivňují vlákna chování asfaltové směsi při vybraných laboratorních zkouškách?

3 TEORETICKÁ ČÁST

3.1 Použití rozptýlených vláken v asfaltových směsích

Rozptýlená vlákna se používají v asfaltových směsích po mnoho desetiletí. Různá vlákna zlepšují odlišné vlastnosti směsí. Vždy záleží, jakým způsobem chceme danou asfaltovou směs modifikovat. V dnešní době se napříč celým světem používá široká škála vláken. [2]

3.2 Historie používání vláken v asfaltových směsích

Aplikace výztužných prvků do komunikací spojených asfaltovým pojivem se datuje do dávného starověku. Využití asfaltů pro stavební účely bylo typické v lokalitách povrchových nalezišť přírodních asfaltů, především na Blízkém a Středním východě. Asfalt se hojně využíval na spojování zdiva, místo malty, jako spojovací tmel kamenných bloků a desek při budování cest, nebo jako izolace proti vodě. Při těchto aplikacích se využívala sláma, která měla zlepšit spojovací vlastnosti přírodního asfaltu. Pozůstatky těchto staveb můžeme v dané lokalitě nalézt i dnes, jejich odhadované stáří se odhaduje na 6000 let. [2],[5]

Jedny z prvních vláken, která se používala do asfaltových směsí byla na počátku 20. let 20. století vlákna azbestová. Azbestová vlákna se používala převážně ve Spojených státech. V 60. letech, kdy byly prokázány negativní účinky azbestu na lidský organismus a životní prostředí se od jeho používání upustilo. [2]

Jako další druh přídatných vláken, která se používala v raných dobách motorismu, můžeme zmínit vlákna bavlněná. Ty přišla na scénu ve 30. letech 20. století, bohužel měla tendenci časem degradovat. [2]

Od té doby vniklo mnoho druhů vláken, které našly uplatnění v různých částech světa. Obecně můžeme říct, že se rozptýlená vlákna začala používat na zlepšení těchto vlastností asfaltových směsí:

- zvýšení tahové pevnosti a tím omezení tvorby trhlin ve vozovce,
- snížení závažnosti trhlin, tak aby nedocházelo k jejich rozvoji,
- zvýšená odolnost vůči únavě,
- zvětšení odolnosti proti ohladitelnosti,
- zvýšení obsahu asfaltu ve směsi, které vede ke zvýšení odolnosti,

- prodloužení životnosti a s tím spojené nižší náklady na údržbu a rekonstrukce. [2]

3.3 Vlákná využívaná v současnosti

Současnosti se využívají především tyto dva druhy vláken:

- vlákna celulózy,
- vlákna syntetická (aramidová, polypropylenová, ...). [2],[6]

3.3.1 Vlákná celulózy

Velmi často se používají rozptýlená vlákna, která mají vliv na stékavost asfaltového pojiva ve směsi. Typickým zástupcem této kategorie jsou vlákna celulózy. Tato vlákna se do směsí používají jako volné vlákno (Obrázek 1), nebo ve formě vláknitého granulátu (Obrázek 2). Celulózové vlákno funguje jako nosič asfaltového pojiva. Mezi jeho hlavní výhody patří:

- významně snižuje stékavost asfaltu z kameniva,
- zlepšuje zpracovatelnost asfaltové směsi při pokládce. [1],[2],[6]

Všechny tyto vlastnosti mají velmi příznivý vliv na životnost asfaltových vozovek. Vlákná se dají využít jak ve směsích typu SMA, tak i ve směsích s vysokou mezerovitostí PA (Asfaltový koberec drenážní). U směsí typu PA, který se vyznačuje vysokou mezerovitostí je větší přilnavost pojiva ke kamenivu velmi žádoucí. [1],[2],[6]



Obrázek 1: Volné vlákno S-CEL 7[®], CIUR a.s. [1] Obrázek 2: Granulát S-CEL 7G[®], CIUR a.s. [1]

3.3.2 Vlákná syntetická (aramidová)

Další skupinou vláken, která by měla pomoci s řešením obecně známých problémů vozovek jsou vlákna aramidová, neboli kevlarová. Jako jejich pozitivní vlivy na asfaltovou směs se uvádí tyto:

- zlepšení odolnosti proti trvalým deformacím,
- zlepšení pružnosti,
- zlepšení odolnosti proti šíření trhlin,
- nižší tloušťky asfaltových vrstev,
- celkové prodloužení životnosti asfaltových vrstev. [7], [8]



Obrázek 3: Syntetická vlákna Forta-Fi [22]

Aramidová vlákna dnes vyrábí především firma Forta, která na trh dodává vlákna Forta-Fi. Jedná se o patentovanou směs aramidových a polyolefinových vláken, jež zajišťují 3-D isotropické vyztužení v celém objemu asfaltové směsi. Tato vlákna nachází využití především ve Spojených státech, kde můžeme najít také sídlo společnosti Forta Corporation. Využití vlákna Forta-Fi nacházejí zejména na silně vytížených dopravních uzlech, nebo například na letištích. V České republice byla vlákna použita do asfaltových směsí na průtahu městem Písek (I/20), na letišti Václava Havla nebo na silnici E53 úsek Javorná – Železná Ruda.[3], [7], [8]



Obrázek 4: Testování vláken Forta-Fi [8]

Testování vláken Forta-Fi v ČR

V České republice probíhalo testování těchto vláken v akreditované laboratoři stavební fakulty ČVUT Praze. Tato laboratoř ve spolupráci s centrální laboratoří společnosti Eurovia provedla řadu testů se zaměřením na tyto vlastnosti:

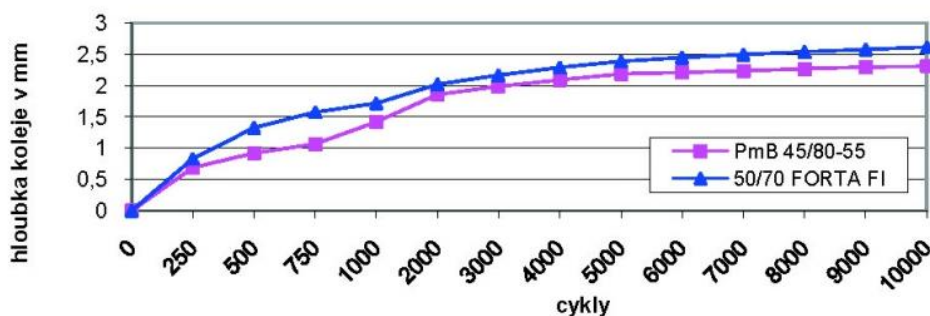
- odolnost asfaltové směsi vůči tvorbě trvalých deformací,
- pevnost v tahu za ohybu,
- relaxace,
- odolnost asfaltové směsi vůči únavě,
- modul tuhosti asfaltové směsi,
- nízkoteplotní vlastnosti asfaltových směsí. [3]

Množství laboratorních zkoušek bylo provedeno na třech typech asfaltových směsí. Jednalo se o dvě směsi asfaltového betonu ACO 11 S (obrusná vrstva) a směs ACO 22 S (ložní vrstva). Vláknina byla přidána do směsí s nemoifikovaným silničním pojivem gradace 50/70. Jedná se tedy o běžně vyráběné směsi na našem trhu. [3]

Vliv 3D výztuže Forta-Fi na chování asfaltových směsí byl testován dvěma způsoby. V prvním případě byly porovnávány dvě identické směsi, přičemž jedna obsahovala vlákna Forta-Fi a druhá byla bez vláken. V druhém případě byla směs s pojivem 50/70 a vlákna Forta-Fi srovnávána se směsí, ve které byla použita modifikovaná pojiva PMB 25-55/60 a PMB 45/80-55. [3]

Ze závěrů laboratorního testování lze usuzovat toto:

- V případech, kdy byla testována asfaltová směs vyztužená vlákny FORTA-FI porovnána se stejnou kontrolní směsí bez vláken, bylo u směsi s vlákny vždy zjištěno zlepšení laboratorních vlastností.
- Přidání vláken do asfaltových směsí nikdy nedošlo ke zhoršení jejich vlastností.
- Přidání vláken neovlivnilo zhutnitelnost směsi.
- Směsi používající nemodifikované asfaltové pojivo 50/70 vyztužené vlákny dosahovaly obdobných parametrů, jako směs s modifikovaným asfaltovým pojivem 45/80-55 a v některých případech je i předčily.
- Použití vláken zvyšuje odolnost směsi vůči tvorbě trvalých deformací, zvyšuje tuhost a zlepšuje únavové chování směsí.
- Na základě těchto poznatků, můžeme předpokládat možnost zvýšení životnosti konstrukce vozovky, popř. může dojít k redukci jednotlivých konstrukčních vrstev. [3]



Obrázek 5: Porovnání směsi s vlákny Forta-Fi a bez vláken – odolnost proti trvalým deformacím [3]

Vlákna FORTA-FI se dávkují v množství 0,5 kg na 1 t asfaltové směsi, tj. 0,5 ‰. Vlákna se vkládají ke kamenivu v suché fázi míchání, před aplikací asfaltového pojiva. Vlákna by se měla rovnoměrně rozmíchat v průběhu několika vteřin, není tedy nutné prodlužovat dobu míchání kameniva. Vlákna FORTA-FI nicméně mohou asfaltovou směs výrazně prodražit. Je tedy potřeba vždy důkladně zvážit, zda je použití vláken přínosné, nebo zda je výhodnější použít kvalitnější asfaltové směsi, případně větší tloušťky vrstev. [7], [8]



Obrázek 6: Asfaltová směs s vlákny Forta-Fi [8]

3.4 Skleněná vlákna – historie a současnost

Skleněná vlákna se oproti masivnímu sklu vyznačují především vyšší tahovou pevností a hojně se využívají pro výrobu moderních kompozitních materiálů. Vyrábějí se především ve formě stříže nebo nekonečných vláken, které jsou vhodné pro další využití ve stavebnictví, chemickém a konstrukčním průmyslu. [9]

Skelné vlákno se začalo používat již v 16. a 17. století, kdy jím benátští skláři začali ve větší míře zdobit své výrobky. Koncem 19. stol. se objevují první zmínky o technickém využití skleněného vlákna v patentové literatuře. Vůbec první dochovaná zmínka pochází z roku 1880 a pojednává o drátu pro telegraf opředeným skleněnou izolací. Do širšího povědomí veřejnosti se dostalo skleněné vlákno po prezentaci E. D. Lingeye na výstavě v Chicagu 1893. V roce 1916 podává R. Kemp první patent na vlákna vyztužená plastem a od roku 1934 se v Newarku (Ohio, USA) průmyslově vyrábí tepelně-izolační skleněná vlákna. [9]

Skleněné vlákno je anorganický materiál s širokou škálou využití. Vyznačuje se výbornými technickými vlastnostmi, mezi které řadíme:

- vysoká pevnost,
- vysoká hodnota Youngova modulu tahu,
- odolnost vůči vysokým teplotám,
- nehořlavost,
- chemická odolnost,
- dobré elektrické vlastnosti,

- vynikající tepelně a zvukově izolační vlastnosti. [2], [7]

Tyto vlastnosti skleněných vláken jsou výhodné zvláště při výrobě kompozitních materiálů. Skleněná vlákna nachází využití ve výrobě vláknových kompozitů o vysoké kvalitě a s vysokými nároky na mechanické a tepelné vlastnosti. Bez skleněných výztuží se moderní kompozitní konstrukční materiály v podstatě neobejdou. V roce 2010 byla celosvětová produkce skleněných textilních vláken asi 4,7 miliony tun, z toho cca 80 % jako roving (svazek nekonečných vláken bez zákrutu) a 20 % příze. [9], [10], [11]

3.4.1 Složení a vlastnosti skleněných vláken

Sklo, které se využívá při výrobě skelných vláken je odlišené od ostatních sklářských výrobků. Základními surovinami pro výrobu skelného vlákna jsou oxid křemičitý, oxid hlinitý, oxid vápenatý, oxid boritý, oxid hořečnatý, oxid sodný aj. Podle množství alkálií ve skle jej můžeme rozdělit na:

- skleněná vlákna neobsahující alkálie (0 % ~ 2 % alkálií),
- středně alkalické skleněné vlákno (8 % ~ 12 % alkálií),
- skelné vlákno s vysokou zásaditostí (více než 13 % alkálií). [10], [12]

- 1) **E-sklo** – sklo neobsahující alkálie (borosilikátové sklo). Jedná se o nejpoužívanější typ skla pro skleněná vlákna. Má dobré elektroizolační a mechanické vlastnosti. Je hojně využíván při výrobě plastů vyztužených skelnými vlákny, nebo při výrobě skleněných vláken pro elektrickou izolaci.
- 2) **C-sklo** – středně alkalické sklo. Charakterizuje ho velmi vysoká chemická odolnost, zvláště odolné vůči kyselinám. Tato odolnost je lepší než u skla, které neobsahuje alkálie. Má ale horší elektroizolační vlastnosti a menší mechanickou odolnost (o 10 % až 20 %) oproti skleněným vláknům, jež alkálie neobsahují. Středně alkalická skleněná vlákna se používají k výrobě korozivzdorných výrobků. Další využití nachází při výrobě vyztužených plastů, obalových a filtračních tkanin. Jeho cena je nižší než výroba skelných vláken, které neobsahují alkálie.
- 3) **Vysokopevnostní skleněná vlákna** – Vyznačují se vysokou pevností a vysokým modulem pružnosti. Pevnost v tahu jednoho vlákna dosahuje 2 800 MPa, což je o 25% vyšší než u skleněných vláken bez alkálií. Modul

pružnosti je 86 000 MPa, což je více než u E skla. Uplatnění toto vlákno nachází ve vojenském průmyslu, kosmickém průmyslu, může být použito i při výrobě sportovního vybavení. Nicméně jeho výroba je dost nákladná.

- 4) **Skleněná vlákna AR** – skelná vlákna odolná vůči alkáliím. Používají se jak přísada do cementu.
- 5) **Sklo E-CR** – sklo bez bóru a zásad. Využívá se k výrobě skleněných vláken, které mají dobrou odolnost vůči kyselinám a vodě. Jedná se o nový typ vláken, který je speciálně vyvinutý pro podzemní potrubí a skladovací nádrže. Jeho odolnost proti působení vody je 7 – 8krát lepší, než u E – skla.
- 6) **Sklo D** – Používá se k výrobě skleněných vláken s dobrou dielektrickou pevností. [10], [12]

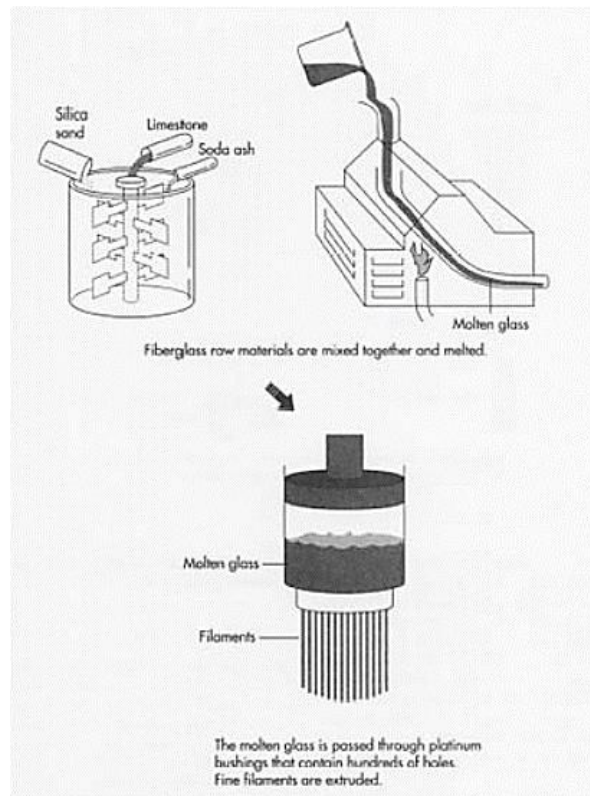
3.4.2 Výroba skelného vlákna

Suroviny

Všechny podstatné suroviny a chemikálie pro výrobu skelného vlákna, jsou uvedeny v předchozí kapitole 3.4.1, navíc mohou být doplněny o suroviny jako borax, kaolinový jíl, magnezit, živec a jiné materiály. Použití jednotlivých komponentů se odvíjí od druhu skelného vlákna. Vždy záleží na vlastnostech, které by mělo vyrobené vlákno mít. Jako další příměs může být použito i odpadní sklo ve formě střepů. Jednotlivé suroviny musí být před samotnou výrobou vlákna důkladně naváženy a promíchány (tzv. batching). Vzniká tak sklářský kmen. [10], [12], [13]

Tavení

Jakmile je navážka (sklářský kmen) připravena probíhá její tavení v peci. V peci je nutné důkladně udržovat a kontrolovat požadovanou teplotu, tak aby byl zachován stabilní tok skla. Roztavené sklo musí být udržováno při teplotě okolo 1370 °C, aby se z něj mohlo vlákno vyrobit. Po roztavení je sklo přesunuto kanálkem k dalšímu zpracování. Tento kanálek je umístěn na konci pece. [10], [13]



Obrázek 7: Proces míchání sklářského kmene [13]

Tvarování vláken

K výrobě samotných vláken se využívají různé postupy, vždy záleží na typu vyráběného vlákna. Textilní vlákna mohou být vyráběna buď přímým tavením skla z tavné pece, nebo se za pomoci speciálního stroje vyrobí z roztaveného skla skelné kuličky o průměru 1,6 cm. Tyto kuličky umožňují vizuální kontrolu skla, zda neobsahuje nečistoty. Následný postup je stejný jak při přímém tavení, tak i při tavení kuliček. Materiál se přivádí přes elektricky vyhřívaná pouzdra (anglicky spinnerets). Tyto pouzdra jsou vyrobeny z kovových slitin, nebo z platiny a skládají se z 200 až 3000 velmi malých otvorů. Roztavené sklo prochází těmito otvory a na konci vychází ven ve formě jemných vláken. [10], [13]

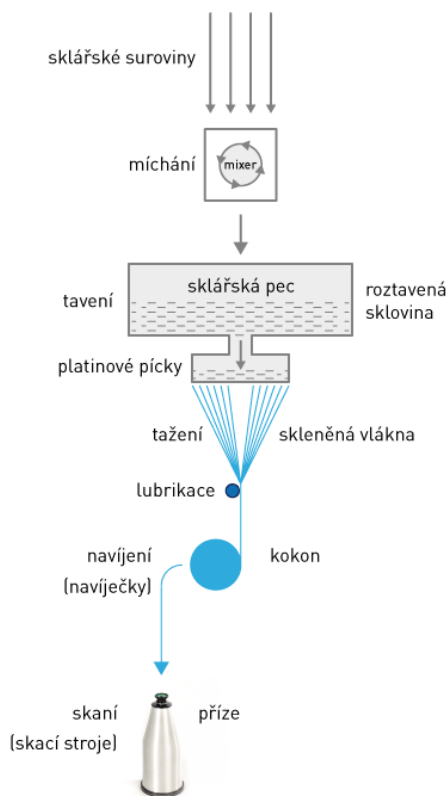
Výroba kontinuálního vlákna

Proces kontinuálního vlákna nám umožňuje vyrábět dlouhá, souvislá vlákna. Poté co sklo proteče přes otvory v pouzdře jsou vlákna zachycována pomocí vysokorychlostního navíječe. Navíječ se otáčí rychlostí přibližně 3 km za minutu, což je rychleji než rychlost toku skla v pouzdrech. Díky tomu je možné vyrábět vlákna daleko menších průměrů, než jsou otvory v pouzdrech. Vlákna jsou z pouzder vytahována ještě v roztaveném stavu. Při tomto procesu se na vlákno současně

nanáší takzvaná lubrikace, která pramen vláken spojí dohromady, a hlavně přidělí vlákně důležité vlastnosti, které jsou nezbytné pro jeho další zpracování a finální aplikaci. Aby nedocházelo k lámání vláken jsou zde aplikovány chemická pojiva. Nakonec jsou vlákna navinuta na trubičky a splétají se do příze. [10], [13]



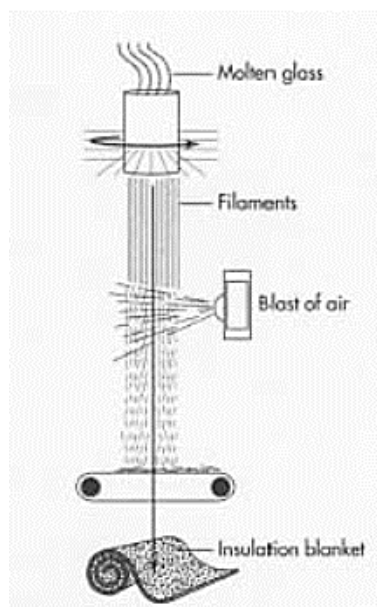
Obrázek 8: Navinutá skelná vlákna [10]



Obrázek 9: Schéma výroby skelných vláken [10]

Proces výroby střížových vláken

Jedná se o alternativní metodou výroby skelných vláken. Při této metodě jsou vlákna procházející pouzdry rychle ochlazována. Turbulentní proud navíc naláme vlákna na délku 20–40 cm. Tato vlákna prochází přes rozprašovač maziva na otáčející se bubnu, kde vytváří jemnou síť. Tato spleť skelných vláken je poté z bubnu vytažena a zformována do souvislého pramene. Tento pramen může být následně zpracován stejnými procesy, které se využívají pro zpracování bavlny a vlny. [13]



Obrázek 10: Schéma výroby střížových vláken [13]

Sekaná vlákna

Namísto formování do přize je možné kontinuální vlákno nasekat na krátké kusy. Pramene se upne na sestavu cívek a protáhne se strojem, který je rozřeže na krátké kousky. Nasekané vlákno se formuje do rohoží za přídavku pojiva. Následně se rohož nechá v peci vytvrdnout a sroluje se. Takto vyrobené rohože mohou mít různé tloušťky a hmotnosti, využívají se pro výrobu střešních krytin a dekorativních rohoží. [13]

Skelná vlna

K výrobě skelné vlny se používají spřádací nebo rotační stroje. Při tomto procesu vytéká roztavené sklo z pece do válcovité nádoby s malými otvory. Při rychlém otáčení nádoby vytékají z otvorů horizontální proudy skla. Tyto proudy

se přeměňují na vlákna pomocí proudu vzduchu, horkého plynu nebo kombinací obojího. Vlákna dopadají na pásový dopravník, kde se vzájemně proplétají v rouno. Takto vytvořenou vlnu lze opatřit pojivem, stlačit do požadované tloušťky a vytvrdit v peci. Výsledným produktem jsou tuhé nebo polotuhé skelné desky (izolační materiál). [13]



Obrázek 11: Minerální skelná vata [14]

Ochranné nátěry vláken

Kromě pojiv, které se používají pro výrobky ze skelných vláken je nutné použít i další druhy nátěrů. Různé druhy maziv se používají za účelem snížení otěru vláken. Tyto maziva jsou nastříkána buďto rovnou na vlákna, nebo jsou přidávána do pojiv. Využívají se také antistatické prostředky, které minimalizují vznik statické elektřiny a slouží jako inhibitor koroze a stabilizátor. [10], [13]

Kvalita výroby

Během výroby skelných vláken se kontroluje kvalita v každém z výrobních kroků. Zkoumá se kvalita a množství vstupních surovin, před jejich tavením v tavící peci. Dále se zkoumá kvalita roztaveného skla vycházející z pouzdra, kvalita vláken z navíjecího stroje, kvalita konečných produktů aj. Analyzuje se chemické složení a přítomnost vad. [13]

Při výrobě skelných izolačních materiálů se využívají zkušební postupy pro měření akustických a tepelných vlastností. Úprava a optimalizace akustických

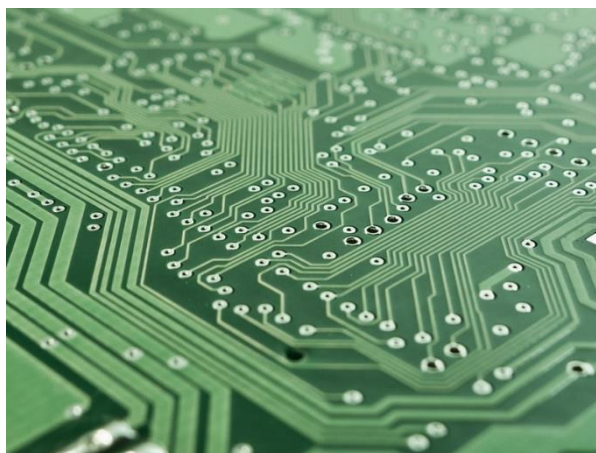
vlastností lze optimalizovat pomocí úpravy parametrů jakou jsou objemová hmotnost, průměr vláken, obsah a druh pojiva. [13]

3.4.3 Aplikace skelných textilních vláken

Skleněná textilní příze nachází využití v celé škále průmyslových aplikací.

Jako nejčastější lze uvést:

- výztuž papíru a lepících pásek,
- výztuž netkaných textilií (vlies),
- tkaniny pro výztuž lepenek,
- oplétané elektrické návleky,
- perlinkové tkaniny pro výztuž Vnějších tepelně-izolačních kompozitních systémů (ETICS; vnější izolace budov – obklady fasád),
- tkaniny pro výrobu desek plošných spojů (PCB, Printed Board Circuits),
- tapety ze skelných vláken pro dekoraci interiérů,
- nosné výztuže rozbrušovacích kotoučů,
- materiály pro tepelnou izolaci nebo elektroizolaci atd. [10]



Obrázek 12: Deska plošných spojů (PCB) [15]



Obrázek 13: Rozbrušovací kotouč [16]

3.4.4 Aplikace skelných vláken ve stavebních konstrukcích

Vláknobeton

Jedná se o materiál, který má charakter prostého betonu doplněného vláknou (Obrázky 14 a 15). Vláknobeton je konstrukční kompozitní materiál, kde rozptýlená vlákna ztužují strukturu kompozitu. Zlepšují některé jeho vlastnosti, jako například pevnost v tahu a pevnost v tahu za ohybu. Vláknobeton lze vyrábět v betonárně jako monolitický beton, který je následně transportován na stavbu automixem, nebo může být vyráběn jako prefabrikát. Aby byla zajištěna správná funkce vláken musí být v celém objemu betonu rovnoměrně rozptýlena. [17]



Obrázek 14: Beton s rozptýlenou výztuží [18]



Obrázek 15: Beton s rozptýlenou ocelovou výztuží (drátkobeton) [17]

Vlákna do betonu mají tyto vlastnosti:

- zlepšují schopnost betonu odolávat tahovým napětím,
- lepší houževnatost betonu,

- snižují negativní účinky zapříčiněné objemovými změnami, hlavně smršťování,
- určité typy vláken zvyšují požární odolnost betonu,
- vlákna se odlišují typem materiálu, tvarem a délkou. [17]

Rozdělení vláken do betonu dle výrobního materiálu:

- ocelová vlákna (drátkobeton),
- polymerová vlákna (mikrovlákna, makrovlákna),
- skelná (skleněná) vlákna,
- uhlíková,
- ostatní. [4], [17]

Z textilních vláken se nejvíce osvědčilo používání skelného vlákna (AR sklo) a uhlíkového vlákna. Výhodou těchto vláken je větší stabilita betonu než při používání betonu vyztuženého ocelovými dráty. Vlákna nepodléhají korozi a beton je trvanlivější. Vlákna se dají použít ve formě filamentu, sekaná, jako svazek nekonečných vláken (roving) a jako plošná textilie. [4]

3.4.5 Komerčně vyráběná vlákna pro použití do betonu

V této diplomové práci uvádím dva druhy kompozitních vláken, zejména za účelem zjištění jejich vlastností a technických parametrů. Tyto poznatky mě byly nápomocny v praktické části práce.

Anti-Crak® HD

Alkalrezistentní skleněná vlákna, určená pro aplikaci do betonů a malt s hydraulickým pojivem. Jsou používána do betonu, k zabránění vzniku smršťovacích trhlin od napětí při zrání betonu a malt. Používají se do různých druhů betonu, obzvláště do potěrů podlah v interiéru i exteriéru, do reprofilačních malt a jádrových omítek. [19]



Obrázek 16: Skleněná vlákna do betonu Anti-Crack® HD [19]

Technické parametry:

- elektrická vodivost: velmi nízká,
- specifická hmotnost: 2.68 g/cm³,
- materiál: alkalirezistentní sklo,
- bod měknutí: 860 °C,
- chemická odolnost: velmi vysoká,
- modul pružnosti: 72 GPa,
- pevnost v tahu: 3500 MPa. [19]

Tabulka 1: Technické parametry Anti-Crak® HD [19]

délka vlákna (mm)	průměr jednotlivého vlákna – filamentu (μm)	ztráta žíháním (%) (ISO 1887:1995)	vlhkost (%) (ISO 3344:1977)
12	14	0,6	0,5 max

Dávkování: 0,6 kg/m³, příp. 1,2 kg/m³ do jemnozrnných směsí. [19]

SikaFiber® PPM-12

SikaFiber® PPM-12 jsou polypropylenová vlákna do betonu a malt, sloužící rovněž k zamezení vzniku smršťovacích trhlin v čerstvém i ztvrdlém betonu. Navíc by měla zajišťovat větší požární odolnost ve všech druzích betonu a malt. [20]



Obrázek 17: Vlákná do betonu SikaFiber PPM-12 [21]

Technické parametry:

- Materiál: 100 % polypropylen,
- objemová hmotnost: 0,91 g/cm³,
- specifická pevnost v tahu ~30 cN/tex,
- bod měknutí: přibližně 160 °C,
- délka vlákna: 12 mm,
- průměr jednotlivého vlákna: 32 μm. [20]

3.4.6 Aplikace skelných vláken v asfaltových směsích

Kombinace skelných a polypropylenových vláken

Jedním z příkladů, kdy byla skelná vlákna zkoumána pro použití v asfaltových směsích byl výzkumný experiment vědců z univerzity Isfahan v Iránu a EMU v Turecku. V této studii byla skelná vlákna použita spolu s polypropylenovými vlákny, za účelem zlepšení vybraných vlastností asfaltových směsí hutněných za horka. Vědci se snažili využít polypropylenová vlákna jako lepidlovou složku směsi, díky které by se daly využít pozitivní vlastnosti skelných vláken. Skelná vlákna měla zajistit především větší tuhost směsí [23], [7]



Obrázek 18: Polypropylenové vlákno [24]

Polypropylenová vlákna se stávají lepivými kolem svého bodu tání tj. 160–170 °C. Polypropylenová vlákna byla přidávána do horkého asfaltového pojiva, kde došlo k aktivaci lepící funkce, naproti tomu skelná vlákna byla přidána během procesu míchání kameniva. Oba druhy vláken měly délku 12 mm. Bylo vyrobeno více zkušebních sad s různou kombinací dávkování vláken. Vlákna polypropylenu byla dávkována v množstvích 2 %, 4 %, 6 % hmotnostního podílu směsi. Skelná vlákna byla dávkována v množství 0,00 %, 0,05 %, 0,10 %, 0,20 % hmotnostního podílu směsi. V rámci výzkumu byly testovány všechny kombinace dávkování vláken. Na směsích byly provedeny Marshallovy zkoušky stability. [23]

Pro ČR není hodnota stability stanovena žádnou platnou normou nebo předpisem, přesto jsou výsledky tohoto výzkumu poměrně zajímavé. Ukázalo se, že ze zvyšujícím se obsahem polypropylenových a skelných vláken stabilita směsi roste. Nicméně při dávkování 0,2 % skelných vláken už dochází ke snižování stability. Zjištěná optimální kombinace v této studii tedy bylo 6 % polypropylenových vláken a 0,10 % vláken skelných. Tato kombinace vykazovala nárůst stability o 25 % oproti směsi, která nebyla vlákny upravována. V případě objemových vlastností docházelo se zvýšením obsahu vláken ke zvýšení mezerovitosti směsi. Naproti tomu se snížil počet mezer vyplněných asfaltovým pojivem. Zvýšila se tak mezerovitost směsi kameniva (VMA). Se zvyšujícím se obsahem vláken docházelo také ke snižování specifické hmotnosti směsí. Menší počet mezer vyplněných asfaltem byl považován za pozitivní, jelikož směs může lépe odolávat vysokým teplotám, kdy dochází k objemovým změnám. [23], [7], [25]

3.4.7 Krátkodobé a dlouhodobé vlastnosti skleněných vláken asfaltových směsí vyztužených skelnými vlákny

Pozitivní vlastnosti vláken jako výztuže v různých stavebních konstrukcích byly motivací pro výrobu asfaltových směsí s výztužnými skelnými vlákny. Mahmoud Enieb, Aboelkasim Diab a Xu Yang publikovali v roce 2021 článek, zabývající se krátkodobými a dlouhodobými vlastnostmi asfaltových směsí, které byly modifikovány právě skelnými vlákny. Výzkum probíhal jak v experimentální, tak v numerické rovině. [26]

V experimentální části byly vyrobeny směsi a proběhlo jejich testování na ITS, ITSR, odolnost vůči únavě a odolnost proti trvalým deformacím aj. Testované sady byly připraveny za pomoci tří druhů asfaltových pojiv. Jednalo se o základní pojivo 60/70, pryží modifikovaná pojiva a polymerem modifikovaná pojiva. [26]

Tabulka 2: Tabulka pojiv [26]

Použité pojivo			
Druh asfaltového pojiva	penetrace při 25 °C [0,1 mm]	bod měknutí [°C]	viskozita při 135 °C [Pa.s]
základní asfalt 60/70	64	51	0,511
pryží modifikovaný asfalt	59	55	0,560
polymerem modifikovaný asfalt	48	59	0,620

Tabulka 3: Charakteristika použitých vláken [26]

Fyzikální vlastnosti použitých skelných vláken	
Typ skla	E
Průměr (μm)	13
Délka (mm)	6/12
Specifická hmotnost (-)	1
Pevnost v tahu (MPa)	2000

Pro výrobu laboratorních směsí byla použita vlákna délky 6 mm a 12 mm. Tuto délku vědci stanovili na základě dřívějších experimentů (Zahran a Fatani 1999, Chen a spol. 2009, Sheng a spol. 2017). Byly vyrobeny sady Marshallových těles, dle platných egyptských norem. Teplota míchání a hutnění asfaltových směsí byla 175 °C–160 °C. Obsah asfaltového pojiva byl stanoven pro všechny asfaltové směsi na 5,7 % hmotnostního podílu směsi, a to shodně jak pro směsi bez vláken, tak se skelnými vlákny. Tělesa byla hutněna 75 údery z každé strany za pomoci Marshallova zhutňovače. Mezerovitost směsí se pohybovala kolem 4 %. [26]

Kromě asfaltové směsi vystavené účinkům krátkodobého stárnutí byly asfaltové směsi připraveny také za podmínek dlouhodobého stárnutí. V této studii byl pro navození efektu dlouhodobého stárnutí asfaltové směsi ponechány v peci po dobu 2 dnů při teplotě 85 °C. Následně se provedlo jejich hutnění při teplotě 160 °C. [26]

Tabulka 4: Vyrobené asfaltové směsi [26]

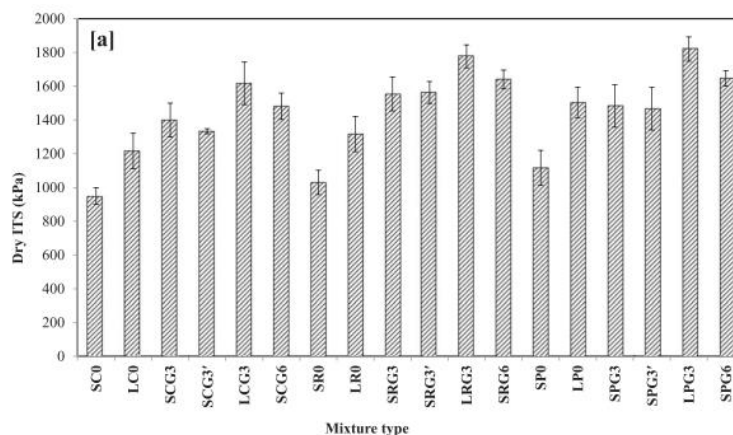
Vyrobené asfaltové směsi			
označení	použité pojivo	obsah skelných vláken (% podílu směsi)	délka vláken (mm)
asfaltové směsi vystavené účinkům krátkodobého stárnutí			
SC0	60/70	-	-
SCG3	60/70	0,3	6
SCG3'	60/70	0,3	12
SCG6	60/70	0,6	6
SRO	PRMA*	-	-
SRG3	PRMA	0,3	6
SRG3'	PRMA	0,3	12
SRG6	PRMA	0,6	6
SPO	POMA**	-	-
SPG3	POMA	0,3	6
SPG3'	POMA	0,3	12
SPG6	POMA	0,6	6
asfaltové směsi vystavené účinkům dlouhodobého stárnutí			
LC0	60/70	-	-
LCG3	60/70	0,3	6
LRO	PRMA	-	-
LRG3	PRMA	0,3	6
LPO	POMA	-	-
LPG3	POMA	0,3	6

pozn. *PRMA – pryží modifikovaný asfalt,

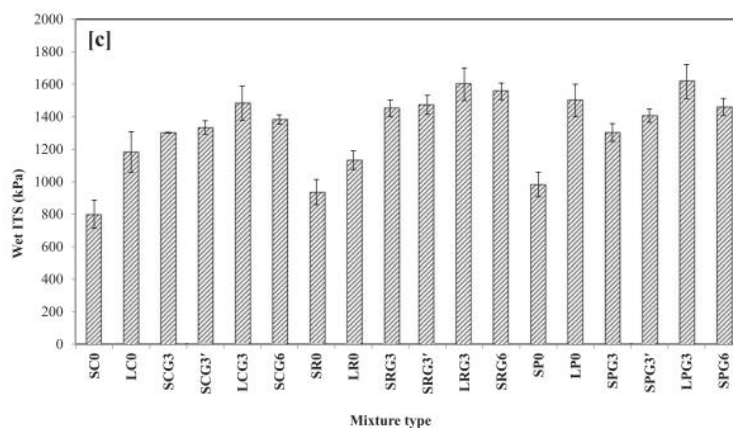
** POMA – polymerem modifikovaný asfalt

Vyhodnocení ITS a ITSr

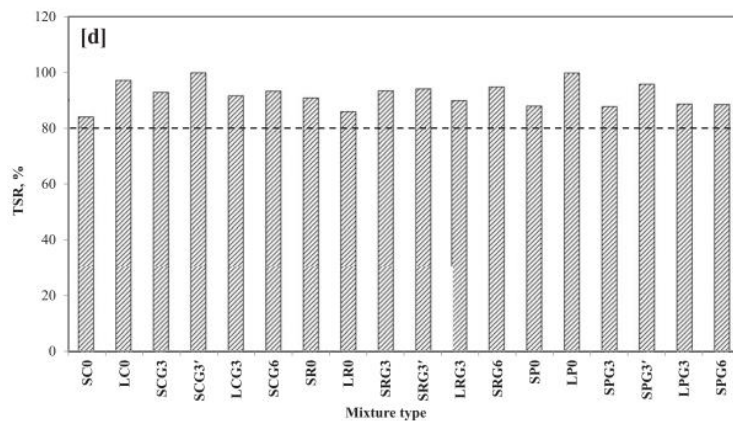
Na následující zkoušce ITS, která zkoumá tahové vlastnosti asfaltových směsí si můžeme povšimnout, že došlo k výraznému nárůstu pevnosti v tahu u směsí s aplikací skelných vláken (viz grafy 1 a 2). Z hlediska obsahu vláken výsledky ukazují, že došlo ke zvýšení ITS v důsledku zvýšení obsahu skelných vláken z 0,3 % na 0,6 %. Různé směsi vykazovaly různé hodnoty ITS v závislosti na použitém pojivu. Změna délky vláken se na hodnotách ITS významně neprojevila. V Grafu 3 můžeme následně vidět hodnoty ITSr (TSR). [26]



Graf 1: Hodnoty ITS (suchá tělesa), převzato z [26]



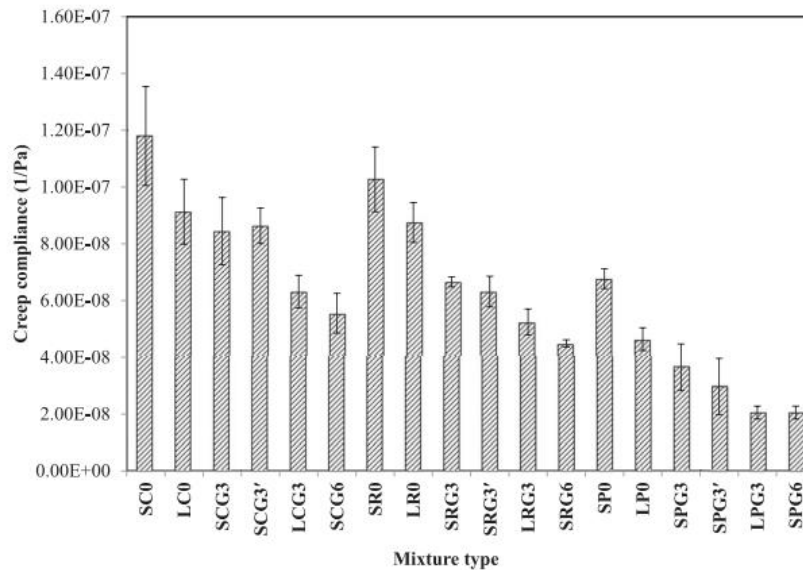
Graf 2: Hodnoty ITS (mokrā tělesa), převzato z [26]



Graf 3: Hodnoty ITSR, převzato z [26]

Co se týče odolnosti proti trvalým deformacím (vyjeté koleje) bylo zjištěno, že velmi závisí na druhu použitého pojiva (viz graf 4). Nezávisí pouze na tom, zda je směs vyztužená, či nikoli. Různé typy pojiv vykazovaly rozdílné vlastnosti při vyjetí kolejí. V případě směsí vyztužených skelnými vlákny, se vyztuž chová jako pružné médium, které „posiluje“ asfaltový tmel čímž snižuje výslednou deformaci.

Z výsledků vyplývá, že je možné dosáhnout lepší odolnosti proti trvalým deformacím, nicméně k docílení příznivých hodnot je třeba použít také vhodné modifikované pojivo, které bude lépe fungovat v kombinaci s vlákny. [26]



Graf 4: Odolnost proti trvalým deformacím, převzato z [26]

Vyhodnocení modulů pružnosti a únavy

Z naměřených výsledků vědci dospěli ke zjištění, že aplikace skelných vláken má nejspíše pozitivní vliv na modul pružnosti dané směsi., přičemž nerozhodovala délka vláken. Vyztužené směsi s asfalty modifikovanými pryží či polymerem vykazovaly vyšší moduly tuhosti ve srovnání s moduly tuhosti směsi se základním asfaltem. Vědci dospěli k závěru, že vliv skelných vláken je závislý na použitém pojivu. Nejspíše viskózní charakter modifikovaných pojiv zlepšuje povrchovou vazbu směsi s vlákny, čímž se zvyšuje soudržnost směsi.

Z naměřených dat dále vyplývá, že směsi s vlákny dosáhly lepší odolnosti vůči únavě. Dá se tak usoudit, že by vlákna měla zlepšit požadované vlastnosti, které mohou mít příznivý vliv na životnost směsi. Svým působením by měla minimalizovat tvorbu a šíření mikrotrhlin. Z výsledků je ale opět patrný vliv použitého asfaltového pojiva. [26]

3.5 Shrnutí teoretické části

V teoretické rešerši jsem se snažil shrnout a přiblížit tematiku rozptýlených vláken, která se používají k aplikaci do asfaltových směsí za účelem zlepšení vybraných vlastností. Byla zde věnována velká pozornost skelným (skleněným) vláknům, jež jsou hlavním předmětem praktické části této práce. Byly popsány vlastnosti jednotlivých typů skelných produktů. Dále zde bylo poukázáno na možné využití skelných vláken jako rozptýlené výztuže. Je zde zmíněna také samotná výroba skelných vláken a jejich aplikace ve stavebním průmyslu. Na závěr jsou zde shrnuty poznatky dřívějších výzkumů, které se zabíraly vyztužováním asfaltových směsí pomocí skelných vláken. Z provedené rešerše české i zahraniční literatury vyplývají tyto poznatky:

- V současné době se do asfaltových vrstev netuhých vozovek využívá široká škála rozptýlených vláken, jež má za cíl zlepšit vybrané vlastnosti asfaltových směsí.
- Vlákna celulózová mají příznivý vliv na stékavost asfaltového pojiva, čímž výrazně přispívají k životnosti vozovek. Jedná se také o nejrozšířenější typ komerčně aplikovaných vláken.
- Jako výztužná vlákna se na dnešním trhu nejvíce uplatňují vlákna aramidová. Tyto vlákna by měla zlepšovat odolnost proti trvalým deformacím a prodloužit tak životnost konstrukce.
- Skelná vlákna by díky svým výztužným předpokladům mohla mít pozitivní vliv na prodloužení životnosti asfaltových vozovek, zejména se předpokládá zvýšení odolnosti proti trvalým deformacím, zvýšení tuhosti směsi a celkové zlepšení tahové odolnosti. Je však nutné zvolit vhodný typ skelného vlákna.

Na základě teoretické rešerše lze uvést předpoklad, že výběrem vhodného druhu skelného vlákna v kombinaci se správně zvoleným druhem asfaltového pojiva lze docílit zlepšení určitých vlastností asfaltových směsí a prodloužit tak životnost netuhých vozovek.

4 PRAKTICKÁ ČÁST – POUŽITÉ ZKUŠEBNÍ METODY

Následující část diplomové práce je zaměřena na postupy a zkušební metody, jež byly použity při zpracování praktické části této práce.

4.1 Kvartace a Homogenizace materiálu

Jedná se o metody, díky kterým získáváme reprezentativní vzorky kameniva. Tyto vzorky se následně můžou použít k výrobě laboratorních, zkušebních těles. Těmito postupy se podrobně zabývá norma *ČSN EN 932-1 Zkoušení všeobecných vlastností kameniva – Část 1: Metody odběru vzorků*. [27]

Homogenizace

Abych docílil co nejměrohodnějšího vzorku provedl jsem homogenizaci každé frakce kameniva (0/4, 4/8, 8/11). Nejprve jsem na čistou betonovou podlahu vysypal bedny obsahující tutéž frakci kameniva. Následně jsem tento materiál přemístil do tvaru kužele. Poté jsem materiál přemísťoval lopatou vedle, kde se tak vytvořil kužel nový. Tento postup jsem několikrát opakoval abych docílil co nejlepšího rozmístění zrn v daném vzorku. Poté jsem dané množství kameniva rozdělil a zmenšil na potřebnou velikost navážky. [27]



Obrázek 19: Homogenizace kameniva

Kvartace

Po homogenizaci kameniva bylo nutné odebrat vzorky na provedení síťových rozborů. Požadovanou velikost navážky získáme za pomoci kvartace. Kvartace se provádí rozčtvrcením vzorku kameniva podle dvou, na sebe kolmých průměrů. Dvě

částí, které leží vůči sobě na diagonále se vyradí a zbytek vzorku se opět promísí. Celý postup se opakuje, dokud nedosáhneme požadované velikosti navážky. [27]

4.2 Sítový rozbor

Podstatou zkoušky je roztřídění kameniva za pomoci sady sít na jednotlivé frakce. Sítový rozbor se prováděl za účelem zjištění jednotlivých čar zrnitostí použitých frakcí. Tento postup bylo nutné provést abych byl schopný navrhnout požadovanou asfaltovou směs ACO 11+. Zkouška probíhala v souladu s evropskou normou *ČSN EN 993-1+A1 Zkoušení geometrických vlastností kameniva – Část 1: Stanovení zrnitosti – Sítový rozbor*. [28]

Postup sítového rozboru

Nejprve bylo nutné zjistit podíl jemnozrnných částic v jednotlivých vzorcích kameniva. Každou navážku jsem za pomoci vody propíral přes dvojici sít (velikost ok 2 mm a 0,063 mm). Horní hrubší síto se nazývá ochranné. Kamenivo se umístilo na ochranné síto a pozvolna se prolévalo vodou až do doby, kdy byla voda protékající sítem 0,063 mm čirá. To umožnilo oddělení zrn menších než 0,063 mm. Pak jsem na základě váhového rozdílu před a po proprání, určil hmotnost odplavených jemnozrnných částic. Vážení zkušebních vzorků probíhalo vždy po vysušení daného vzorku do ustálené hmotnosti. [28]



Obrázek 20: Oddělení jemnozrnných částic

Následně jsem zbylé kamenivo nechal roztřídit prostřednictvím prosévacího přístroje na jednotlivé frakce. Prosévací přístroj se skládá se skupiny sít, které jsou umístěny ve sloupci nad sebou, každé síto má jinou velikost ok. Síta jsou seřazena od spodu vzestupně, podle velikosti ok. Nejnižší je umístěno dno, poté následuje síto velikosti 0,063 mm a postupně se přechází na hrubší síta. Nad poslední síto se osadí víko s maticemi. Navážku kameniva jsem vždy nechal přesévat 5 minut a následně zvážil obsah kameniva na jednotlivých sítích. [28]



Obrázek 21: Prosévací přístroj

Vyhodnocení

Na základě naměřených hmotností jednotlivých frakcí jsem určil procentuální podíly propadů a vynesl do grafu čáru zrnitosti.

4.3 Zkoušky asfaltového pojiva

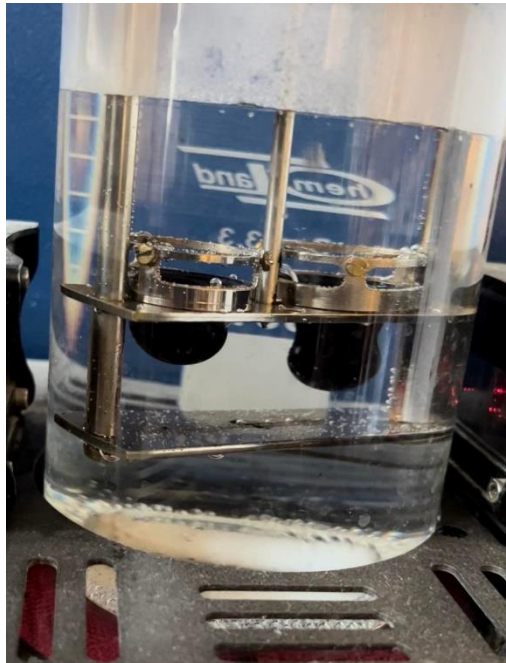
4.3.1 Stanovení penetrace jehlou

Jedná se zkoušku asfaltového pojiva. Metoda spočívá v měření průniku kalibrované jehly do vzorku asfaltu. Měření probíhá ve vodní lázni o teplotě 25 °C. Jehla se nechá pronikat do asfaltového pojiva po dobu 5 sekund, při působení zatížení 100 g. Hloubka naměřeného vpichu se uvádí v penetračních jednotkách, nebo v desetinách milimetrů (1 penetrační jednotka = 0,1 mm). Provádí se vždy minimálně 3 platná měření, ze kterých se určí aritmetický průměr, který je výslednou

hodnotou penetrace asfaltu. Zkouška se provádí dle evropské normy *ČSN EN 1426 Asfalty a asfaltová pojiva – Stanovení penetrace jehlou*. [29]

4.3.2 Stanovení bodu měknutí metodou kroužek kulička

Touto zkouškou se podrobně zabývá evropská norma *ČSN EN 1427 Asfalty a asfaltová pojiva – Stanovení bodu měknutí – Metoda kroužek a kulička*. Při této metodě dochází k řízenému ohřevu 2 kroužků s asfaltovým pojivem. Do těchto kroužků se umístí ocelová kulička, která postupným zahříváním proniká do zkoušeného asfaltového pojiva. Celá zkouška probíhá ve vodní lázni. Podstatou metody je stanovení teploty, při níž asfalt změkne natolik, že kulička umístěná na vrstvě asfaltu protáhne asfalt na délku 25 mm. [30]



Obrázek 22: Stanovení bodu měknutí asfaltu

4.4 Příprava asfaltových směsí

Příprava asfaltových směsí probíhala dle normy *ČSN EN 12697-35 Asfaltové směsi – Zkušební metody – Část 35: Laboratorní výroba směsí*. Tato norma uvádí dva způsoby míchání asfaltových směsí. Jedná se o strojní a ruční míchání. Při zpracování mé diplomové práce byly použity oba tyto způsoby přípravy asfaltové směsi. [31]

4.4.1 Ruční míchání asfaltových směsí

Ruční míchání se používalo pro míchání zkušebních těles, které sloužily pro zkoušku ITSR. Tímto jsem mohl vizuálně zjistit zpracovatelnost směsí s vlákny, tj. jakým způsobem se zkoumaná vlákna chovají při laboratorní přípravě směsi. Nejprve bylo nutné nachystat si zkušební navážku obsahující kamenivo, filer, skelná vlákna a asfaltové pojivo. Hmotnost těchto navážek byla 1165 g. Navážky byly zahřáty na teplotu $155\text{ °C} \pm 5\text{ °C}$ v laboratorní sušárně. Při horkém míchání jednotlivých frakcí kameniva jsem postupně přisypával skelná vlákna v požadovaném množství. Následně jsem k takto připravené směsi přidal asfaltové pojivo a důkladně promíchal. Celá příprava probíhala v nerezové nádobě na vařiči, jak je možné vidět na obrázcích 23 a 24. Poté jsem takto vyrobenou asfaltovou směs vložil zpátky do pece, kde se ohřála na teplotu 155 °C , což byla teplota hutnění zkušebních těles. [31]

Tato ruční příprava se použila zejména z důvodu optimalizace množství aplikovaných vláken. V laboratorní míchačce se připravovaly směsi pro zkoušky tuhosti, odolnosti proti únavě a trvalým deformacím.



Obrázek 23: Ruční příprava směsi



Obrázek 24: Namíchaná as. směs

4.4.2 Strojní příprava laboratorní směsi

Strojní míchání se používalo pro výrobu většího množství asfaltových směsí. Míchání probíhalo v laboratorní míchačce (Obrázek 25), která je umístěna v laboratoři pozemních komunikací (dále jen PKO) fakulty stavební. Navážky kameniva a asfaltové pojivo bylo nutné nejdříve předeheat na požadovanou teplotu míchání $155\text{ °C} \pm 5\text{ °C}$. Předeheat bylo i míchací zařízení. Poté bylo nejdříve provedeno horké míchání kameniva, v případě směsí s vlákny byla ke kamenivu přidána skelná vlákna. Následně se přidalo nemodifikované asfaltové pojivo gradace 50/70. Množství asfaltového pojiva bylo stanoveno na 5,7 % hmotnostního podílu

vyráběné směsi. Míchání probíhalo do té doby, než bylo veškeré kamenivo obaleno asfaltovým pojivem a směs tak byla důkladně promíchána. Míchání probíhalo nejvýše 3 minuty. Celková hmotnost takto vyrobených směsí byla přibližně 10 kg. Následně se směs umístila opět do sušárny, aby byla dosažena teplota hutnění, tedy 155 °C. Poté byly zhotoveny potřebné navážky pro výrobu zkušebních těles a desek. [31]



Obrázek 25: Laboratorní míchačka Bitumix

4.5 Výroba a hutnění Marshallových těles

Výroba zkušebních těles probíhala za pomoci Marshallova rázového zhutňovače. Tento přístroj se nachází rovněž v laboratoři ústavu PKO. Vyrobená zkušební tělesa mají tvar válce o výšce 63,5 mm \pm 2,5 mm a průměru 101,5 mm \pm 0,1 mm. Tělesa jsou hutněna v ocelové formě, která se skládá ze 4 částí (podstavec, forma, prstavec a násypka). Jednotlivé navážky, které se připravily mícháním, jsem dal předehřát na teplotu 155 °C \pm 5 °C do laboratorní sušárny. Spolu s navážkou se dala ohřívat i forma. Poté co navážky dosáhly požadované teploty jsem sestavil hutnicí formu a po třetinách ji naplnil danou navážkou. Forma byla následně upnuta do rázového zhutňovače. Hutnění probíhalo 25 úderů z každé strany. Po vychladnutí se těleso za pomoci hydraulického zařízení vytlačilo z formy. Celý postup byl realizován dle normy dle normy *ČSN EN 12697-30 Asfaltové směsi – Zkušební metody – Část 30: Příprava zkušebních těles rázovým zhutňovačem.* [32]



Obrázek 26: Vyrobena Marshallova zkušební tělesa



Obrázek 27: Marshallův rázový zhutňovač

4.6 Výroba a hutnění deskových těles

Hutnění zkušebních desek probíhalo v laboratoři PKO za pomoci segmentového zhutňovače. Toto zařízení simuluje hutnění asfaltové směsi za pomoci hutněního válce na stavbě. Hutnění probíhalo při teplotě 155 °C. Výroba desek probíhala v souladu s evropskou normou *ČSN EN 12697-33 Asfaltové směsi – Zkušební metody – Část 33: Příprava zkušebních těles zhutňovačem desek*. Celkem bylo vytvořeno 8 zkušebních desek o rozměrech 260 x 320 x 50 mm (obrázek 28). Dvě z těchto desek byly použity na zkoušku pojíždění kolem (odolnost proti trvalým deformacím), ze zbylých 6 desek byla nařezána zkušební tělesa tvaru trapezoidů, která se využila při zkouškách stanovení modulů tuhosti a odolnosti proti únavě. [33]



Obrázek 28: Zhotovené zkušební desky



Obrázek 29: Řezání zkušebních desek

4.7 Příprava zkušebních trapezoidů

Tyto tělesa mají tvar komolého klínu. Tělesa získáme nařezáním deskových těles. Z jedné desky je možné vytvořit až 5 zkušebních těles. Celkem bylo vytvořeno 30 zkušebních těles tvaru trapezoidů. Po nařezání byla jednotlivá tělesa omyta a očištěna od nežádoucích částic. Poté byla zvážena s přesností na 0,1 g a změřena s přesností na 0,1 mm (obrázek 30). Následně byla přilepena ke dvěma podložkám, tak aby je bylo možné upnout do zkušebního zařízení. Takto vytvořená tělesa se poté použila při stanovování modulů tuhosti a při únavě.



Obrázek 30: Měření rozměrů trapezoidů

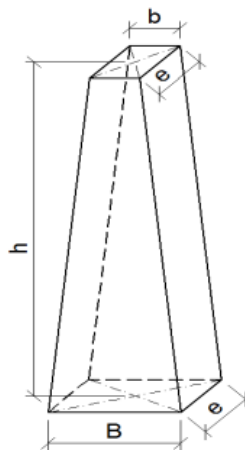
Rozměry zkušebních těles:

$h = 250 \text{ mm}$

$B = 70 \text{ mm}$

$e = 50 \text{ mm}$

$b = 25 \text{ mm}$



4.8 Základní vlastnosti asfaltových směsí

U zhotovených těles bylo nutné stanovit základní parametry jednotlivých směsí, a to:

- objemovou hmotnost směsi,
- maximální objemovou hmotnost směsi,
- mezerovitost asfaltové směsi,
- mezerovitost směsi kameniva,
- stupeň vyplnění mezer pojivem.

4.8.1 Objemová hmotnost směsi

Objemová hmotnost se u zkoušených tělesa stanovovala dle normy *ČSN EN 12697-6 Asfaltové směsi – Zkušební metody – Část 6: Stanovení objemové hmotnosti asfaltového zkušebního tělesa*. Byly použity dva postupy. Za prvé to byl postup B: Objemová hmotnost – nasycený suchý povrch (SSD). Druhým postupem, který se použil při výrobě těles pro zkoušku ITSr byl postup D: Objemová hmotnost podle rozměrů. [34]

Postup B: Objemová hmotnost – nasycený suchý povrch (SSD)

Při použití postupu B je nutné nejprve zvážit tělesa za suchého stavu. Následně jsou tělesa ponořena do vodní lázně, kde se ponechají po dobu 30 minut. Po uplynutí této doby se provede vážení vzorků pod vodou. Takto zvážená tělesa se vyndají z vodní lázně, povrchově osuší, a následně se stanoví jejich hmotnost na vzduchu. Jednotlivé objemové hmotnosti se poté dopočítají z následující rovnice 1. [34]

Rovnice 1: Stanovení objemové hmotnosti SSD

$$\rho_{bssd} = \frac{m_1}{m_3 - m_2} \times \rho_w$$

kde:	ρ_{bssd}	je	objemová hmotnost SSD, v kg/m ³
	m_1		hmotnost suchého tělesa, v g
	m_2		hmotnost tělesa ve vodě, v g
	m_3		hmotnost tělesa nasyceného vodou a povrchově osušeného, v g
	ρ_w		hustota vody při zkušební teplotě stanovená s přesností na 0,1 kg/m ³ , v kg/m ³ [29]

Postup D: Objemová hmotnost podle rozměrů

Jak už bylo zmíněno objemová hmotnost z rozměrů se stanovila u těles, která byla použita pro zkoušku ITSR. Objemová hmotnost Marshallových těles se vypočítala následovně:

Rovnice 2: Stanovení objemové hmotnosti z rozměrů

$$\rho_{b,dim} = \frac{m_i}{\pi \times \frac{d_i^2}{4} \times h_i} \times 10^6$$

kde	$\rho_{b,dim}$	je	objemová hmotnost zkušebního tělesa podle rozměrů, v kg/m ³
	m_i		hmotnost suchého tělesa, v g
	d_i		průměr zkoumaného tělesa, v mm
	h_i		výška zkoumaného tělesa, v mm [34]

4.8.2 Maximální objemová hmotnost

Měření maximální objemové hmotnosti jsem prováděl za pomoci pyknometrů na navržené asfaltové směsi ACO 11+. Celý postup je uveden v normě *ČSN EN 12697-5 Asfaltové směsi – Zkušební metody – Část 5: Stanovení maximální objemové hmotnosti*. Měření se provádělo ve dvou pyknometrech. U dvojice pyknometrů bylo nutné nejdříve stanovit jejich hmotnost bez materiálu. Následně jsem do jednotlivých pyknometrů nasypal asfaltovou směs do nutné výšky. Poté se celý obsah navážky zalil destilovanou vodou. Takto přichystané pyknometry byly vloženy do vakuové nádoby. Aby došlo k odvzdušnění destilované vody byly pyknometry

ponechány ve vakuu po dobu 15 minut. Pyknometry se následně dají temperovat na teplotu 25 °C do vodní lázně. Po 30 minutách byly oba pyknometry vyjmuty z lázně, doplnila se voda po referenční značku a následně byly oba pyknometry znovu převáženy. Výslednou objemovou hmotnost získáme díky rovnici 3: [35]

Rovnice 3: Stanovení maximální objemové hmotnosti

$$\rho_{mv} = \frac{m_2 - m_1}{1000 \times \left(V_p - \frac{m_3 - m_2}{\rho_w} \right)}$$

kde	m_1	je	hmotnost pyknometru a nástavce, v g
	m_2		hmotnost pyknometru, nástavce a vzorku, v g
	m_3		hmotnost pyknometru, nástavce, vzorku a rozpouštědla, v g
	V_p		objem pyknometru při naplnění po referenční značku nástavce, v m ³
	ρ_w		hustota destilované vody při zkušební teplotě v kg/m ³ s přesností 0,1 kg/m ³ [35]



Obrázek 31: Pyknometry s asfaltovou směsí a destilovanou vodou

4.8.3 Stanovení mezerovitosti asfaltové směsi V_m

Jedná se o procentuální vyjádření objemu mezer ve zkušebním tělese asfaltové směsi, který je vztažen vůči celkovému objemu zkušebního tělesa. Mezerovitost as. směsi se určuje dle evropské normy *ČSN EN 12697-8 Asfaltové*

směsi – Zkušební metody – Část 8: Stanovení mezerovitosti asfaltových směsí.

Ke stanovení mezerovitosti využijeme vztahu mezi objemovou hmotností a maximální objemovou hmotností zkoušené směsi. [36]

Rovnice 4: Stanovení mezerovitosti as. směsi

$$V_m = \frac{\rho_m - \rho_b}{\rho_m} \times 100$$

kde ρ_m je maximální objemová hmotnost směsi v kg/m^3
 ρ_b objemová hmotnost zkušební tělesa v kg/m^3
 V_m mezerovitost směsi s přesností 0,1 % [36]

4.8.4 Mezerovitost směsi kameniva VMA

Jedná se o objem mezer mezi jednotlivými zrny kameniva zhutněné asfaltové směsi, jež zahrnuje objem asfaltového pojiva ve zkušebním tělese a mezery vyplněné vzduchem. Vyjadřuje se jako procento celkového objemu zkušební tělesa. [36]

Rovnice 5: Mezerovitost směsi kameniva VMA

$$VMA = V_m + B \times \rho_{bssd} / \rho_B$$

kde VMA je mezerovitost směsi kameniva v % s přesností 0,1 %
 V_m mezerovitost zkušební tělesa s přesností 0,1 %
 B obsah pojiva ve zkušebním tělese (ve 100 % směsi) v % s přesností 0,1 %
 ρ_{bssd} objemová hmotnost zkušební tělesa v kg/m^3
 ρ_B objemová hmotnost pojiva v kg/m^3 [36]

4.8.5 Stupeň vyplnění mezer pojivem VFB

Stupeň vyplnění mezer ve zhutněné asfaltové směsi vyjadřuje objem asfaltového pojiva z celkového objemu mezer kostry kameniva. [36]

Rovnice 6: Stupeň vyplnění mezer pojivem VFB

$$VFB = ((B \times \rho_{bssd} / \rho_B) / VMA) \times 100$$

kde VFB je stupeň vyplnění mezer ve směsi kameniva pojivem s přesností 0,1 %

B	obsah pojiva ve zkušebním tělese (ve 100 % směsi) v % s přesností 0,1 %
ρ_{bssd}	objemová hmotnost zkušebního tělesa v kg/m ³
ρ_{B}	objemová hmotnost pojiva v kg/m ³
VMA	mezerovitost směsi kameniva v % s přesností 0,1 % [36]

4.9 Laboratorní zkoušky asfaltových směsí

4.9.1 Zkouška odolnosti vůči vodě (ITSR)

Stanovení odolnosti zkušebních těles vůči vodě bylo prováděno dle normy *ČSN EN 12697-12 Asfaltové směsi – Zkušební metody – Část 12: Stanovení odolnosti zkušebního tělesa vůči vodě*. Při zkoušce jsem postupoval dle metody A, která je vyjádřena jako hodnota ITSR. Tato veličina je získaná ze zkušebních tělesek zhutněné asfaltové směsi. ITSR (indirect tensile strength ratio), neboli poměr pevností v příčném tahu. Jedná se o poměr pevností v příčném tahu „mokrých“ (temperovaných ve vodní lázni) a „suchých“ zkušebních těles, vyjádřený v procentech. Před samotnou zkouškou bylo nutné určit objemovou hmotnost jednotlivých těles z jejich rozměrů. [37]

Postup temperování zkušebních těles

Sada zkušebních Marshallových těles se nejprve rozdělila do dvou skupin po třech tělesech. Skupinu suchých těles jsem uložil na rovný povrch při laboratorní teplotě (20 ± 5) °C po dobu 72 ± 4 hodiny. Skupinu mokrých těles jsem uložil do nádoby ve vakuové komoře naplněné destilovanou vodou o teplotě (20 ± 5) °C, tak aby vodní hladina byla nejméně 20 mm nad horním povrchem zkušebních těles. Ve vakuové komoře se následně vytvořil absolutní (zbytkový) tlak (6,7 ± 0,3) kPa. Tento požadovaný tlak se udržoval ve vakuové komoře po dobu (30 ± 5) min. Poté se do vakuové komory začal pozvolna vpouštět tlak atmosférický. Skupina mokrých těles se po vyjmutí z vakuové komory uložila do vodní lázně o teplotě (40 ± 1) °C na dobu 72 ± 4 hodiny. [37]



Obrázek 32: Marshallova zkušební tělesa v otevřené vakuové komoře

Příprava zkoušky

Po dokončení temperace se obě sady těles zahřály na zkušební teplotu 15 ± 2 °C, což je požadovaná standardní zkušební teplota. Skupina suchých těles se uložila do temperační komory, kde byla při teplotě 15 °C ponechána 2 až 3 hodiny. Skupina mokrých těles se na požadovanou teplotu dostala tím, že byla uložena do vodní lázně o teplotě 15 °C, rovněž na dobu 2 až 3 hodiny. [37]

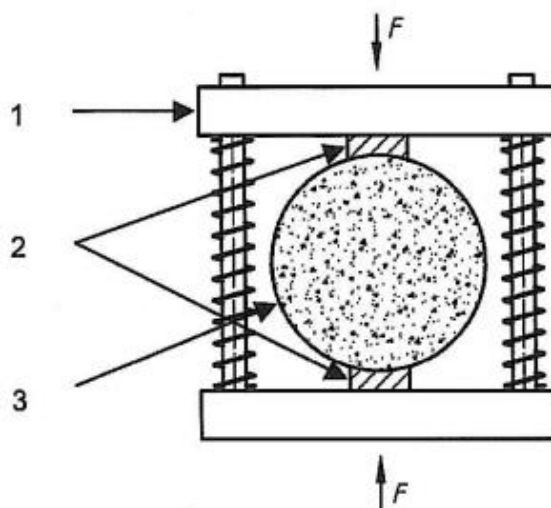
Postup zkoušky (ITS)

U zkušebních těles se stanovila pevnost v příčném tahu dle normy *ČSN EN 12697-23 Asfaltové směsi – Zkušební metody – Část 23: Stanovení pevnosti v příčném tahu*. Temperované těleso se po vyjmutí z lázně osušilo (v případě suché sady nebylo potřeba) Následně bylo upnuto do zkušebního přípravku mezi zatěžovací ocelové pásy, tak aby bylo zatěžováno podél středové osy. Při zkoušce byli použity zatěžovací pásy šířky $12,7 \text{ mm} \pm 0,2 \text{ mm}$. Marshallovo těleso je během této zkoušky deformováno pomocí síly, kterou vyvine zkušební zařízení (viz obrázek 33). Zkouška probíhá až do porušení tělesa, přičemž se zjišťuje maximální tlačná síla a deformace. Zkoušku je třeba po vyjmutí z vodní lázně provést do 1 minuty. Výsledkem této zkoušky je pevnost v příčném tahu ITS. [38]



Obrázek 33: Průběh zkoušky ITS

- 1 Tlačná čelist
- 2 Zatěžovací pásy
- 3 Zkušební těleso



Obrázek 34: Schéma zatěžovacího lisu

Rovnice 7: Pevnost v příčném tahu ITS

$$ITS = \frac{2P}{\pi D H}$$

- | | | | |
|-----|-----|----|-----------------------------------|
| kde | ITS | je | pevnost v příčném tahu v kPa |
| | P | | maximální zatížení v kN |
| | D | | průměr zkušebního tělesa v mm |
| | H | | výška zkušebního tělesa v mm [38] |

Rovnice 8: Poměr pevnosti v příčném tahu ITS_R

$$ITS_R = 100 \times \frac{ITS_w}{ITS_d}$$

kde	ITS _R	je	poměr pevnosti v příčném tahu v %
	ITS _w		průměrná pevnost v příčném tahu skupiny mokrých zkušebních těles v kPa
	ITS _d		průměrná pevnost v příčném tahu skupiny suchých zkušebních těles v kPa [37]

4.9.2 Odolnost proti trvalým deformacím (zkouška poježdění kolem)

Zkouška popisuje náchylnost asfaltové směsi na tvorbu trvalých deformací, jež vznikají při neustálém poježdění kolem po asfaltové zkušební desce za konstantní teploty. Zkouška byla provedena na dvou deskách (referenční a deska s vlákny) o rozměrech 50 mm x 260 mm x 320 mm. Zkouška probíhala ve zkušebním zařízení, které neustále zaznamenávalo hloubku vyjeté koleje a udržovalo konstantní teplotu během zkoušky. Zkouška probíhá dle normy *ČSN EN 12697-22 Asfaltové směsi – Zkušební metody – Část 22: Zkouška poježdění kolem*. [39]

Desky se nejprve umístily do zkušebních forem, následně se do formy umístily distanční podložky a ocelová podkladní deska. Zkušební deska se umístila tak, že její horní povrch lícuje s horními hranami zkušební formy. Obě takto připravené formy se vložily do laboratorní sušárny, kde probíhala jejich temperace na požadovanou teplotu (60 ± 1) °C. Desky se v sušárně nechají temperovat po dobu minimálně 4 hodin, maximálně však 24 hodin. [39]



Obrázek 35: Zkušební desky osazené ve formách

Po temperaci se vzorky včetně formy umístily do zkušebního zařízení, které bylo vytemperované rovněž na zkušební teplotu (60 ± 1) °C. Tato teplota tak byla zvýšena, oproti standardní zkušební teplotě, která činí (50 ± 1) °C. Poté se zařízení spustí a provádí se opakovaný pojezd desek 10 000 zatěžovacími cykly (20 000 pojezdy), přičemž se zaznamenávala hloubka vyjeté koleje v procentech. Pojezd probíhal ve vzduchové temperační komoře. Po dosažení požadované počtu cyklů se zkouška ukončila. [39]



Obrázek 36: Zkušební zařízení simulující pojezdění kolem

Stanovení průměrného přírůstku hloubky vyjeté koleje na vzduchu

Zařízení zaznamenává hodnoty hloubek vyjetých kolejí každých 50 cyklů. Pro stanovení průměrného přírůstku se vezmou hodnoty hloubek kolejí po 5 000 a 10 000 zatěžovacích cyklech. [36]

Rovnice 9: Přírůstek hloubky vyjeté koleje

$$WTS_{AIR} = \frac{d_{10000} - d_{5000}}{5}$$

kde WTS_{AIR} je přírůstek hloubky vyjeté koleje, v $\text{mm}/10^3$ zatěžovacích cyklů,

d_{5000} je hloubka vyjeté koleje po 5 000 cyklech, v mm,

d_{10000} je hloubka vyjeté koleje po 10 000 cyklech, v mm. [39]

Poměrná hloubka vyjeté koleje s přesností na $\pm 0,1\%$, spočítá dle vztahu:

Rovnice 10: Poměrná hloubka vyjeté koleje

$$PRD_{AIR} = \frac{y_{s,10000}}{t} \times 100\%$$

- kde PRD_{AIR} je poměrná hloubka vyjeté koleje po 10000 zatěžovacích cyklech, v %
- t je průměrná tloušťka zkušební desky; v mm;
- y_{s10000} je hloubka vyjeté koleje po 10 000 cyklech, v mm. [39]

4.9.3 Stanovení modulů tuhosti

Zkouška probíhá na zkušebních tělesech tvaru trapezoidů (viz fotografie na obr. 37). Tělesa jsou jednostranně vetknuta ve zkušební temperační komoře za pomoci podložky, která je přilepena ke spodní hraně trapezoidu. V této komoře jsou tělesa na volném (horním) konci namáhána ohybem. Horní konec je zatěžován harmonickým (sinusovým) kmitáním – silou odpovídající poměrnému přetvoření maximálně 50 mikrostrainů. Je zde předpoklad, že toto přetvoření odpovídá lineárnímu rozsahu namáhání asfaltové směsi. Moduly tuhosti byly stanoveny pro každou zkoušenou sadu při teplotách 10, 15, 20 °C a základních frekvencích 5, 10, 15, 20, 25 a 27 Hz. Z každé zkušební sady bylo testováno 10 těles. Zkouška probíhala v souladu s normou *ČSN EN 12697-26 Asfaltové směsi – Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka – Část 26: Tuhost*. [40]

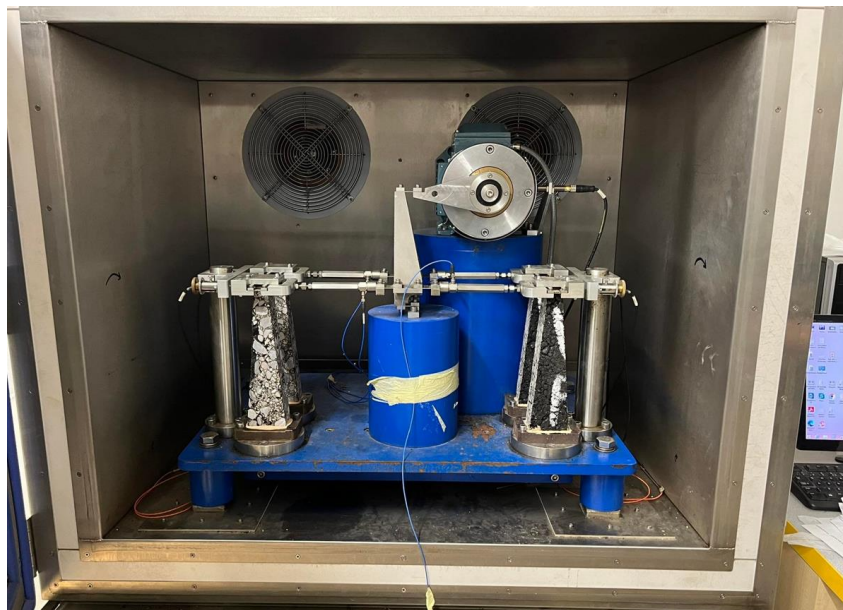


Obrázek 37: Zkušební tělesa tvaru trapezoidů

4.9.4 Zkouška stanovení odolnosti vůči únavě asfaltové směsi

Zkouška odolnosti vůči únavě probíhala dle evropské normy *ČSN EN 12697-24 Asfaltové směsi – Zkušební metody – Část 24: Odolnost vůči únavě* (dále v tomto odstavci jen norma) metodou 2 PB (point bending), tj. zatěžováním jednostranně vetknutých těles tvaru trapezoidů. Zkouška probíhá při zkušební teplotě 15 °C a zatěžovací frekvenci 10 Hz. Při zkoušce únavy je nejprve zjištěn počáteční modul tuhosti asfaltové směsi, následně dochází k cyklickému namáhání tělesa konstantní výchylkou. Těleso je namáháno až do okamžiku, kdy modul tuhosti klesne na polovinu své počáteční hodnoty. V ten okamžik je zkouška dokončena. Výsledky zkoušky jsou zobrazeny pomocí Wöhlerova únavového diagramu. Tento diagram znázorňuje závislost počtu cyklů při porušení těles na počátečním přetvoření zkušebních těles udávaným v mikrostrainech (odpovídající počáteční výchylce). Pro charakteristiku únavových vlastností asfaltových směsí je třeba zjistit hodnotu poměrného přetvoření, která odpovídá jednomu milionu zatěžovacích cyklů. Standardně se zkouška provádí na 18 zkušebních tělesech pro každou sadu, z hlediska velké časové náročnosti bylo v rámci této diplomové práce testováno jen 14 těles pro každou sadu. V normě je dále vznesen požadavek, aby aspoň 1/3 zkušebních těles byla porušena před dosažením jednoho milionu cyklů a nejméně 1/3 zkušebních těles musí být porušena při počtu cyklů větším než jeden milion cyklů. Zkouška odolnosti vůči únavě probíhá ve stejném zařízení jako zkouška modulů tuhosti. [41]

V současné době žádná česká norma ani předpis nevznáší požadavek na zkoušku odolnosti vůči únavě pro obrusné vrstvy. V rámci diplomové práce však byla zkouška únavy provedena pro navrženou směs ACO 11+ a to z důvodů zjištění chování rozptýlených vláken ve směsi. Při tom se vychází z předpokladu, že vlákna obecně nemusí být použita pouze do obrusné vrstvy, ale i do vrstev podkladních a ložních.



Obrázek 38: Upnutá zkušební tělesa ve zkušební komoře

5 PRAKTICKÁ ČÁST – POUŽITÉ MATERIÁLY

5.1 Kamenivo

Kamenivo pro výrobu asfaltových směsí bylo odebráno na obalovně asfaltových směsí v Rajhradcích u Brna. Byly odebrány celkem tři frakce kameniva 0/4, 4/8 a 8/11, které se používají pro výrobu zvolené směsi ACO 11+. Kamenivo pochází z kamenolomu Luleč. Těženou horninou je droba. Frakce 0/4 je na obalovně uskladněna v zastřešené skládce. Frakce 4/8 a 8/11 jsou skladovány v otevřené skládce.

Kamenivo dle certifikátů a dokumentů kamenolomu a obalovny splňuje požadavky normy *ČSN EN 13043 Kamenivo pro asfaltové směsi a povrchové vrstvy pozemních komunikací, letištních a jiných dopravních ploch*. [42]

Filer pro zhotovení směsi ACO 11+ byl odebrán v laboratoři ústavu PKO.



Obrázek 39: Kamenivo Luleč frakce 8/11



Obrázek 40: Kamenivo Luleč frakce 4/8



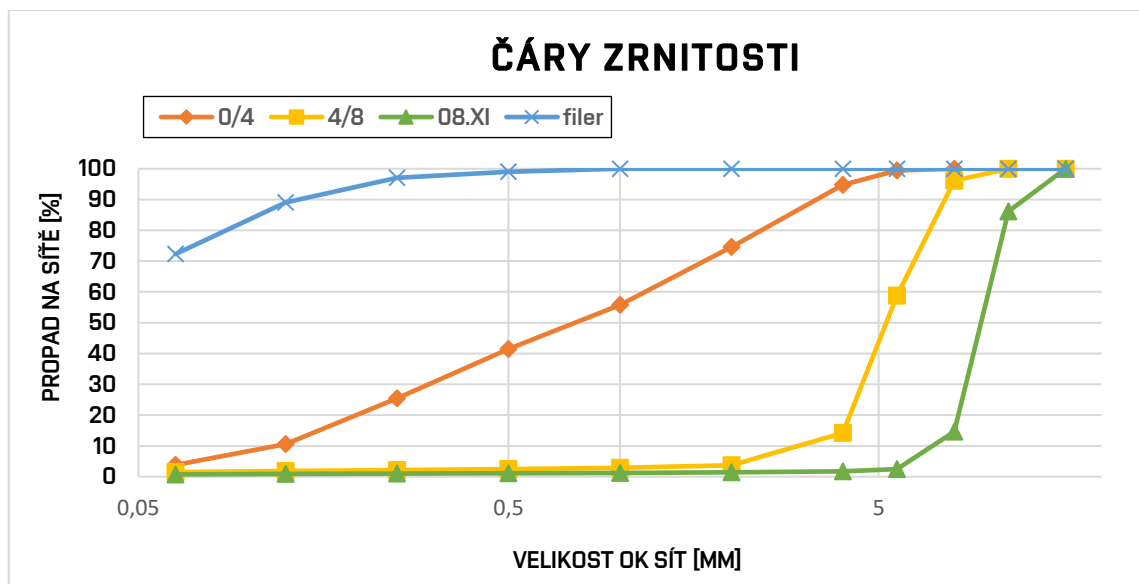
Obrázek 41: Kamenivo Luleč frakce 0/4

Zrnitosti kameniva pro laboratorní výrobu asfaltové směsi ACO 11+

Čáry zrnitosti byly stanoveny pro jednotlivé frakce kameniva. Pro provedení síťových rozborů bylo nutné jednotlivé frakce kameniva homogenizovat a provést jejich kvartaci. Pro každou frakci kameniva byl proveden jeden síťový rozbor.

Tabulka 5: Síťový rozbor frakcí kameniva

frakce [mm]	Propad v % na sítích										
	16	11,2	8	5,6	4	2	1	0,5	0,25	0,125	0,063
0/4	100,00	100,00	100,00	99,49	94,71	74,59	55,75	41,43	25,39	10,57	3,82
4/8	100,00	100,00	96,13	58,75	14,17	3,74	2,84	2,47	2,15	1,87	1,52
8/11	100,00	86,15	14,62	2,50	1,79	1,39	1,21	1,11	1,02	0,91	0,72
filer	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	99,00	97,00	89,00	72,30



Graf 5: Čáry zrnitosti frakcí kameniva Luleč a fileru

5.2 Asfaltové pojivo

Do vyráběné asfaltové směsi byl použit asfalt 50/70 od rakouského výrobce OMV. Jedná se o běžné nemodifikované asfaltové pojivo, které se používá při výrobě asfaltových směsí, opravách a údržbách pozemních komunikacích. Na asfaltovém pojivu byly provedena zkouška penetrace jehlou a stanoven bod měknutí metodou kroužek kulička. Výsledky zkoušek jsou uvedeny v následujících tabulkách 6 a 7.

Tabulka 6: Penetrace pojiva 50/70, OMV

druh pojiva	výrobce	Penetrace [p.j.]				
		naměřené hodnoty				průměr
asfalt 50/70	OMV	55,7	52,7	52,7	53,2	54

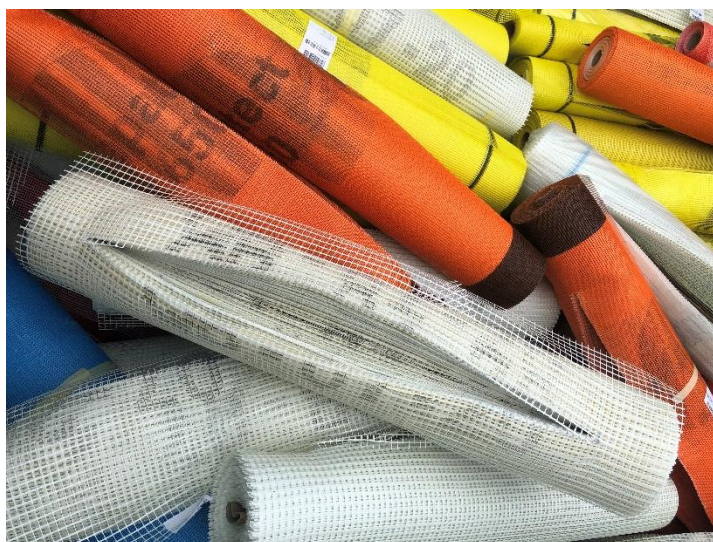
Tabulka 7: Bod měknutí pojiva 50/70, OMV

druh pojiva	výrobce	Bod měknutí [°C]		
		levá kulička	pravá kulička	průměr
asfalt 50/70	OMV	53,7	52,6	53,2

5.3 Skelná vlákna

Do asfaltové směsi byla použita skelná vlákna, která vznikla jako odpadní materiál při výrobě stavební textilie.

Perlinka je laminová sklo-vláknitá mřížková vyztužovací umělá tkanina. Využívá se jako zpevnění omítek, stěrkových hmot a stavebních lepidel. Povrchy vyztužené perlinkou by měly mít větší pevnost a pružnost. [43]



Obrázek 42: Stavební perlinka převzato z [44]

Vlákna jsou tvořena ze 2 druhů sklovláknitých materiálů:

- R 131 A101
- U H 50 /1

5.3.1 R 131 A101

Jedná se o síťovinu ze skelných vláken se speciální povrchovou úpravou. Síťovina R 131 se využívá především jako složka vnějších zateplovacích systémů. Syntetický povlak chrání síťovinu před působením alkálií, lepidel a jiných vnějších vlivů.[44]



Obrázek 43: Použití stavební perlinky [44]

Technické parametry:

Tabulka 8: Technické parametry R 131 A101 [44]

veličina	jednotka/ popis	hodnota
plošná hmotnost	g/m ² / informativní hodnota	131
délka role	m/ informativní hodnota	50
standartní šířka	m/ informativní hodnota	0,10-0,11
pevnost v tahu (TS)		prodloužení
	jmenovitá hodnota [N/50 mm]	průměrná hodnota [%]
standardní stav	2200/2200	3,8/3,8
rychlý test (6 hod.)	1700/1700	3,5/3,5

5.3.2 UH 50/1

Jedná se za mokra kladenou skelnou textilií, která se používá pro svůj vzhled a odolnost vůči nárazům. Je vhodná pro nové nebo renovované stěny a stropy. Jedná se o poměrně měkkou tkaninu, která se snadno instaluje a je odolná vůči trhání. Lze ji použít pro malované stropy, obklady stěn, PVC obklady a různé druhy oprav. [45]



Obrázek 44: Za mokra kladená skelná textilie [45]

Technické parametry:

Tabulka 9: Technické parametry U H 50 /1 [45]

veličina	jednotka/ popis	hodnota
hmotnost	g/m ² / nominální hodnota	50
délka role	m/ nominální hodnota	3000
standartní šířka	m/ nominální hodnota	<0,42
tloušťka	mm/ nominální hodnota	0,46
pevnost v tahu (TS)		prodloužení
	nominální hodnota [N/50 mm]	minimální hodnota [N/50 mm]
v podélném směru	230	170
v kolmém směru	205	140

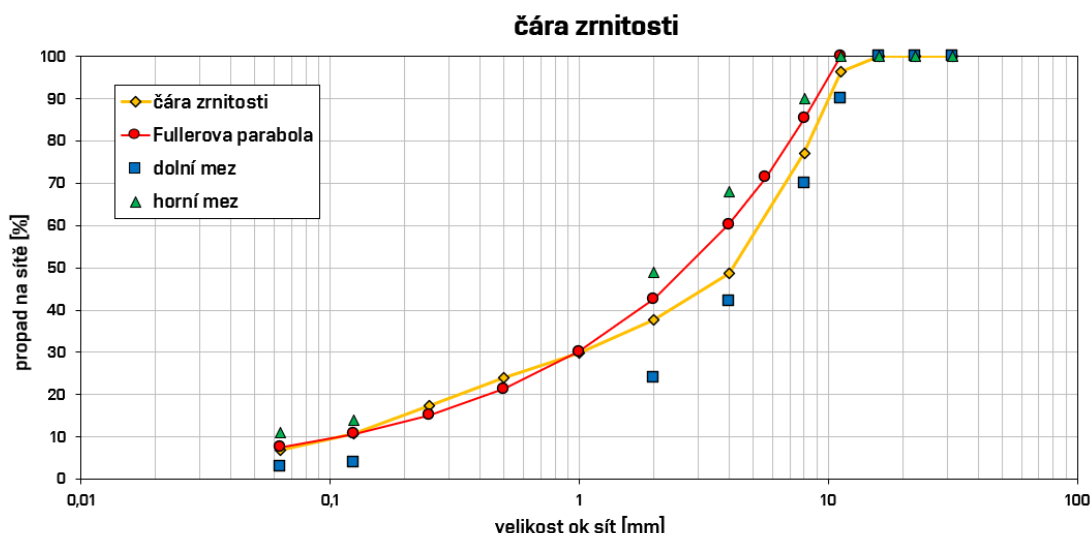
5.4 Návrh asfaltové směsi

Pro účely diplomové práce byla navržena asfaltová směs ACO 11+. Jedná se o asfaltovou směs pro obrusné vrstvy, která se standardně využívá v dopravním stavitelství. Směs byla vyrobena v silniční laboratoři PKO. Vytvořená směs neobsahovala R-materiál. Bylo vytvořeno celkem 5 zkušebních směsí: standardní asfaltová směs ACO 11+ a 4 asfaltové směsi ACO 11+ se skelnými vlákny.

5.4.1 Zrnitost

Tabulka 10: Čára zrnitosti směsi ACO 11+

Čára zrnitosti	Propad v % na sítích										
	16	11,2	8	5,6	4	2	1	0,5	0,25	0,125	0,063
frakce	100,00	86,15	14,62	2,50	1,79	1,39	1,21	1,11	1,02	0,91	0,72
8/11	100,00	100,00	96,13	58,75	14,17	3,74	2,84	2,47	2,15	1,87	1,52
4/8	100,00	100,00	100,00	99,49	94,71	74,59	55,75	41,43	25,39	10,57	3,82
0/4	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	99,00	97,00	89,00	72,30
filer	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
horní mez	100,00	90,00	70,00	-	42,00	24,00	-	-	-	4,00	3,00
dolní mez	100,00	100,00	90,00	-	68,00	49,00	-	-	-	14,00	11,00
Fullerova parabola		100,00	85,28	71,35	60,30	42,64	30,15	21,32	15,08	10,66	7,57
navržená směs	100,00	96,47	77,15	63,38	48,81	37,74	29,90	23,98	17,32	10,76	6,84



Graf 6: Navržená čára zrnitosti, ACO 11+

5.4.2 Skladba kameniva ve směsi

Tabulka 11: Skladba kameniva směsi ACO 11+

nová	množství [%]	průběžný součet [%]
filer	6,50	6,50
0/4	40,00	46,50
4/8	28,00	74,50
8/11	25,50	100,00
celkem	100	

V grafu č. 6 je vynesena Fullerova parabola, která má představovat čáru zrnitosti s nejtěsnějším uspořádání zrn. Dále je zde uvedena dolní a horní mez směsi ACO 11+, jež určují možný interval pro návrh čáry zrnitosti směsi dle normy *ČSN EN 13108-1 ED.2 Asfaltové směsi – Specifikace pro materiály – Část 1: Asfaltový beton.*[46] Z uvedeného grafu je patrné, že navržená směs tyto požadavky splňuje.

5.4.3 Dávkování skelných vláken

Tabulka 12: Dávkování skelných vláken

Tabulka zhotovených směsí		
směs	obsah vláken	hmotnost připadající na 1165 g as. směsi
R, N	0,00 %	0,0 g
V	0,20 %	2,3 g
U	0,30 %	3,5 g
W	0,50 %	5,8 g
X	1,00 %	11,7 g

V tabulce 12 můžeme vidět dávkování skelných vláken do jednotlivých směsí, dále je zde uvedeno množství vláken připadající na jedno Marshallovo těleso v gramech.

6 PRAKTICKÁ ČÁST – VÝSLEDKY

Tato diplomová práce si kladla za cíl zjistit co možná nejvíce poznatků o zpracovatelnosti a chování skelných vláken v asfaltové směsi. Testování těchto vláken, která vznikla jako odpadní materiál při výrobě stavebních skelných produktů, je rozdělena následovně:

- **Část 1):** Hodnocení použitých skelných vláken.
- **Část 2):** Zpracovatelnost skelných vláken jako komponenty v asfaltové směsi.

V této kapitole byly vytvořeny asfaltové směsi (bez vláken a s vlákny) a z nich následně zhotoveny sady zkušebních těles. Byly zjištěny charakteristické veličiny jako objemová hmotnost, maximální objemová hmotnost, mezerovitost, stupeň vyplnění mezer, aj. V neposlední řadě bylo zjišťováno chování skelných vláken při výrobě směsí (míchání a hutnění), tj. jejich zpracovatelnost v asfaltových směsích.

- **Část 3):** Vliv použití skelných vláken v asfaltových směsích na vybrané vlastnosti směsí a jejich porovnání s referenční směsí bez skelných vláken.

Pro účely tohoto posouzení byly provedeny následující zkoušky:

- A) Stanovení odolnosti asfaltové směsi vůči vodě (ITSR)
- B) Odolnost proti trvalým deformacím (Vyjeté koleje)
- C) Stanovení modulů tuhosti
- D) Odolnost vůči únavě

6.1 Výsledky – Část 1) Hodnocení použitých skelných vláken

Na obrázku 45 je zachycen materiál, který byl použit pro laboratorní testování. Z fotografie je patrné, že se jedná o značně nehomogenní směs. Materiál obsahuje jak samotná sklená vlákna (odpad z výroby perlínky), tak i shluky skelné tkaniny. Vlákna a shluky jsou ve vzorku materiálu zastoupeny rovnoměrně. Skelná vlákna mají různé délky, nejdelší jsou dlouhé cca 20 mm, převážná část vláken ale není delší než 5 mm.

Materiál se použil pro další zpracování bez dalších úprav. Před přidáním do asfaltových směsí byla provedena pouze jeho homogenizace, neprovádělo se oddělení vláken od skelné tkaniny (shluků) ani roztřídění vláken dle jejich délky.



Obrázek 45: Použitá skelná vlákna

6.2 Výsledky – Část 2) Zpracovatelnost skelných vláken jako komponenty v asfaltové směsi.

Při výrobě asfaltové směsi ACO 11+, byla vlákna přidávána do asfaltové směsi v průběhu míchání horkého kameniva, před přidáním asfaltového pojiva. Vycházel jsem z poznatků teoretické rešerše a vlastní zkušenosti z bakalářské práce, která se zabývala *Ověřením možnosti recyklace geosyntetických výztužných mříží v asfaltových směsích* [7]. Při aplikaci vláken spolu s asfaltovým pojivem dochází k nerovnoměrnému rozprostření vláken ve směsi, vlákna jsou rychle obalena pojivem a nedojde k potřebnému promíchání. Přidání vláken spolu s kamenivem bylo

docíleno požadovaného rozptýlení vláken ve směsi a vytvořeny relativně ideální podmínky, ve kterých se působení vláken může nejvíce projevit (viz obr. 46). Bylo vytvořeno celkem 5 zkušebních sad s různým dávkováním skelných vláken (0 %, 0,2 %, 0,3 %, 0,5 %, 1,0 %) viz tab.12 str.61. Dávkování bylo voleno rovněž na základě teoretické rešerše a dřívějších zkušeností. Postup výroby asfaltové směsi byl stejný jak při ručním míchání, tak při přípravě v laboratorní míchačce.



Obrázek 46: Míchání horkého kameniva a vláken při výrobě asfaltové směsi



Obrázek 47: Namíchaná asfaltová směs se skelnými vlákny

Při výrobě nedocházelo vlivem přidání vláken ke zhoršení zpracovatelnosti směsi. Vlákna se bez komplikací promísila s kamenivem a nebylo nutné prodloužit dobu míchání. Po přidání pojiva opět nedocházelo k žádným negativním vlivům vláken na tvořenou směs. Vlákna se podařilo obalit asfaltovým pojivem obdobně jako

kamenivo, rovněž nebylo nutné prodloužit dobu míchání. Žádné ze zvoleného dávkování vláken (0 %, 0,2 %, 0,3 %, 0,5 %, 1,0 %) se nijak neprojevovalo na výrobě výsledných směsí. Lze tak konstatovat, že použitá vlákna neměla žádný vliv na zpracovatelnost směsí. Vlákna byla ve vyrobených směsích a na zhotovených vzorcích na pohled dobře viditelná a bylo tak znát dobré obalení asfaltem (viz obrázek 48). Zkušební vzorky obsahující skelná vlákna nevykazovala žádné odlišnosti od desek bez skelných vláken.



Obrázek 48: Detail zhutněné desky s vlákny

V následující tabulce 13 lze vidět základní charakteristiky asfaltové směsi ACO 11+, přičemž je zřejmé, že navržená směs dosáhla mezerovitosti 2,7 %. V další tabulce 14 jsou pak zachyceny hmotnostní podíly skelných vláken do jednotlivých sad Marshallových těles.

Tabulka 13: Základní charakteristiky vyrobené směsi ACO 11+

vzorek	ρ_{bssd} [kg/m ³]	$\emptyset \rho_{\text{bssd}}$ [kg/m ³]	ρ_{mv} [kg/m ³]	V_m [%]	$\emptyset V_m$ [%]	VMA [%]	VFB [%]
1	2352	2356	2422	2,9	2,7	16,2	82,1
2	2363			2,4		15,8	84,6
3	2353			2,8		16,1	82,4

Tabulka 14: Dávkování skelných vláken do směsí pro Marshallova tělesa

Tabulka zhotovených směsí		
sada	obsah vláken	hmotnost připadající na 1165 g asfaltové směsi
R,N	0,00 %	0,0 g
V	0,20 %	2,3 g
U	0,30 %	3,5 g
W	0,50 %	5,8 g
X	1,00 %	11,7 g

6.3 Výsledky – Část 3) Vliv použití skelných vláken v asfaltových směsích na vybrané vlastnosti směsí a jejich porovnání s referenční směsí bez skelných vláken

V následujících kapitolách jsou uvedeny výsledky zkoušek prováděných na jednotlivých asfaltových směsích. Veškeré naměřené výsledky jsou podrobně uvedeny v samostatných přílohách této práce.

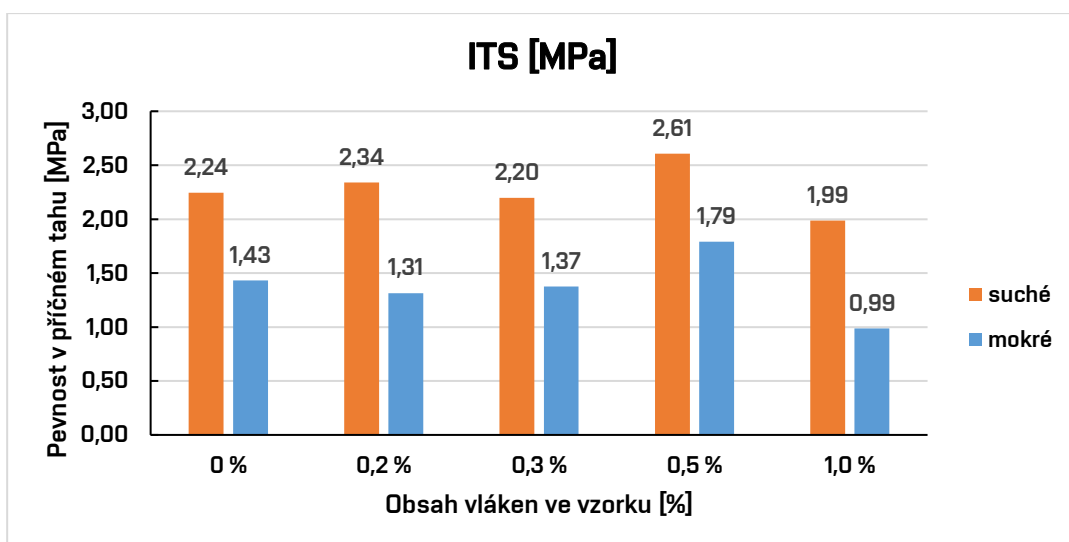
6.3.1 Stanovení odolnosti asfaltové směsi vůči vodě (ITSR)

Zkouška ITSR byla provedena na celkem 5 zkušebních sadách. Výsledky této zkoušky jsou souhrnně popsány v následující tabulce 15. Jak je z výsledků patrné použití skelných vláken, v množství menším jak 0,5 % hmotnostního podílu směsi, se na výsledcích ITS (pevnosti v příčném tahu) výrazně neprojevilo. Nejlepších výsledků dosáhla směs W (0,5 %), která dosáhla pevnosti v příčném tahu 2,61 MPa (v příp. suchých zkušebních těles), což je o 16,5 % více, než měla referenční směs R. Toto zlepšení lze vidět na grafu ITS (graf 7). Hodnoty pevností v příčném tahu ITS směsi W vykazovaly také menší směrodatnou odchylku oproti referenční směsi R,N, jak u suchých tak i u mokrých těles viz. tabulka 15. Naproti tomu sada těles X, obsahující nejvíce vláken (1 %) dosahovala nejhorších výsledků: Oproti referenční sadě R byla pevnost v příčném tahu nižší o 25 % (v příp. suchých zkušebních těles). Na vině je nespíš ono velké množství aplikovaných vláken, která nasákla velké množství asfaltového pojiva a narušila tak výslednou strukturu asfaltové směsi. Sada V s obsahem vláken 0,2 % hmotnostního podílu směsi má hodnotu ITSR nižší o 7,6 %, než je u sady R,N (graf 8). Jelikož ale sady U a W obsahující více vláken dosahovaly lepších hodnot, bude tento rozdíl souviset spíše s postupem zkoušky ITSR, než se

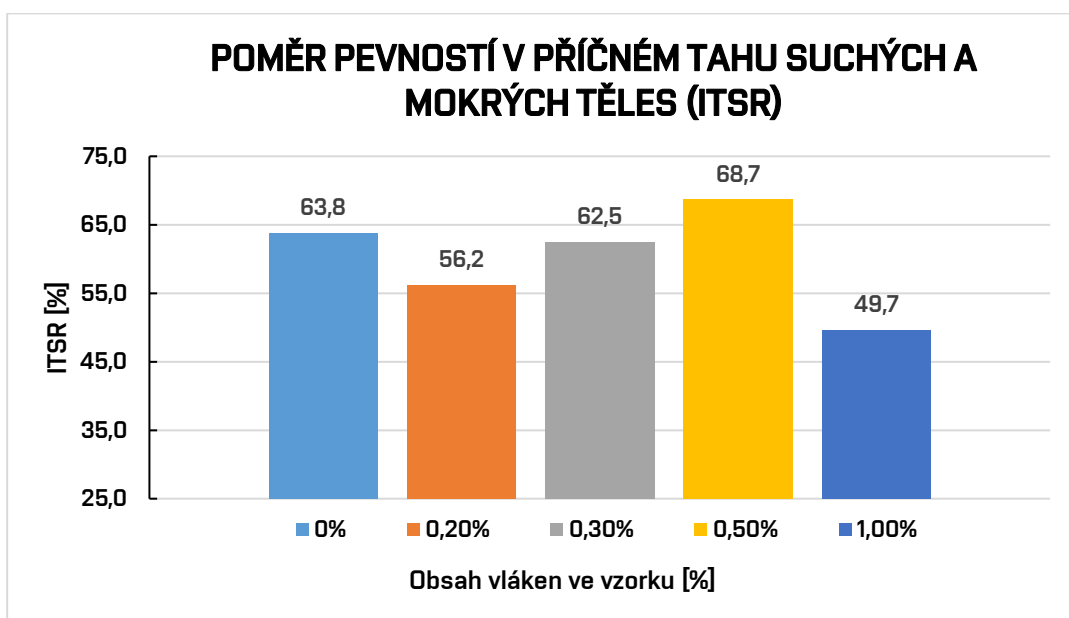
samotným obsahem vláken. Zkouška ITSR je velmi citlivá na změnu teploty a také závisí na rychlosti přípravy tělesa do zkušebního přípravku před zkouškou. Z toho důvodu je možné, že zkoušená sada V (0,2 %) nemusela mít optimální zkušební teplotu.

Tabulka 15: Vyhodnocení zkoušky ITSR

sada	vzorek	obsah vláken	číslo tělesa	maximální síla [kN]	posun při F _{max} [mm]	ITS [MPa]	Ø ITS [MPa]	směrodatná odchylka ITS [MPa]	typ porušení	ITSR [%]
R,N	R	0 %	2R	24,41	2,86	2,37	2,24	0,14	c	63,8
			3R	23,83	2,54	2,27			c	
			4R	22,02	2,33	2,09			c	
	N mokrá		N1	15,33	2,03	1,49	1,43	0,16	c	
			N2	16,16	2,35	1,56			c	
			RN	13,62	2,31	1,25			c	
V	V suché	0,2 %	V3	25,34	2,34	2,47	2,34	0,12	c	56,2
			V5	23,05	2,26	2,23			c	
			V6	23,97	2,46	2,32			c	
	V mokrá		V1	13,43	2,82	1,31	1,31	0,06	c	
			V2	12,89	2,03	1,25			c	
			V4	14,16	2,39	1,38			c	
U	U suchá	0,3 %	U1	22,71	2,47	2,21	2,20	0,02	c	62,5
			U3	22,61	2,48	2,18			c	
			U5	23,05	2,90	2,21			c	
	U mokrá		U2	13,28	2,62	1,27	1,37	0,11	c	
			U4	14,01	2,64	1,37			c	
			U6	15,33	2,39	1,49			c	
W	W suchá	0,5 %	W1	25,63	2,35	2,65	2,61	0,06	c	68,7
			W2	26,27	3,18	2,63			c	
			W3	26,17	2,42	2,54			c	
	W mokrá		W4	17,38	2,24	1,75	1,79	0,05	c	
			W5	17,68	2,47	1,78			c	
			W6	18,36	3,31	1,84			c	
X	X suchá	1,0 %	X1	21,14	2,58	1,98	1,99	0,09	c	49,7
			X2	22,61	2,53	2,08			c	
			X3	20,36	2,69	1,89			c	
	X mokrá		X4	12,01	2,94	1,13	0,99	0,13	c	
			X5	10,21	2,41	0,95			c	
			X6	9,47	2,58	0,88			c	



Graf 7: Pevnost v příčném tahu – ITS



Graf 8: Poměr pevnosti v příčném tahu ITSR

Na základě získaných dat ze zkoušky stanovení odolnosti asfaltové směsi vůči vodě (ITSR), bylo stanoveno optimální množství skelných vláken pro další zkoušky (tuhost, odolnost vůči únavě, odolnost vůči trvalým deformacím), a to na 0,5 %. Směs s tímto dávkováním dosahovala nejvyšších pevností v příčném tahu ITS a nejvyššího poměru pevnosti v příčném tahu ITSR. Toto dávkování se poté použilo pro výrobu laboratorních desek o hmotnosti 9,8 kg viz tabulka 16. Z těchto desek byla v rámci zkoušek stanovení tuhosti a odolnosti vůči únavě připravena zkušební tělesa.

Tabulka 16: Směsi použité při výrobě zkušebních desek

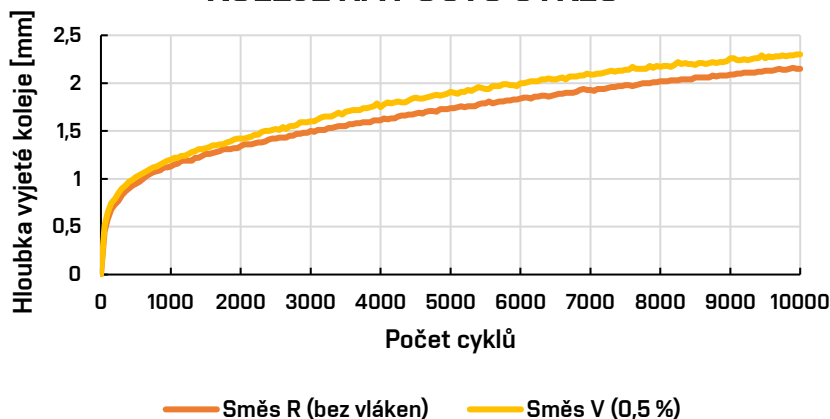
Tabulka zhotovených směsí		
směs	obsah vláken	hmotnost vláken připadající na 9,8 kg as. směsi
R	0,00 %	0,00 kg
V	0,50 %	0,05 kg

6.3.2 Odolnost proti trvalým deformacím (pojízdní kolem)

Tabulka 17: Výsledky zkoušky pojízdní kolem

směs	hloubka vyjeté koleje po 10000 cyklech Y_s [mm]	WTS_{AIR} [mm/1000 cyklů]	PRD_{AIR} [%]
R	2,15	0,082	4,3
V	2,30	0,078	4,6

GRAF ZÁVISLOSTI HLOUBKY VYJETÉ KOLEJE NA POČTU CYKLŮ



Graf 9: Závislost hloubky vyjetých kolejí na počtu cyklů

Jak je patrné z tabulky 17 a grafu 9 aplikace skelných vláken v množství 0,5 % hmotnostního podílu směsi neměla významných vliv na odolnost proti tvorbě trvalých deformací, a to jak negativní, tak pozitivní. Pro každou směs byla vyrobena a odzkoušena jedna zkušební deska. Tato zkouška probíhala při zkušební teplotě $60\text{ °C} \pm 1\text{ °C}$. Norma *ČSN EN 12697-22+A1* vyžaduje testování při teplotě $50\text{ °C} \pm 1\text{ °C}$. Tato teplota byla navýšena o 10 °C za účelem simulace horších podmínek a dosažení větší trvalé deformace obou vzorků, tak aby rozdíly měřených veličin na deskách byly výraznější.

Základním parametrem při této zkoušce je hloubka vyjeté koleje po 10 000 cyklech. V tab. 17 lze vidět, že rozdíl mezi oběma vzorky je 0,15 mm což lze považovat za zanedbatelné. Další zjišťované parametry při této zkoušce jsou přírůstek hloubky vyjeté koleje WTS_{AIR} a poměrná hloubka vyjeté koleje PRD_{AIR} . Nicméně ani tyto dva parametry neukázaly zásadní odlišnost testovaných desek. Maximální požadované hodnoty těchto parametrů pro ACO 11+ jsou uvedeny v normě *ČSN 73 6121 Stavba vozovek – Hutněné asfaltové vrstvy – Provádění a kontrola shody*. Přestože testování probíhalo při vyšší teplotě, než stanovuje norma obě směsi vyhověly na parametr PRD_{AIR} (max. hodnota dle této normy je 6,0 % po 5 000 cyklech). Hodnotu WTS_{AIR} (max hodnota dle normy je 0,08 mm/1000 cyklů) se podařilo dodržet jen pro směs V. Směs R těsně nevyhovuje. Přesto je rozdíl WTS_{AIR} obou směsí nevýznamný, a to jen 0,004 mm/1000 cyklů, viz tab. 17.

6.3.3 Stanovení modulů tuhosti

Zkušební tělesa tvaru trapezoidů byla nařezána ze zkušebních desek. Základní charakteristiky použitých desek jsou uvedeny v následující tabulce číslo 18.

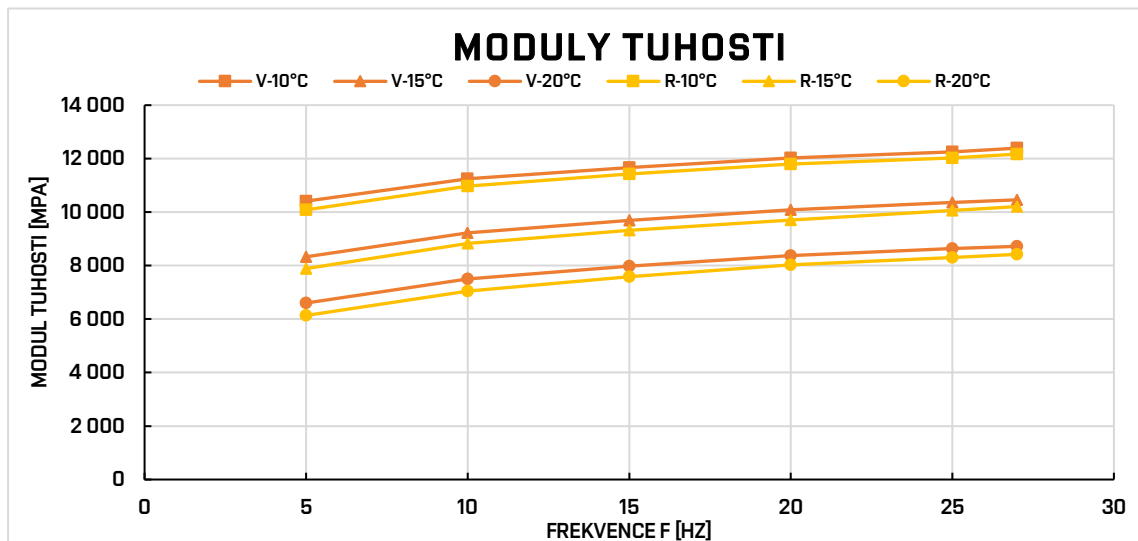
Tabulka 18: Základní charakteristiky zkušebních desek

desky	obsah vláken	ρ_{bessd} [kg/m ³]	ρ_{md} [kg/m ³]	V_m [%]	Mz^* [%]
R1	0,0 %	2356	2422	2,7	100,0
R2	0,0 %	2362		2,5	100,3
R4	0,0 %	2357		2,7	100,0
V1	0,5 %	2349		3,0	99,7
V2	0,5 %	2338		3,5	99,2
V4	0,5 %	2346		3,2	99,6

poznámka: *Míra zhutnění

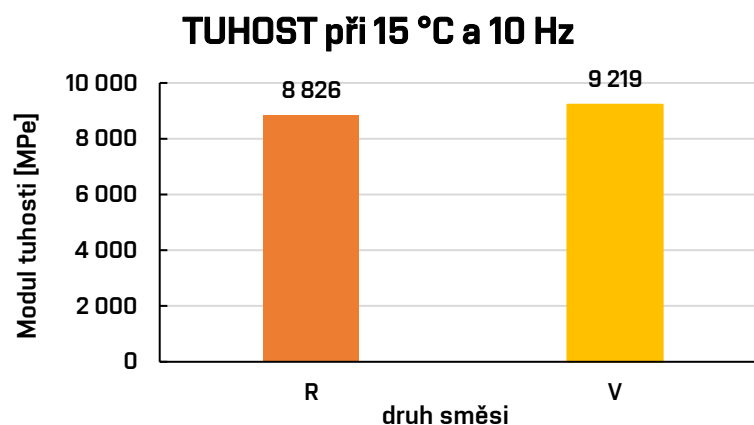
Měření modulů tuhosti a únavy bylo provedeno pro dva druhy asfaltových směsí: referenční směs R (bez skelných vláken) a směs V (s obsahem 0,50 % vláken). Jak již bylo dříve zmíněno měření tuhosti při teplotách 10, 15, 20 °C a frekvencích zatěžování 5 Hz, 10 Hz, 15 Hz, 20 Hz 25 Hz, 27 Hz. Výsledky zkoušky jsou uvedeny v následujícím grafu 10. Podrobně jsou výsledky tuhosti jednotlivých zkušebních těles uvedeny v příloze 9. Vyšší průměrné tuhosti při všech teplotách dosahovaly vzorky V, obsahující vlákna. Rozdíl mezi vzorky R a V dosahoval průměrně

300 MPa. Z naměřených dat vyplývá, že skelná vlákna měla nepatrný vliv na zvýšení tuhosti testované směsi, a to i navzdory vyšší mezerovitosti této směsi, jak lze vidět v tab. 18.



Graf 10: Moduly tuhosti při teplotách 10, 15, 20 °C

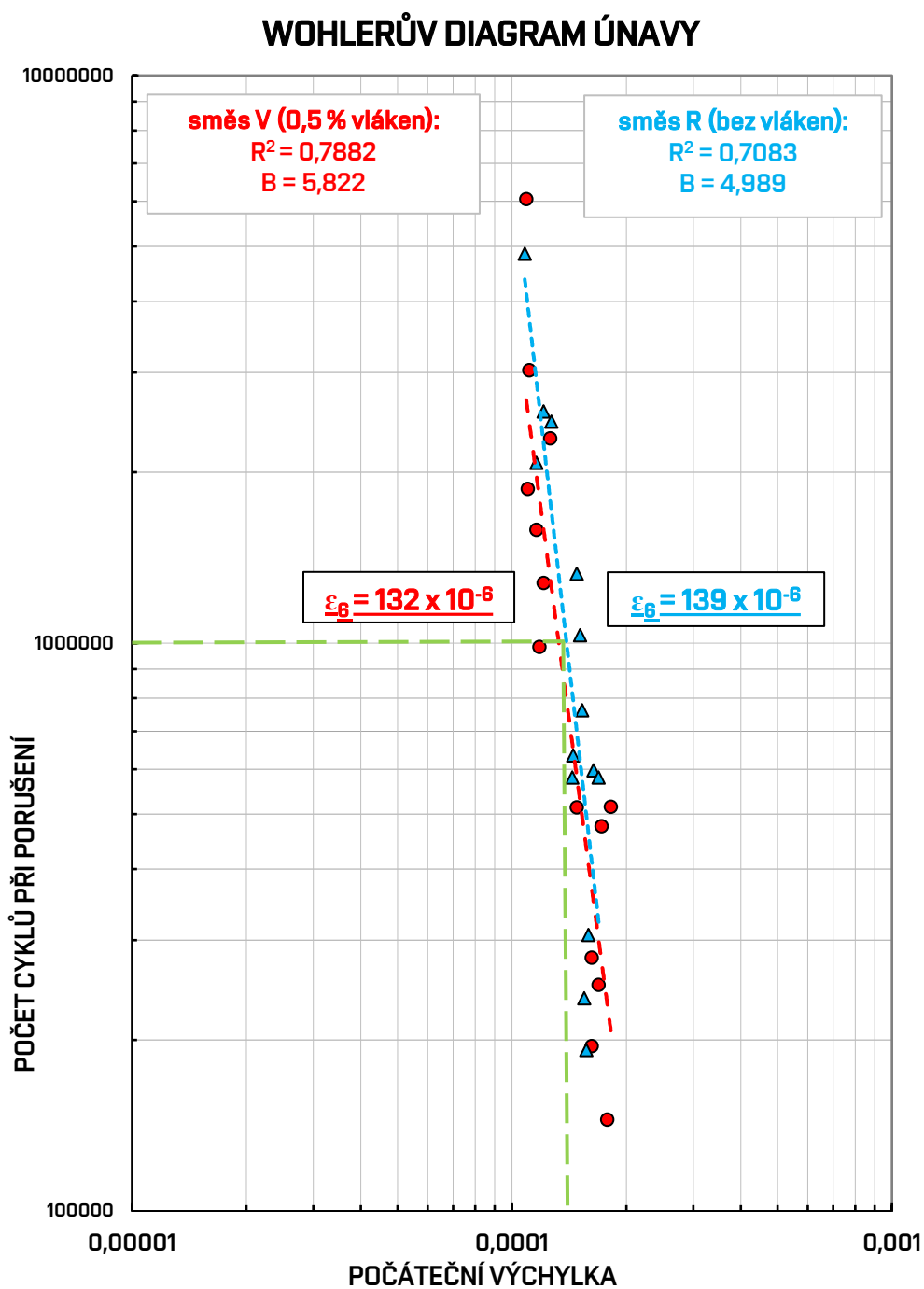
V následujícím grafu 11 jsou uvedeny moduly tuhosti při frekvenci 10 Hz a teplotě 15 °C. Z grafu je patrné, že směs vyztužená skelnými vlákny dosáhla vyšší tuhosti o cca 400 MPa, což je zvýšení o asi 4,5 %. Tyto hodnoty tuhosti jsou rozhodující pro návrhovou metodu při návrhu asfaltových směsí do konstrukcí pozemních komunikací.



Graf 11: Tuhost při 15 °C a 10 Hz

6.3.4 Odolnost vůči únavě

Vyhodnocení odolnosti asfaltové směsi proti únavě je provedeno za pomoci Wöhlerova diagramu graf 12. Výsledek únavy je poměrné přetvoření ε_6 odpovídající milionu zatěžovacích cyklů. Norma ČSN EN 12697-24 požaduje stanovení odolnosti vůči únavě na 18 zkušebních tělesech pro každou testovanou směs. V diplomové práci byla z časových důvodů zkouška provedena zjednodušeně, kdy bylo testováno 14 těles pro každou asfaltovou směs.



Graf 12: Wöhlerův diagram odolnosti vůči únavě

Ačkoliv se jedná o asfaltové směsi pro obrusné vrstvy vozovek, u kterých se odolnost vůči únavě běžně nestanovuje, tato zkouška byla zvolena s cílem zjistit, jak se přidání rozptýlených vláken projeví na odolnosti směsi vůči únavě. Z grafu 12 je patrné, že jak směs s vlákny (V), tak směs referenční (R) dosáhly téměř podobné odolnosti vůči únavě. Směs s vlákny V dosáhla parametru $\varepsilon_6 = 132 \times 10^{-6}$ a směs bez vláken R $\varepsilon_6 = 139 \times 10^{-6}$, což je rozdíl 5,0 % a to lze považovat za zanedbatelné. Z grafu 12 je také patrné, že výsledky obou směsí mají relativně vysoký korelační koeficient, a to více než 0,7. U směsi V je sklon křivky B větší než u směsi R, přesněji o 0,833.

7 SHRNUÍ A ZÁVĚR

Dopravní stavitelství, stejně jako další stavební obory se začíná potýkat s čím dál větším nedostatkem kvalitního materiálu. Na druhou stranu stále roste poptávka po nové a kvalitnější dopravní infrastruktuře, nehledě na potřebu neustále opravovat a udržovat stávající komunikace. V této situaci je takřka nezbytné poohlížet se po nových konstrukčních možnostech, která by napomohly snížit spotřebu klasických stavebních hmot.

Hlavním cílem mé diplomové práce bylo ověření chování asfaltových směsí, které obsahovaly rozptýlená skelná vlákna. Jedná se o problematiku, která není v současné době dostatečně prozkoumána a jen velmi omezená skupina vědců se tímto tématem zabývala. Navíc vliv používání výztužných vláken na asfaltové směsi je poměrně nejasný a v odborné veřejnosti vzbuzuje rozpory. Všechny tyto aspekty a mnohé další byly hlavním důvodem volby tohoto tématu, jako mé závěrečné práce.

Na základě teoretické části jsem dospěl k následujícím poznatkům. Funkčnost skelných vláken velice závisí na jejich správné aplikaci. Ve světě se jsou ročně vyrobeny miliony tun různých druhů vláken, ale ne všechny se dají do asfaltových směsí vhodně využít. Aby bylo možné docílit výztužného efektu vláken v asfaltové směsi, bude velice záležet na parametrech, jako: délka vláken, chemické složení, průměr vláken, dávkování vláken ve směsi, druh a kvalita použitého vlákna.

V praktické části práce bylo vyrobeno celkem pět zkušebních sad z asfaltové směsi ACO 11+ s rozdílným podílem skelných vláken, a to: 0 %, 0,2 %, 0,3 %, 0,5 %, 1,0 %, viz. tab. 19. Přičemž žádné z uvedeného dávkování skelných vláken nemělo negativní vliv na zpracovatelnost asfaltových směsí.

Tabulka 19: Tabulka zhotovených směsí

Tabulka zhotovených směsí		
Sada	obsah vláken	hmotnost připadající na 1165 g as. směsi
R,N	0,00 %	0,0 g
V	0,20 %	2,3 g
U	0,30 %	3,5 g
W	0,50 %	5,8 g
X	1,00 %	11,7 g

Vliv skelných vláken na zkoušku odolnost vůči vodě ITSR byl zkoumán pro všech pět sad asfaltových směsí. Bylo zjištěno, že při nízkém množství vláken (0,2 – 0,3 % hmotnostního podílu) nedocházelo prakticky k ovlivnění výsledků zkoušky. Směsi V a U se chovaly stejně jako směs bez vláken R,N. Mírná odlišnost nastala při vyšším dávkování. Směs W (0,5 % hmotnostního podílu vláken ve směsí) se vyznačovala mírným nárůstem pevnosti v příčném tahu ITS. Tento nárůst byl zaznamenán jak u suchých, tak i u mokrých těles. Následný poměr ITSR vyšel také nejlépe. Směs W měla hodnotu ITSR o 5 % vyšší než směs bez vláken R,N. Naproti tomu směs X s obsahem vláken 1,0 % dosahovala prokazatelně nejhorších výsledků odolnosti vůči vodě ze všech. Hodnota ITSR byla dokonce o 14 % nižší, než u směsi R,N. Příčinou takto nízkých výsledků byl zřejmě vliv vyššího podílu vláken ve zhotovené směsi. Vlákná nejspíše absorbovala značné množství asfaltového pojiva, což mělo za následek porušení soudržnosti mezi kamenivem a pojivem. Na základě výsledků zkoušky ITSR se domnívám, že optimální dávkování vláken se pohybuje okolo 0,4 % - 0,6 % hmotnostního podílu asfaltové směsi.

Další laboratorní zkoušky probíhaly už jen na pro dvě sady asfaltových směsí, a to směs bez vláken R a směs V s 0,5 % přidaných skelných vláken, viz. tabulka 20, str. 76.

Zkouška pojíždění kolem (odolnost proti trvalým deformacím), neprokázala žádný vliv skelných vláken na použitou směs. Výsledky této zkoušky byly srovnatelné jak pro směs R, tak pro směs V. Použití skelných vláken do obrusné vrstvy, pro niž se zkouška pojíždění kolem provádí, by navíc bylo velice sporné. Při provozu dochází k ohlazování obrusné vrstvy, díky kterému by mohlo docházet k vylučování skelných vláken z vozovky.

Co se týče zkoušky stanovení tuhosti, směs s vlákny V vykazovala nárůst modulů tuhosti oproti směsi R, tento nárůst byl zaznamenán při všech zkušebních teplotách a na většině zkoušených těles. Při teplotě 15 °C a frekvenci zatěžování 10 Hz byla tuhost vyšší o necelých 400 MPa. Jelikož byla mezerovitost směsi V přibližně o 0,5 % vyšší než u směsi R, dá se usuzovat, že vlákna mohla mít vliv na nárůst tuhosti. S nárůstem mezerovitosti totiž obecně předpokládáme tuhost menší. Nelze však zcela vyloučit, že tuhost ovlivnily i jiné faktory.

Odolnost proti únavě vycházela obdobně pro obě směsi (R i V). Přidání vláken do směsi ACO 11+ se na této výsledcích této zkoušky téměř neprojevilo, parametr poměrného přetvoření ε_6 je téměř totožný pro obě směsi. Nutno konstatovat, že ačkoliv odolnost vůči únavě není pro směs asfaltového betonu českými předpisy požadována, obě směsi dosáhly relativně vysoké hodnoty poměrného přetvoření ε_6 .

V této práci se nepodařily jednoznačně prokázat účinky skelných vláken na asfaltové směsi. Velký podíl na tomto výsledku přisuzuji zejména použitým vláknům. Použitá směs vláken byla nehomogenní obsahovala jak vlákna, tak i skelné shluky. Shluky dle mého názoru neměly žádný výztužný potenciál a působily spíše negativně. Také délka použitých vláken (do 0,5 cm) se ukázala jako krátká, dle provedené rešerše usuzuji, že ideální délka vláken se pohybuje přibližně od 1,5 cm do 2,0 cm. Dalším faktorem může být i použité pojivo. V diplomové práci byl použit standardní silniční asfalt 50/70. Použitím různých modifikovaných asfaltů by mohlo být docíleno lepší interakce mezi směsí a vlákny a mohly by se tak aktivovat výztužné schopnosti vláken. Vliv by mohlo mít zejména použití polymery (např. polypropylen) modifikovaného asfaltu, nebo využití polypropylenových vláken. Závěrem lze konstatovat, že skelná vlákna mají schopnost vyztužit asfaltové směsi, nicméně musí být proveden hlubší a podrobnější výzkum této problematiky.

Zajímavou myšlenkou pro další výzkum by mohlo být použití skelných vláken do stmelovaných podkladních vrstev.

Označení směsi	R	V
Množství vláken [%]	0	0,5
Množství vláken připadající na 9,8 kg směsi (zkušební desku) [kg]	0	0,05
ITSR [%]	63,8	68,7
Modul tuhosti, při 15 °C a 10 Hz [MPa]	8826	9219
Odolnost vůči únavě – ε_6 [-]	139×10^{-6}	132×10^{-6}
Odolnost vůči trvalým deformacím PRD _{AIR} [%]	4,3	4,6

Tabulka 20: Výsledky zkoušek na asfaltových směsích R a V

8 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] Silniční vlákna S-CEL 7G®. *Www.ciur.cz* [online]. Brandýs nad Labem: CIUR, 1998 [cit. 2022-12-21]. Dostupné z: [https://www.silnicniprisady.cz/silnicni-
psisady/silnicni-vlakna-s-cel-7g/](https://www.silnicniprisady.cz/silnicni-
psisady/silnicni-vlakna-s-cel-7g/)
- [2] MCDANIEL, Rebecca S. Fiber additives in asphalt mixtures. Washington, DC: Transportation Research Board of the National Academies, 2015, 68 ISBN 978-0-309-27177-6.
- [3] MONDSCHNEIN, Petr a Jiří ZEDNÍČEK. Aramidová vlákna – moderní způsob vyztužení asfaltových směsí. Časopis SILNICE ŽELEZNICE [online]. 2014, 17.6.2014, 2014 [cit. 2022-12-21]. Dostupné z: [http://old.silnice-zeleznice.cz/clanek/aramidova-
vlakna-moderni-zpusob-vyztuzeni-asfaltovych-smesi/](http://old.silnice-zeleznice.cz/clanek/aramidova-
vlakna-moderni-zpusob-vyztuzeni-asfaltovych-smesi/)
- [4] Vláknořový beton. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, [cca 2021] [cit. 2022-12-21]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Vl%C3%A1knořov%C3%BD_beton
- [5] Historie silnic. ASFALT OK GROUP [online]. České Budějovice, 2021, 20.10.2021 [cit. 2022-12-21]. Dostupné z: <https://asfaltokgroup.cz/historie-silnic/>
- [6] URBÁNKOVÁ, Tereza. Využití vláken v asfaltových směsích a konstrukčních vrstvách vozovek. Liberec, 2017. Bakalářská práce. Technická univerzita v Liberci, Fakulta textilní. Vedoucí práce Ing. Jiří Chaloupek, Ph.D.
- [7] PROVAZNÍK, Petr. Ověření možnosti recyklace geosyntetických vyztuřných mříží v asfaltových směsích. Brno, 2021. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Ing. Pavel Šperka.
- [8] FORTA-FI™. Forta Asfaltová vlákna [online]. Praha, 2018 [cit. 2022-12-21]. Dostupné z: <https://www.emzet.cz/forta-fi>
- [9] GRÉGR, Jan. Skleněná vlákna – historie a současnost. CZECHDESIGN [online]. Praha, 2003 [cit. 2022-12-21]. Dostupné z: [https://www.czechdesign.cz/temata-a-
rubriky/sklenena-vlakna-historie-a-soucasnost](https://www.czechdesign.cz/temata-a-
rubriky/sklenena-vlakna-historie-a-soucasnost)
- [10] SKLENĚNÉ PŘÍZE. BTTO [online]. Litomyšl: BTTO, [cca 2008] [cit. 2022-12-21]. Dostupné z: <https://www.btto.cz/cs/sklenena-prize>
- [11] Skleněná textilní vlákna. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, [cca 2018] [cit. 2022-12-21]. Dostupné z:

https://cs.wikipedia.org/wiki/Sklen%C4%9Bn%C3%A1_textiln%C3%AD_vl%C3%A1kna

[12] Složení a vlastnosti skleněných vláken. Shengshi Xinguang [online]. China, 2021 [cit. 2022-12-21]. Dostupné z: <https://cz.ssxg fiberglass.com/info/composition-and-performance-of-glass-fiber-60507727.html>

[13] Fiberglass. How Products Are Made [online]. [cca 2000] [cit. 2022-12-21]. Dostupné z: <http://www.madehow.com/Volume-2/Fiberglass.html>

[14] Minerální vata a izolace z vláknitých materiálů. In: *Bydlení pro každého.cz* [online]. 2012 [cit. 2022-12-21]. Dostupné z: <https://stavba-a-rekonstrukce.bydleniprokazdeho.cz/stavebni-material/mineralni-vata-a-dalsi-izolace-vlaknitych-materialu.php>

[15] Bez desek plošných spojů by se elektronika neobešla. PRŮMYSL Magazín o průmyslu [online]. Brno, b.r. [cit. 2022-12-21]. Dostupné z: <https://prumysl.inform.cz/vyroba/bez-desek-plosnych-spoju-by-se-elektronika-neobesla/>

[16] PRO METAL 125 x 1 mm – řezný kotouč. In: KRALDILNY [online]. Hradec Králové, [cca 2022] [cit. 2022-12-21]. Dostupné z: <https://www.kraldilny.cz/rpm-pro-metal-125-x-1-mm-rezny-kotouc/>

[17] Vláknobeton. *EBeton* [online]. Praha [cit. 2022-12-21]. Dostupné z: <https://www.ebeton.cz/pojmy/vlaknobeton/>

[18] Beton s rozptýlenou výztuží. *ASB CZ* [online]. Praha, 2010 [cit. 2022-12-21]. Dostupné z: <https://www.asb-portal.cz/stavebnictvi/zaklady-a-hruba-stavba/beton-s-rozptylenou-vyztuzi>

[19] Anti-Crak® HD. SKLOCEMENT Beneš [online]. Ostrava, [cca 2021] [cit. 2022-12-21]. Dostupné z: <https://www.sklocement.cz/sklenena-vlakna-cem-fil/anti-crak-hd/>

[20] SikaFiber® PPM-12. SikaCZ [online]. Brno [cit. 2022-12-21]. Dostupné z: <https://cze.sika.com/cs/produkty-pro-stavebnictvi/prisady-do-betonu/polymerni-vyztuzna-vlakna/sikafiber-ppm-12.html>

[21] Vlákna do betonu SikaFiber PPM-12 – 0,6 kg. *PRO-DOMA* [online]. Mukařov [cit. 2022-12-21]. Dostupné z: <https://www.pro-doma.cz/eshop-vlakna-do-betonu-sikafiber-ppm-12-0-6-kg-detail-21850>

- [22] Fiber blend called Forta FI. HAPI, Hawaii Asphalt Paving Industry [online]. Honolulu [cit. 2022-12-21]. Dostupné z: <http://hawaiiasphalt.org/news-events/hapi-newsletters/fiber-blend-called-forta-fi/>
- [23] ABTAHI, Sayyed Mahdi, Saman ESFANDIARPOUR, Mehmet KUNT, Sayyed Mahdi HEJAZI a Milad Ghorban EBRAHIMI. Hybrid Reinforcement of Asphalt-Concrete Mixtures Using Glass and Polypropylene Fibers. *Journal of Engineered Fibers and Fabrics*. 2013, 8(2), 11.
- [24] Polypropylenová vlákna do betonu 19 mm výztuž 900 g FIBRIBET. In: *Nonstopstavebniny* [online]. České Budějovice [cit. 2022-12-21]. Dostupné z: <https://www.nonstopstavebniny.cz/polypropylenova-vlakna-do-betonu-19-mm-vyztuz-900-g-fibrivet/>
- [25] BĚHÁLEK, Luboš. Tepelné vlastnosti polymerů. *Polymer* [online]. Liberec, 2014 [cit. 2022-12-21]. Dostupné z: <https://publi.cz/books/180/13.html>
- [26] ENIEB, Mahmoud, Aboelkasim DIAB a Xu YANG. Short – and long-term properties of glass fiber reinforced asphalt mixtures. *International Journal of Pavement Engineering* [online]. 2021, 2021, 14 [cit. 2022-12-21]. Dostupné z: [doi:10.1080/10298436.2019.1577421](https://doi.org/10.1080/10298436.2019.1577421)
- [27] ČSN EN 932-1. Zkoušení všeobecných vlastností kameniva Část 1: Metody odběru vzorků. 721185. Praha: Český normalizační institut, 1997.
- [28] ČSN EN 933-1 Název: Zkoušení geometrických vlastností kameniva – Část 1: Stanovení zrnitosti – Síťový rozbor. 721193. Praha: Český normalizační institut, 2012.
- [29] ČSN EN 1426 Asfalty a asfaltová pojiva – Stanovení penetrace jehlou. 657062. Praha: Český normalizační institut, 2015.
- [30] ČSN EN 1427 Asfalty a asfaltová pojiva – Stanovení bodu měknutí – Metoda kroužek a kulička. 657060. Praha: Český normalizační institut, 2015.
- [31] ČSN EN 12697-35 Asfaltové směsi – Zkušební metody – Část 35: Laboratorní výroba směsi. 736160. Praha: Český normalizační institut, 2018.
- [32] ČSN EN 12697-30 Asfaltové směsi – Zkušební metody – Část 30: Příprava zkušebních těles rázovým zhutňovačem. 736160. Praha: Český normalizační institut, 2020.

- [33] ČSN EN 12697-33 Asfaltové směsi – Zkušební metody – Část 33: Příprava zkušebních těles zhutňovačem desek. 736160. Praha: Český normalizační institut, 2020.
- [34] ČSN EN 12697-6 Asfaltové směsi – Zkušební metody – Část 6: Stanovení objemové hmotnosti asfaltového zkušební tělesa. 736160. Praha: Český normalizační institut, 2021.
- [35] ČSN EN 12697-5 Asfaltové směsi – Zkušební metody – Část 5: Stanovení maximální objemové hmotnosti. 736160. Praha: Český normalizační institut, 2020.
- [36] ČSN EN 12697-8 Asfaltové směsi – Zkušební metody – Část 8: Stanovení mezerovitosti asfaltových směsí. 736160. Praha: Český normalizační institut, 2020.
- [37] ČSN EN 12697-12 Asfaltové směsi – Zkušební metody – Část 12: Stanovení odolnosti zkušební tělesa vůči vodě. 736160. Praha: Český normalizační institut, 2020.
- [38] ČSN EN 12697-23 Asfaltové směsi – Zkušební metody – Část 23: Stanovení pevnosti v příčném tahu. 736160. Praha: Český normalizační institut, 2018.
- [39] ČSN EN 12697-22 Asfaltové směsi – Zkušební metody – Část 22: Zkouška pojíždění kolem. 736160. Praha: Český normalizační institut, 2021.
- [40] ČSN EN 12697-26 Asfaltové směsi – Zkušební metody – Část 26: Tuhost. 736160. Praha: Český normalizační institut, 2019.
- [41] ČSN EN 12697-24 Asfaltové směsi – Zkušební metody – Část 24: Odolnost vůči únavě. 736160. Praha: Český normalizační institut, 2019.
- [42] ČSN EN 13043 Kamenivo pro asfaltové směsi a povrchové vrstvy pozemních komunikací, letištních a jiných dopravních ploch. 721501. Praha: Český normalizační institut, 2004.
- [43] Perlinka. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, [cca 2000] [cit. 2022-12-21]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Perlinka>
- [44] R 131 A101, Glass Fibre Mesh Fabrics, Technical Data Sheet. SAINT-GOBAIN ADFORS CZ s.r.o. Litomyšl, 2012.
- [45] U H 50/1, Glass Veil, Technical Data Sheet. SAINT-GOBAIN ADFORS CZ s.r.o. Litomyšl, 2020.



[46] ČSN EN 13108-1 ED.2 Asfaltové směsi – Specifikace pro materiály – Část 1: Asfaltový beton. 736140. Praha: Český normalizační institut, 2017.

9 SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1: Volné vlákno S-CEL 7 [®] , CIUR a.s. [1].....	14
Obrázek 2: Granulát S-CEL 7G [®] , CIUR a.s. [1].....	14
Obrázek 3: Syntetická vlákna Forta-Fi [22].....	15
Obrázek 4: Testování vláken Forta-Fi [8]	16
Obrázek 5: Porovnání směsi s vlákny Forta-Fi a bez vláken – odolnost proti trvalým deformacím [3].....	17
Obrázek 6: Asfaltová směs s vlákny Forta-Fi [8].....	18
Obrázek 7: Proces míchání sklářského kmene [13]	21
Obrázek 8: Navinutá skelná vlákna [10].....	22
Obrázek 9: Schéma výroby skelných vláken [10].....	22
Obrázek 10: Schéma výroby střížových vláken [13].....	23
Obrázek 11: Minerální skelná vata [14].....	24
Obrázek 12: Deska plošných spojů (PCB) [15].....	25
Obrázek 13: Rozbrušovací kotouč [16].....	26
Obrázek 14: Beton s rozptýlenou výztuží [18].....	26
Obrázek 15: Beton s rozptýlenou ocelovou výztuží (drátkobeton) [17]	26
Obrázek 16: Skleněná vlákna do betonu Anti-Crack [®] HD [19].....	28
Obrázek 17: Vlákna do betonu SikaFiber PPM-12 [21]	29
Obrázek 18: Polypropylenové vlákno [24].....	30
Obrázek 19: Homogenizace kameniva.....	36
Obrázek 20: Oddělení jemnozrnných částic.....	37
Obrázek 21: Prosévací přístroj.....	38
Obrázek 22: Stanovení bodu měknutí asfaltu.....	39
Obrázek 23: Ruční příprava směsi	40
Obrázek 24: Namíchaná as. směs.....	40
Obrázek 25: Laboratorní míchačka Bitumix	41
Obrázek 26: Vyrobená Marshallova zkušební tělesa	42
Obrázek 27: Marshallův rázový zhutňovač.....	42
Obrázek 28: Zhotovené zkušební desky	42
Obrázek 29: Řezání zkušebních desek	43
Obrázek 30: Měření rozměrů trapezoidů.....	43

Obrázek 31: Pyknometry s asfaltovou směsí a destilovanou vodou.....	46
Obrázek 32: Marshallova zkušební tělesa v otevřené vakuové komoře.....	49
Obrázek 33: Průběh zkoušky ITS	50
Obrázek 34: Schéma zatěžovacího lisu.....	50
Obrázek 35: Zkušební desky osazené ve formách	51
Obrázek 36: Zkušební zařízení simulující poježdění kolem.....	52
Obrázek 37: Zkušební tělesa tvaru trapezoidů	53
Obrázek 38: Upnutá zkušební tělesa ve zkušební komoře.....	55
Obrázek 39: Kamenivo Luleč frakce 8/11.....	56
Obrázek 40: Kamenivo Luleč frakce 4/8	56
Obrázek 41: Kamenivo Luleč frakce 0/4	56
Obrázek 42: Stavební perlina převzato z [44].....	58
Obrázek 43: Použití stavební perlinky [44].....	59
Obrázek 44: Za mokra kladená skelná textilie [45].....	59
Obrázek 45: Použitá skelná vlákna.....	63
Obrázek 46: Míchání horkého kameniva a vláken při výrobě asfaltové směsi.....	64
Obrázek 47: Namíchaná asfaltová směs se skelnými vlákny.....	64
Obrázek 48: Detail zhutněné desky s vlákny.....	65

10 SEZNAM TABULEK

Tabulka 1: Technické parametry Anti-Crak® HD [19]	28
Tabulka 2: Tabulka pojiv [26]	31
Tabulka 3: Charakteristika použitých vláken [26]	31
Tabulka 4: Vyrobené asfaltové směsi [26]	32
Tabulka 5: Sítový rozbor frakcí kameniva	57
Tabulka 6: Penetrace pojiva 50/70, OMV	57
Tabulka 7: Bod měknutí pojiva 50/70, OMV	58
Tabulka 8: Technické parametry R 131 A101 [44]	59
Tabulka 9: Technické parametry U H 50 /1 [45]	60
Tabulka 10: Čára zrnitosti směsi ACO 11+	60
Tabulka 11: Skladba kameniva směsi ACO 11+	61
Tabulka 12: Dávkování skelných vláken	61
Tabulka 13: Základní charakteristiky vyrobené směsi ACO 11+	65
Tabulka 14: Dávkování skelných vláken do směsí pro Marshallova tělesa	66
Tabulka 15: Vyhodnocení zkoušky ITSR	67
Tabulka 16: Směsi použité při výrobě zkušebních desek	69
Tabulka 17: Výsledky zkoušky pojíždění kolem	69
Tabulka 18: Základní charakteristiky zkušebních desek	70
Tabulka 19: Tabulka zhotovených směsí	74
Tabulka 20: Výsledky zkoušek na asfaltových směsích R a V	76

11 SEZNAM GRAFŮ

Graf 1: Hodnoty ITS (suchá tělesa), převzato z [26].....	33
Graf 2: Hodnoty ITS (mokrý tělesa), převzato z [26].....	33
Graf 3: Hodnoty ITS _R , převzato z [26].....	33
Graf 4: Odolnost proti trvalým deformacím, převzato z [26]	34
Graf 5: Čáry zrnitosti frakcí kameniva Luleč a fileru	57
Graf 6: Navržená čára zrnitosti, ACO 11+	61
Graf 7: Pevnost v příčném tahu – ITS.....	68
Graf 8: Poměr pevnosti v příčném tahu ITS _R	68
Graf 9: Závislost hloubky vyjetých kolejí na počtu cyklů	69
Graf 10: Moduly tuhosti při teplotách 10, 15, 20 °C	71
Graf 11: Tuhost při 15 °C a 10 Hz.....	71
Graf 12: Wöhlerův diagram odolnosti vůči únavě.....	72

12 SEZNAM ROVNIC

Rovnice 1: Stanovení objemové hmotnosti SSD.....	45
Rovnice 2: Stanovení objemové hmotnosti z rozměrů.....	45
Rovnice 3: Stanovení maximální objemové hmotnosti.....	46
Rovnice 4: Stanovení mezerovitosti as. směsi.....	47
Rovnice 5: Mezerovitost směsi kameniva VMA.....	47
Rovnice 6: Stupeň vyplnění mezer pojivem VFB	47
Rovnice 7: Pevnost v příčném tahu ITS.....	50
Rovnice 8: Poměr pevnosti v příčném tahu ITSr	51
Rovnice 9: Přírůstek hloubky vyjeté koleje	52
Rovnice 10: Poměrná hloubka vyjeté koleje	53

13 SEZNAM PŘÍLOH

- Příloha č.1:** Maximální objemová hmotnost
- Příloha č.2:** Objemová hmotnost, mezerovitost asfaltové směsi, VMA, VFB
- Příloha č.3:** Sítový rozbor, křivka zrnitosti
- Příloha č.4:** Objemová hmotnost z rozměrů– tělesa ITS/ITSR
- Příloha č.5:** Pevnost v příčném tahu ITS a odolnost vůči vodě ITSR
- Příloha č.6:** Vlastnosti desek: objemová hmotnost, mezerovitost, míra zhutnění
- Příloha č.7:** Odolnost proti trvalým deformacím (Vyjíždění kolejí) – Záznam zkoušky
- Příloha č.8:** Rozměry zkušebních trapezoidů – (tuhost, odolnost vůči únavě)
- Příloha č.9:** Tuhost
- Příloha č.10:** Odolnost vůči únavě



PŘÍLOHA 1: Maximální objemová hmotnost

Asfaltová směs: ACO 11+

Množství pojiva: 5,7 %

Použité pojivo: 50/70

Výrobce: OMV

pyknometr V		
pyknometr	V	
rozpouštědlo	destilovaná voda	
m_1 (hmotnost prázdného pyknometru)	692,8	g
m_2 (hmotnost pyknometr + vzorek)	1567	g
m_3 (hmotnost pyknometr + vzorek + rozpouštědlo)	2527,1	g
ρ_t (hustota rozpouštědla)	0,997	Mg/m ³
V_p (objem pyknometru)	1323,4	cm ³
maximální objemová hmotnost		
ρ_{mv} maximální objemová hmotnost	2426	kg/m ³

pyknometr VI		
pyknometr	VI	
rozpouštědlo	destilovaná voda	
m_1 (hmotnost prázdného pyknometru)	687,7	g
m_2 (hmotnost pyknometr + vzorek)	1511	g
m_3 (hmotnost pyknometr + vzorek + rozpouštědlo)	2466,4	g
ρ_t (hustota rozpouštědla)	0,997	Mg/m ³
V_p (objem pyknometru)	1298,6	cm ³
maximální objemová hmotnost		
ρ_{mv} maximální objemová hmotnost	2419	kg/m ³

Průměrná objemová hmotnost ρ_{mv}	2422	kg/m ³
--	------	-------------------



PŘÍLOHA 2: Objemová hmotnost, mezerovitost asfaltové směsi, VMA, VFB

Asfaltová směs: ACO 11+

Množství pojiva: 5,7 %

Použité pojivo: 50/70

Výrobce: OMV

Objemová hmotnost a mezerovitost zkušebních těles

vzorek	1	2	3
h [mm]	65,0	65,1	64,2
d [mm]	11,8	11,8	11,8
m ₁ [g]	1213,8	1217,9	1200,6
m ₂ [g]	700,3	705,2	692,8
m ₃ [g]	1215,5	1219,7	1202,1
ρ_{bssd} [kg/m ³]	2352	2363	2353
t _w [°C]	19,6	19,6	19,6
ρ_w [kg/m ³]	998,27	998,27	998,27
ρ_{bssd} [kg/m ³]	2356		
V [%]	2,9	2,4	2,8
V _p [%]	2,7		
VMA [%]	16,2	15,8	16,1
VFB [%]	82,1	84,6	82,4

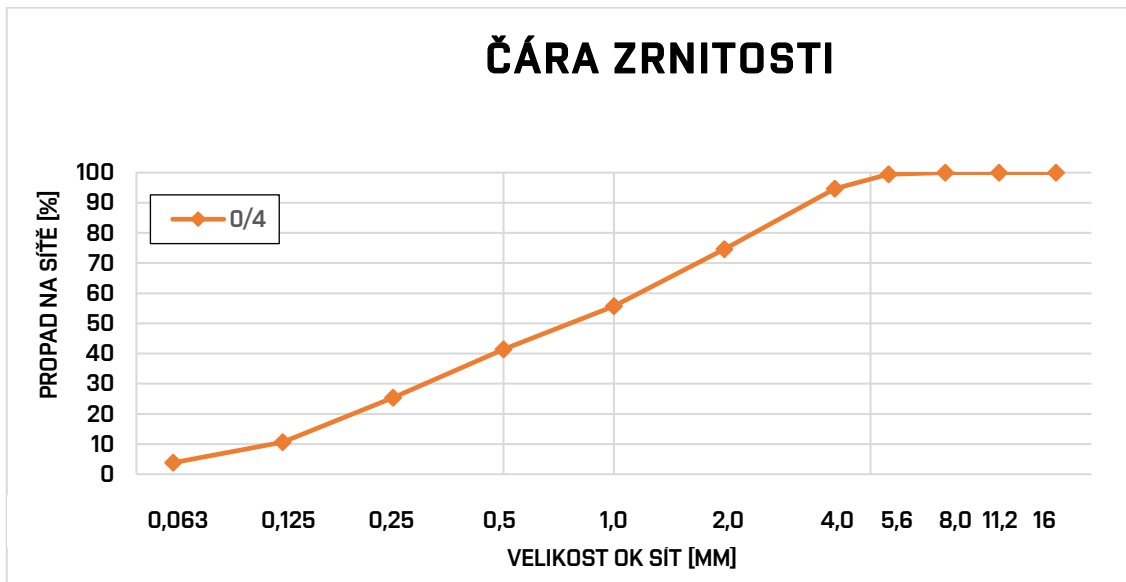


PŘÍLOHA 3: Sítový rozbor, křivka zrnitosti

Kamenivo: Luleč, Obalovna Rajhradice

Frakce: 0/4

0/4			
propad [%]	zůstatek na sítu [g]	zůstatek na sítu v [%]	propad [%]
16	0	0,00	100,00
11,2	0	0,00	100,00
8	0,0	0,00	100,00
5,6	4,6	0,51	99,49
4	43,0	4,78	94,71
2	181,1	20,12	74,59
1	169,6	18,84	55,75
0,5	128,9	14,32	41,43
0,25	144,4	16,04	25,39
0,125	133,4	14,82	10,57
0,063	60,7	6,74	3,82
<0,063	34,4	3,82	0,00
celkem	900,10	100,00	

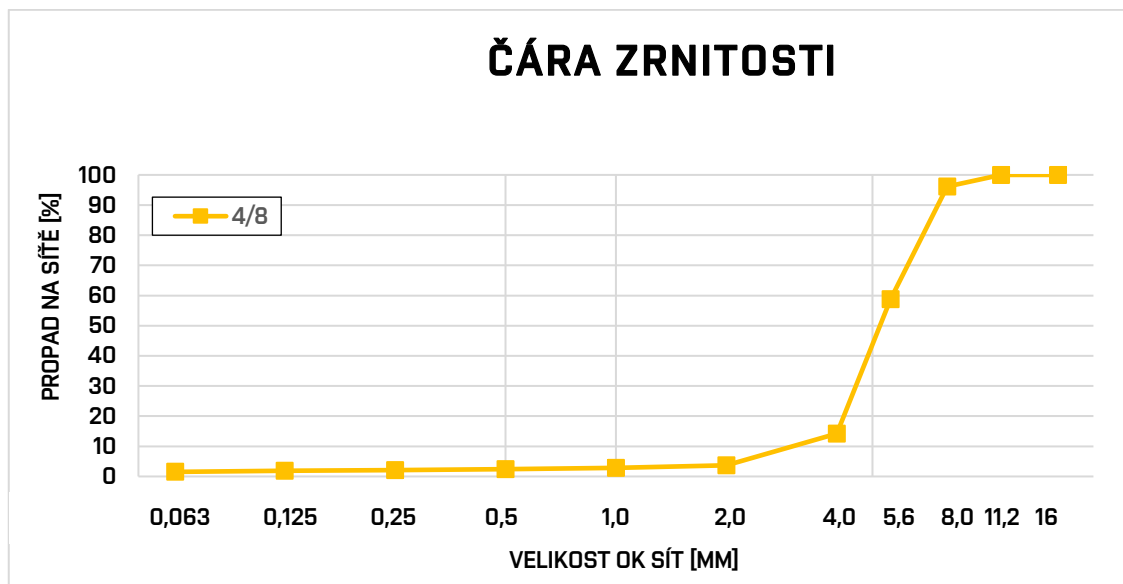




Kamenivo: Luleč, Obalovna Rajhradice

Frakce: 4/8

4/8			
velikost ok sít [mm]	zůstatek na sítu [g]	zůstatek na sítu v [%]	propad [%]
16	0	0,00	100,00
11,2	0	0,00	100,00
8	46,4	3,87	96,13
5,6	448,8	37,38	58,75
4	535,2	44,58	14,17
2	125,2	10,43	3,74
1	10,8	0,90	2,84
0,5	4,5	0,37	2,47
0,25	3,8	0,32	2,15
0,125	3,4	0,28	1,87
0,063	4,1	0,34	1,52
<0,063	18,3	1,52	0,00
celkem	1200,50	100,00	

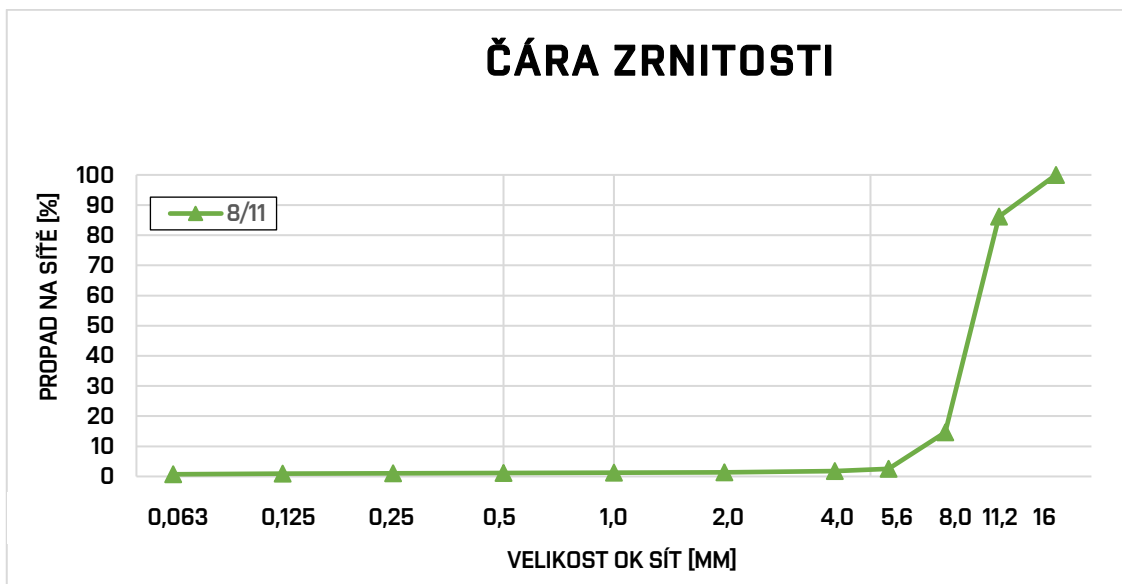




Kamenivo: Luleč, Obalovna Rajhradice

Frakce: 8/11

8/11			
velikost ok sít [mm]	zůstatek na sítu [g]	zůstatek na sítu v [%]	propad [%]
16	0	0,00	100,00
11,2	221,9	13,85	86,15
8	1145,6	71,53	14,62
5,6	194,0	12,11	2,50
4	11,4	0,71	1,79
2	6,4	0,40	1,39
1	2,9	0,18	1,21
0,5	1,6	0,10	1,11
0,25	1,4	0,09	1,02
0,125	1,9	0,12	0,91
0,063	2,9	0,18	0,72
<0,063	11,6	0,72	0,00
celkem	1601,60	100,00	





PŘÍLOHA 4: Objemová hmotnost z rozměrů– tělesa ITS/ITSR

Asfaltová směs: ACO 11+

Množství pojiva: 5,7 %

Použité pojivo: 50/70

Výrobce: OMV

SMĚS R,N												
množství vláken					0,0	%	0,0	g				
2 R					N 1							
m ₁	1161,2	g			m ₁	1162,2	g					
d ₁	102,26	mm	h ₁	64,10	mm	d ₁	101,80	mm	h ₁	64,40	mm	
d ₂	102,26	mm	h ₂	64,22	mm	d ₂	101,70	mm	h ₂	64,40	mm	
d	102,26	mm	h	64,16	mm	d	101,80	mm	h	64,40	mm	
V	526945	mm ³	=	0,00053	m ³	V	523654	mm ³	=	0,00052	mm ³	
objemová hmotnost			2204		kg/m ³	objemová hmotnost			2219			kg/m ³
3 R					N 2							
m ₁	1163,6	g			m ₁	1161,3	g					
d ₁	101,80	mm	h ₁	65,60	mm	d ₁	101,90	mm	h ₁	64,82	mm	
d ₂	101,68	mm	h ₂	65,52	mm	d ₂	101,82	mm	h ₂	64,72	mm	
d	101,74	mm	h	65,56	mm	d	101,90	mm	h	64,77	mm	
V	532981,69	mm ³	=	0,00053	m ³	V	527802	mm ³	=	0,00052	mm ³	
objemová hmotnost			2183		kg/m ³	objemová hmotnost			2200			kg/m ³
4 R					N 3							
m ₁	1163,6	g			m ₁	1152,4	g					
d ₁	101,82	mm	h ₁	65,70	mm	d ₁	101,70	mm	h ₁	64,22	mm	
d ₂	102,00	mm	h ₂	65,90	mm	d ₂	101,70	mm	h ₂	64,20	mm	
d	101,91	mm	h	65,8	mm	d	101,70	mm	h	64,21	mm	
V	536721	mm ³	=	0,00054	m ³	V	521596	mm ³	=	0,00052	mm ³	
objemová hmotnost			2168		kg/m ³	objemová hmotnost			2209			kg/m ³

sada	suchá	mokrá
těleso	2R	N1
	3R	N2
	4R	N3
obj. hm. [kg/m ³]	2185	2182

průměrná objemová hmotnost [kg/m ³]
2197



Asfaltová směs: ACO 11+

Množství pojiva: 5,7 %

Použité pojivo: 50/70

Výrobce: OMV

SMĚS V											
množství vláken						0,2	%	2,3	g		
1 V						4 V					
m ₁	1147,6	g				m ₁	1162,0	g			
d ₁	102,20	mm	h ₁	63,92	mm	d ₁	101,80	mm	h ₁	64,00	mm
d ₂	102,16	mm	h ₂	63,90	mm	d ₂	102,00	mm	h ₂	64,20	mm
d	102,18	mm	h	63,91	mm	d	101,90	mm	h	64,10	mm
V	524071	mm ³	=	0,00052	mm ³	V	522752,7	mm ³	=	0,00052	mm ³
objemová hmotnost			2190	kg/m ³	objemová hmotnost			2223	kg/m ³		
2 V						5 V					
m ₁	1148,7	g				m ₁	1148,3	g			
d ₁	101,78	mm	h ₁	64,40	mm	d ₁	101,80	mm	h ₁	64,70	mm
d ₂	101,68	mm	h ₂	64,22	mm	d ₂	101,80	mm	h ₂	64,70	mm
d	101,73	mm	h	64,31	mm	d	101,80	mm	h	64,70	mm
V	522717	mm ³	=	0,00052	mm ³	V	526611	mm ³	=	0,00052	mm ³
objemová hmotnost			2198	kg/m ³	objemová hmotnost			2181	kg/m ³		
3 V						6 V					
m ₁	1168,8	g				m ₁	1167,2	g			
d ₁	101,7	mm	h ₁	64,30	mm	d ₁	102,10	mm	h ₁	64,30	mm
d ₂	101,7	mm	h ₂	64,36	mm	d ₂	102,16	mm	h ₂	64,30	mm
d	101,7	mm	h	64,33	mm	d	102,13	mm	h	64,30	mm
V	52257,04	mm ³	=	0,00052	mm ³	V	526754	mm ³	=	0,00053	mm ³
objemová hmotnost			2237	kg/m ³	objemová hmotnost			2216	kg/m ³		

sada	suchá	mokrá
těleso	3	1
	5	2
	6	4
obj. hm. [kg/m ³]	2211	2203

průměrná objemová hmotnost [kg/m ³]
2207



Asfaltová směs: ACO 11+

Množství pojiva: 5,7 %

Použité pojivo: 50/70

Výrobce: OMV

SMĚS U											
množství vláken						0,3	%	3,5	g		
U 1						U 4					
m ₁	1163,9	g				m ₁	1158,4	g			
d ₁	102,18	mm	h ₁	64,12	mm	d ₁	102	mm	h ₁	64,1	mm
d ₂	102,18	mm	h ₂	64	mm	d ₂	101,9	mm	h ₂	64	mm
d	102,18	mm	h	64,06	mm	d	101,95	mm	h	64,05	mm
V	525301	mm ³	=	0,0005	mm ³	V	522857,7	mm ³	=	0,0005	mm ³
objemová hmotnost				2216	kg/m ³	objemová hmotnost				2216	kg/m ³
U 2						U 5					
m ₁	1164,1	g				m ₁	1161,1	g			
d ₁	101,72	mm	h ₁	65,6	mm	d ₁	101,78	mm	h ₁	65,5	mm
d ₂	101,5	mm	h ₂	65,6	mm	d ₂	101,48	mm	h ₂	65,3	mm
d	101,61	mm	h	65,6	mm	d	101,63	mm	h	65,4	mm
V	531945	mm ³	=	0,0005	mm ³	V	530531,9	mm ³	=	0,0005	mm ³
objemová hmotnost				2188	kg/m ³	objemová hmotnost				2189	kg/m ³
U 3						U 6					
m ₁	1166,4	g				m ₁	1156,4	g			
d ₁	101,68	mm	h ₁	64,9	mm	d ₁	102,1	mm	h ₁	64,32	mm
d ₂	101,84	mm	h ₂	65	mm	d ₂	102,04	mm	h ₂	64,12	mm
d	101,76	mm	h	64,95	mm	d	102,07	mm	h	64,22	mm
V	528230	mm ³	=	0,0005	mm ³	V	525480,3	mm ³	=	0,0005	mm ³
objemová hmotnost				2208	kg/m ³	objemová hmotnost				2201	kg/m ³

sada	suchá	mokrá
těleso	3	6
	5	2
	1	4
obj. hm. [kg/m ³]	2204	2202

průměrná objemová hmotnost [kg/m ³]
2203



Asfaltová směs: ACO 11+

Množství pojiva: 5,7 %

Použité pojivo: 50/70

Výrobce: OMV

SMĚS W												
množství vláken					0,5	%	5,8	g				
W 1					W 4							
m ₁	1139,4	g			m ₁	1141,6	g					
d ₁	101,50	mm	h ₁	62,10	mm	d ₁	101,60	mm	h ₁	62,20	mm	
d ₂	101,40	mm	h ₂	61,90	mm	d ₂	101,60	mm	h ₂	62,30	mm	
d	101,45	mm	h	62,00	mm	d	101,60	mm	h	62,25	mm	
V	501171	mm ³	=	0,00050	mm ³	V	504681	mm ³	=	0,00050	mm ³	
objemová hmotnost			2273	kg/m ³	objemová hmotnost			2262	kg/m ³			
W 2					W 5							
m ₁	1144,7	g			m ₁	1139,3	g					
d ₁	101,40	mm	h ₁	62,50	mm	d ₁	101,80	mm	h ₁	62,20	mm	
d ₂	101,70	mm	h ₂	62,60	mm	d ₂	101,70	mm	h ₂	61,90	mm	
d	101,55	mm	h	62,55	mm	d	101,75	mm	h	62,05	mm	
V	506614	mm ³	=	0,00050	mm ³	V	504546	mm ³	=	0,00050	mm ³	
objemová hmotnost			2260	kg/m ³	objemová hmotnost			2258	kg/m ³			
W 3					W 6							
m ₁	1142,1	g			m ₁	1140,7	g					
d ₁	101,50	mm	h ₁	63,00	mm	d ₁	101,80	mm	h ₁	62,30	mm	
d ₂	101,60	mm	h ₂	63,60	mm	d ₂	102,00	mm	h ₂	62,40	mm	
d	101,55	mm	h	63,30	mm	d	101,90	mm	h	62,35	mm	
V	512688	mm ³	=	0,00051	mm ³	V	508481	mm ³	=	0,00050	mm ³	
objemová hmotnost			2228	kg/m ³	objemová hmotnost			2243	kg/m ³			

sada	suchá	mokrá
těleso	1	4
	2	5
	3	6
obj. hm. [kg/m ³]	2254	2254

průměrná objemová hmotnost [kg/m ³]
2254



Asfaltová směs: ACO 11+

Množství pojiva: 5,7 %

Použité pojivo: 50/70

Výrobce: OMV

SMĚS X													
množství vláken						1,0	%	11,6	g				
X 1						X 4							
m ₁	1173,4	g				m ₁	1172,4	g					
d ₁	102,20	mm	h ₁	66,48	mm	d ₁	102,30	mm	h ₁	66,38	mm		
d ₂	102,00	mm	h ₂	66,40	mm	d ₂	102,20	mm	h ₂	66,20	mm		
d	102,10	mm	h	66,44	mm	d	102,25	mm	h	66,29	mm		
V	543965	mm ³	=	0,00054	mm ³	V	544333	mm ³	=	0,00054	mm ³		
objemová hmotnost			2157			kg/m ³	objemová hmotnost			2154			kg/m ³
X 2						X 5							
m ₁	1172,7	g				m ₁	1173,8	g					
d ₁	101,48	mm	h ₁	67,98	mm	d ₁	101,74	mm	h ₁	67,32	mm		
d ₂	101,78	mm	h ₂	67,98	mm	d ₂	101,64	mm	h ₂	67,20	mm		
d	101,63	mm	h	67,98	mm	d	101,69	mm	h	67,26	mm		
V	551461	mm ³	=	0,00055	mm ³	V	546265	mm ³	=	0,00055	mm ³		
objemová hmotnost			2127			kg/m ³	objemová hmotnost			2149			kg/m ³
X 3						X 6							
m ₁	1180,6	g				m ₁	1176,7	g					
d ₁	102,16	mm	h ₁	66,90	mm	d ₁	102,06	mm	h ₁	67,02	mm		
d ₂	102,20	mm	h ₂	67,00	mm	d ₂	102,02	mm	h ₂	66,82	mm		
d	102,18	mm	h	66,95	mm	d	102,04	mm	h	66,92	mm		
V	548999	mm ³	=	0,00055	mm ³	V	547251	mm ³	=	0,00055	mm ³		
objemová hmotnost			2150			kg/m ³	objemová hmotnost			2150			kg/m ³

sada	suchá	mokrá
těleso	1	4
	2	5
	3	6
obj. hm. [kg/m ³]	2145	2151

průměrná objemová hmotnost [kg/m ³]
2148



PŘÍLOHA 5: Pevnost v příčném tahu ITS a odolnost vůči vodě ITSR

Sada těles: R,N

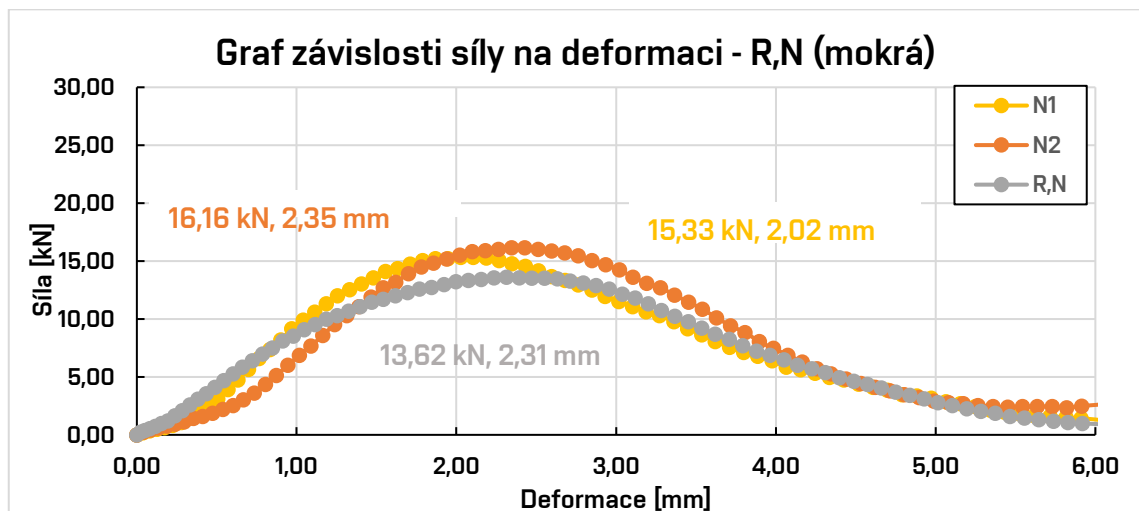
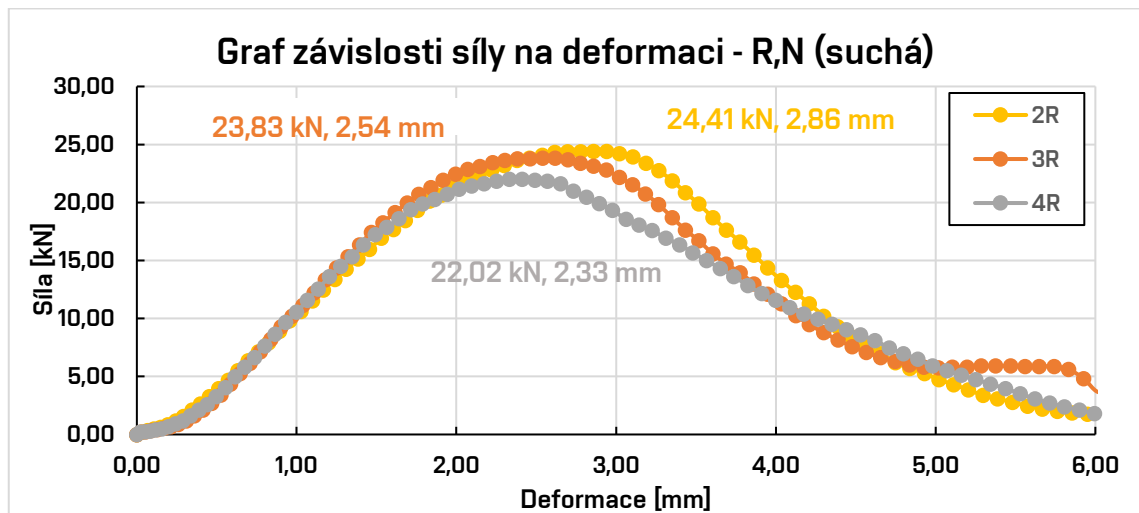
Asfaltová směs: ACO 11+

Množství pojiva: 5,7 %

Použité pojivo: 50/70

Výrobce: OMV

sada	vzorek	obsah vláken	číslo	maximální síla F_{max} [kN]	posun při F_{max} [mm]	ITS [MPa]	σ ITS [MPa]	typ porušení	ITSR [%]
R,N	R	0 %	2R	24,41	2,858	2,37	2,24	c	63,80
			3R	23,83	2,540	2,27			
			4R	22,02	2,332	2,09			
	N mokrý		N1	15,33	2,027	1,49	1,43	c	
			N2	16,16	2,345	1,56			
			RN	13,62	2,314	1,25			





Sada těles: V

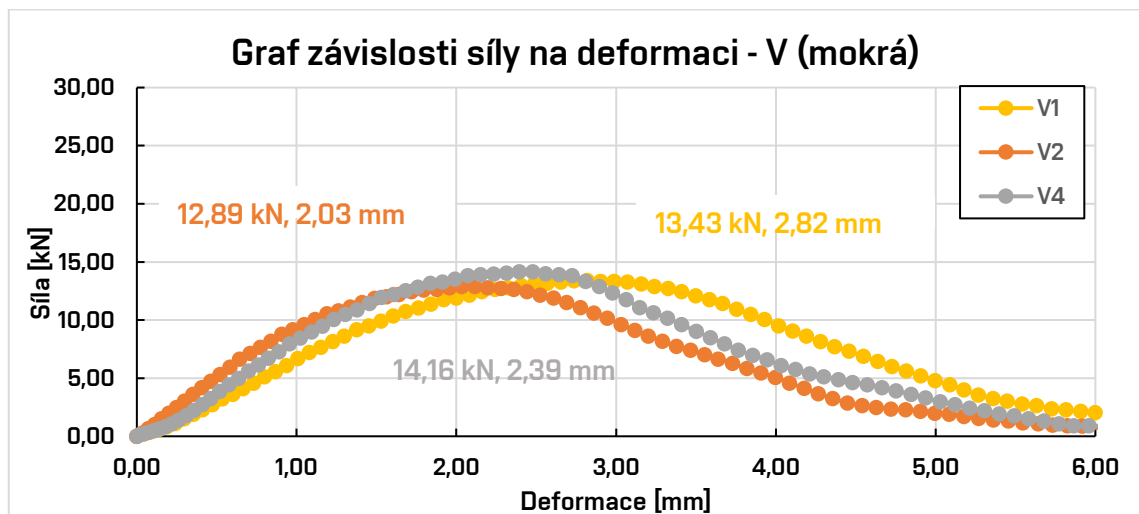
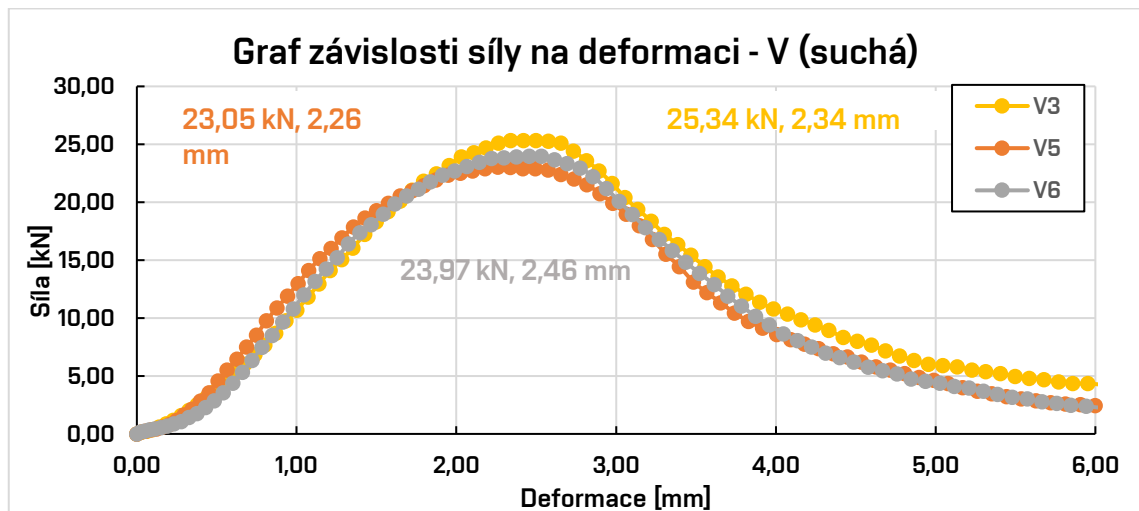
Asfaltová směs: ACO 11+

Množství pojiva: 5,7 %

Použité pojivo: 50/70

Výrobce: OMV

sada	vzorek	obsah vláken	číslo	maximální síla F_{max} [kN]	posun při F_{max} [mm]	ITS [MPa]	σ ITS [MPa]	typ porušení	ITSR [%]
V	V suchá	0,20 %	V3	25,34	2,34	2,47	2,34	c	56,20
			V5	23,05	2,26	2,23			
			V6	23,97	2,46	2,32			
	V mokrá		V1	13,43	2,82	1,31	1,31	c	
			V2	12,89	2,03	1,25			
			V4	14,16	2,39	1,38			





Sada těles: U

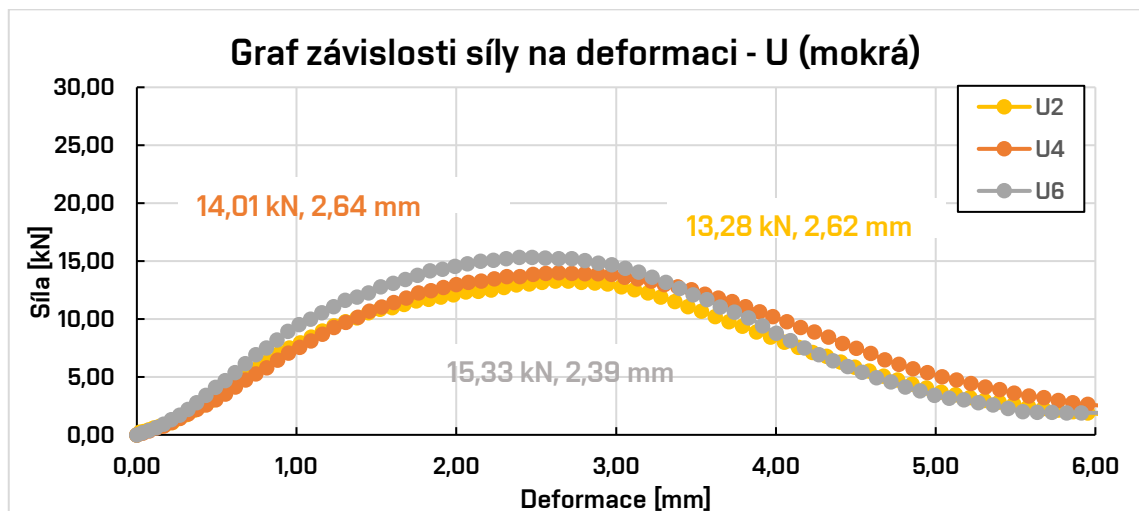
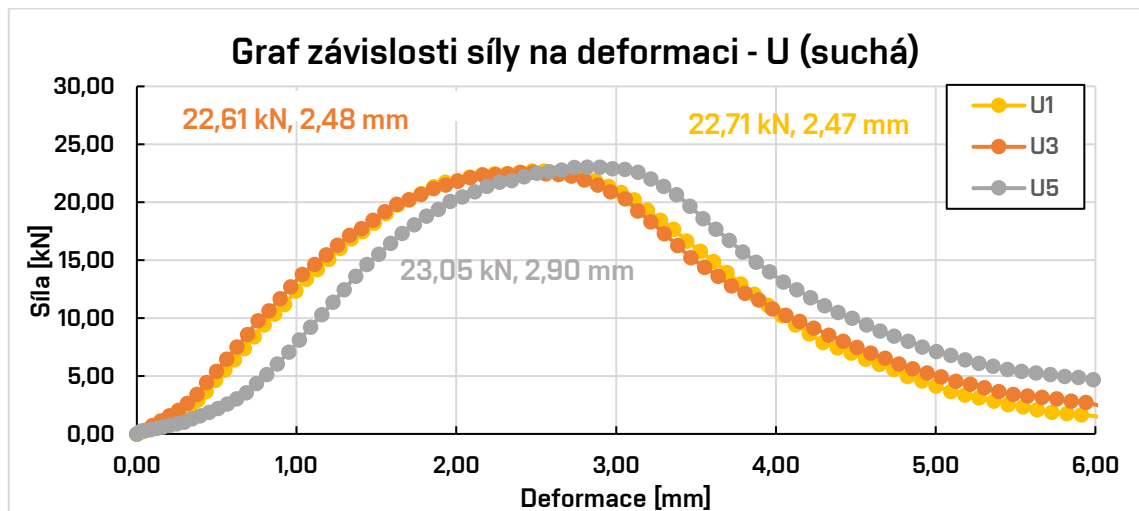
Asfaltová směs: ACO 11+

Množství pojiva: 5,7 %

Použité pojivo: 50/70

Výrobce: OMV

sada	vzorek	obsah vláken	číslo	maximální síla F_{max} [kN]	posun při F_{max} [mm]	ITS [MPa]	σ ITS [MPa]	typ porušení	ITSR [%]
U	U suchá	0,30 %	U1	22,71	2,47	2,21	2,20	c	62,52
			U3	22,61	2,48	2,18		c	
			U5	23,05	2,90	2,21		c	
	U mokrá		U2	13,28	2,62	1,27	1,37	c	
			U4	14,01	2,64	1,37		c	
			U6	15,33	2,39	1,49		c	





Sada těles: **W**

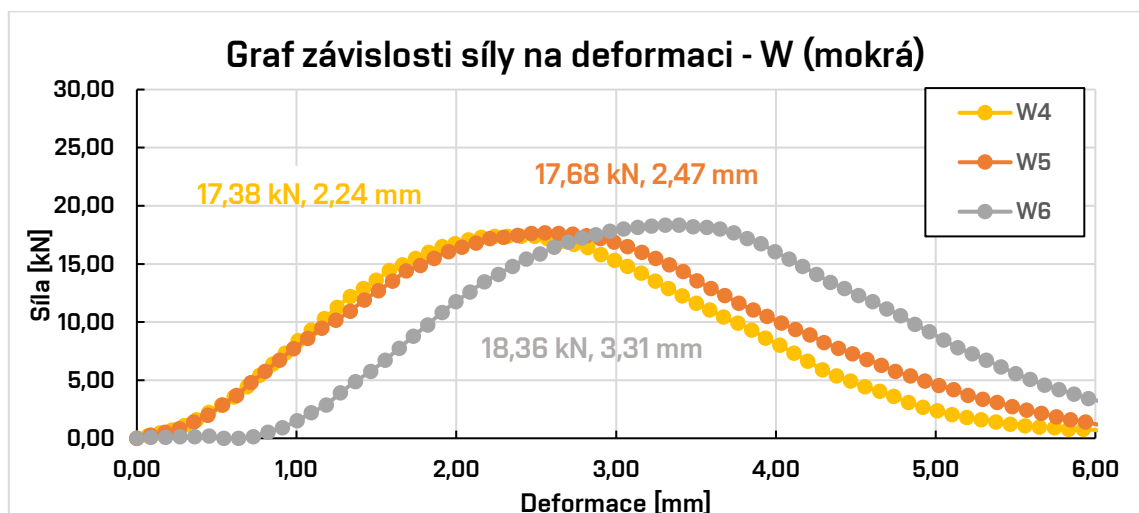
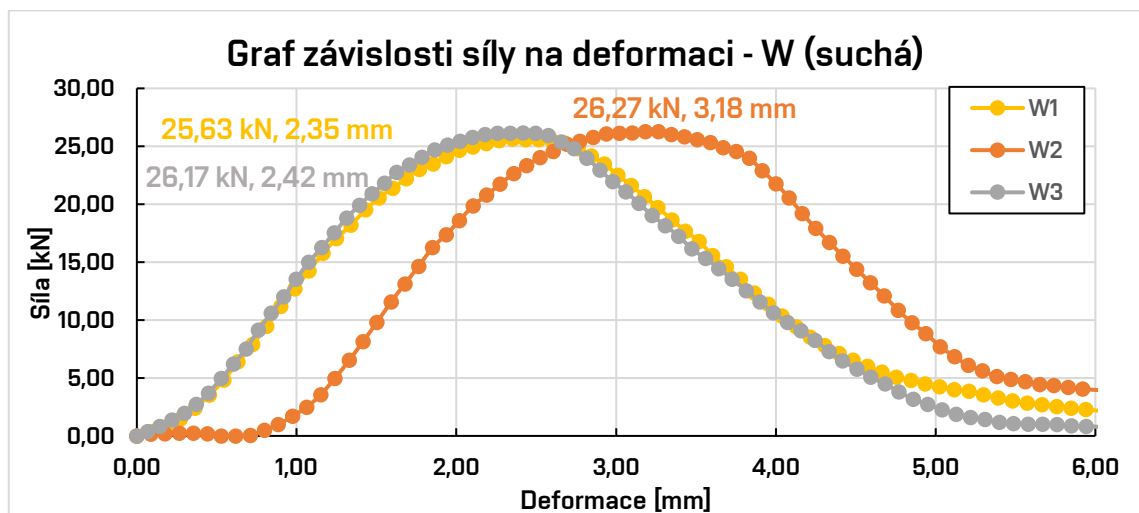
Asfaltová směs: **ACO 11+**

Množství pojiva: **5,7 %**

Použité pojivo: **50/70**

Výrobce: **OMV**

sada	vzorek	obsah vláken	číslo	maximální síla F_{max} [kN]	posun při F_{max} [mm]	ITS [MPa]	σ ITS [MPa]	typ porušení	ITSR [%]
W	W suchá	0,50 %	W1	25,63	2,35	2,65	2,61	c	68,69
			W2	26,27	3,18	2,63			
			W3	26,17	2,42	2,54			
	W mokrá		W4	17,38	2,24	1,75	1,79	c	
			W5	17,68	2,47	1,78			
			W6	18,36	3,31	1,84			





Sada těles: X

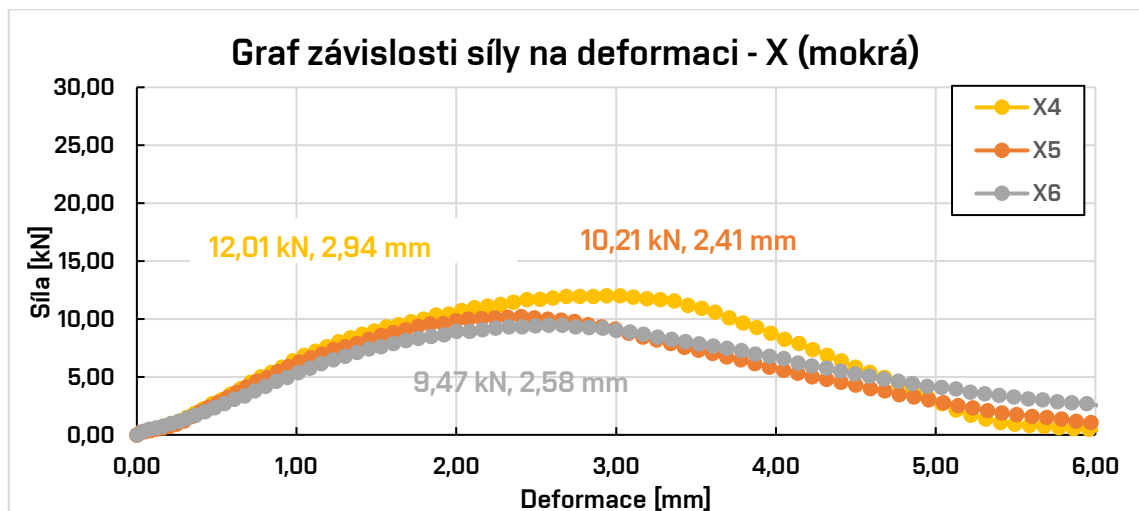
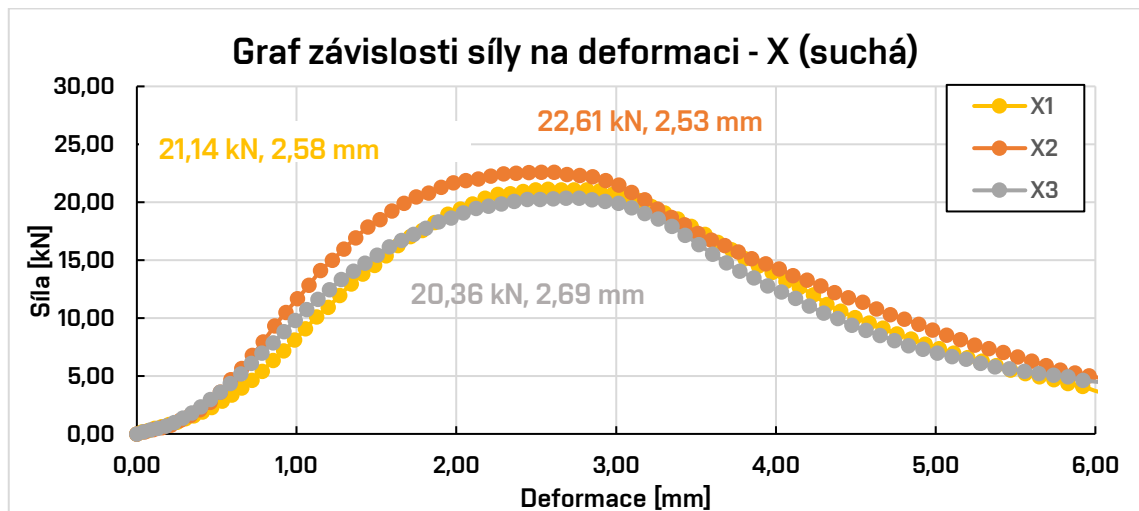
Asfaltová směs: ACO 11+

Množství pojiva: 5,7 %

Použité pojivo: 50/70

Výrobce: OMV

sada	vzorek	obsah vláken	číslo	maximální síla F_{max} [kN]	posun při F_{max} [mm]	ITS [MPa]	σ ITS [MPa]	typ porušení	ITSR [%]
X	X suchá	1,00 %	X1	21,14	2,58	1,98	1,99	c	49,67
			X2	22,61	2,53	2,08			
			X3	20,36	2,69	1,89			
	X mokrá		X4	12,01	2,94	1,13	0,99	c	
			X5	10,21	2,41	0,95			
			X6	9,47	2,58	0,88			





PŘÍLOHA 6: Vlastnosti desek: objemová hmotnost, mezerovitost, míra zhutnění

Asfaltová směs: ACO 11+

Množství pojiva: 5,7 %

Použité pojivo: 50/70

Výrobce: OMV

Směs R

Obsah vláken: 0,0 %

vlastnosti směsi z Marshallových těles							
vzorek	ρ_{bssd} [kg/m ³]	$\emptyset \rho_{\text{bssd}}$ [kg/m ³]	ρ_{mv} [kg/m ³]	V_m [%]	$\emptyset V_m$ [%]	VMA [%]	VFB [%]
1	2352	2356	2422	2,9	2,7	16,2	82,1
2	2363			2,4		15,8	84,6
3	2353			2,8		16,1	82,4

vlastnosti desek				
deska	R1	R2	R3	R4
m_1 [g]	9,80	9,81	9,79	9,79
m_2 [g]	5,68	5,70	5,69	5,68
m_3 [g]	9,83	9,84	9,83	9,83
t_w [°C]	21,1	21,1	22,2	22,2
ρ_w [kg/m ³]	997,9	997,9	997,6	997,6
ρ_{bssd} [kg/m ³]	2356	2362	2360	2357
V [%]	2,7	2,5	2,6	2,7
Mz [%]	100,0	100,3	100,2	100,0



Asfaltová směs: ACO 11+

Množství pojiva: 5,7 %

Použité pojivo: 50/70

Výrobce: OMV

Směs V

Obsah vláken: 0,5 %

vlastnosti směsi z Marshallových těles							
vzorek	ρ_{bssd} [kg/m ³]	$\emptyset \rho_{\text{bssd}}$ [kg/m ³]	ρ_{mv} [kg/m ³]	V_m [%]	$\emptyset V_m$ [%]	VMA [%]	VFB [%]
1	2352	2356	2422	2,9	2,7	16,2	82,1
2	2363			2,4		15,8	84,6
3	2353			2,8		16,1	82,4

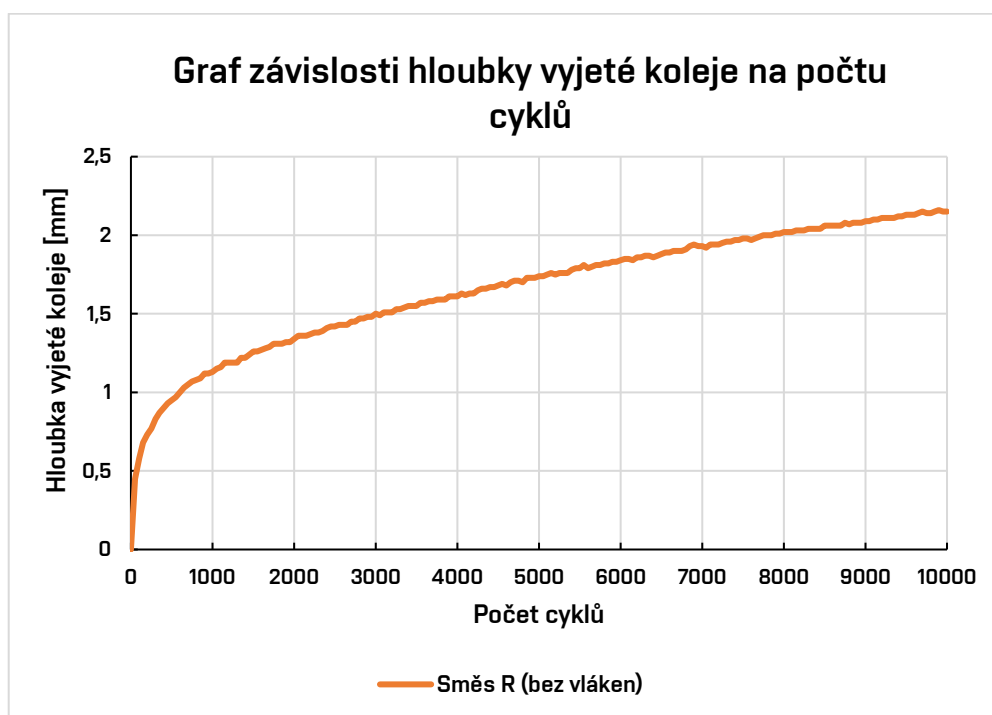
vlastnosti desek				
deska	V1	V2	V3	V4
m_1 [g]	9,81	9,80	9,80	9,80
m_2 [g]	5,67	5,67	5,67	5,68
m_3 [g]	9,84	9,85	9,83	9,84
t_w [°C]	21,1	21,1	22,2	22,2
ρ_w [kg/m ³]	997,9	997,9	997,6	997,6
ρ_{bssd} [kg/m ³]	2349	2338	2351	2346
V [%]	3,0	3,5	2,9	3,2
Mz [%]	99,7	99,2	99,8	99,6

PŘÍLOHA 7: Odolnost proti trvalým deformacím (Vyjždění kolejí) –

Záznam zkoušky

Asfaltová směs: ACO 11+
 Množství pojiva: 5,7 %
 Směs: R
 Zkušební teplota: 60 °C
 Deska: R3 (0,0 % vláken)

Průměrná hloubka vyjeté koleje po 10000 cyklech $Y_{S,10000}$ [mm]	2,15
Průměrná poměrná hloubka vyjeté koleje po 10000 cyklech PRD_{AIR} [%] $PRD_{AIR} = (Y_{S,10000} / t) \times 100$	4,3
Průměrný přírůstek hloubky vyjeté koleje WTS_{AIR} [mm / 1000 cyklů] $WTS_{AIR} = (Y_{S,10000} - Y_{S,5000}) / 5$	0,082



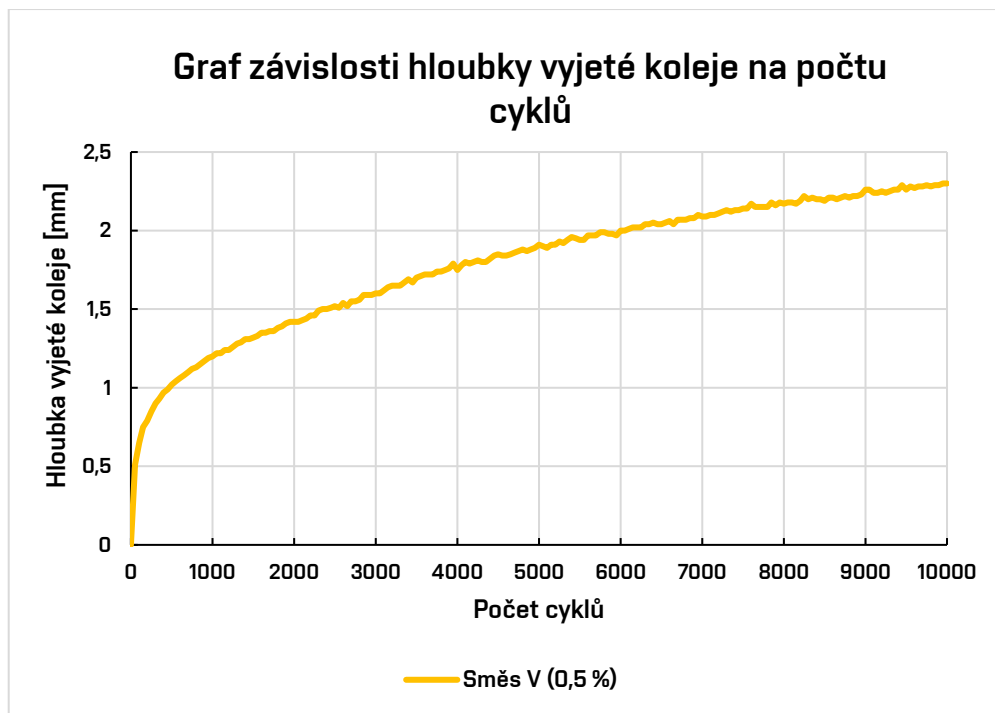


Závislost hloubky vyjeté koleje na počtu cyklů									
Počet cyklů	Hloubka koleje [mm]	Počet cyklů	Hloubka koleje [mm]	Počet cyklů	Hloubka koleje [mm]	Počet cyklů	Hloubka koleje [mm]	Počet cyklů	Hloubka koleje [mm]
0	0,00	2400	1,41	4800	1,70	7200	1,94	9600	2,13
50	0,45	2450	1,42	4850	1,73	7250	1,95	9650	2,14
100	0,58	2500	1,42	4900	1,73	7300	1,96	9700	2,15
150	0,68	2550	1,43	4950	1,73	7350	1,96	9750	2,14
200	0,73	2600	1,43	5000	1,74	7400	1,97	9800	2,14
250	0,77	2650	1,43	5050	1,74	7450	1,97	9850	2,15
300	0,83	2700	1,45	5100	1,75	7500	1,98	9900	2,16
350	0,87	2750	1,45	5150	1,76	7550	1,98	9950	2,15
400	0,90	2800	1,47	5200	1,75	7600	1,97	10000	2,15
450	0,93	2850	1,47	5250	1,76	7650	1,98		
500	0,95	2900	1,48	5300	1,76	7700	1,99		
550	0,97	2950	1,48	5350	1,76	7750	2,00		
600	1,00	3000	1,50	5400	1,78	7800	2,00		
650	1,03	3050	1,49	5450	1,79	7850	2,00		
700	1,05	3100	1,51	5500	1,79	7900	2,01		
750	1,07	3150	1,51	5550	1,81	7950	2,01		
800	1,08	3200	1,51	5600	1,79	8000	2,02		
850	1,09	3250	1,53	5650	1,80	8050	2,02		
900	1,12	3300	1,53	5700	1,81	8100	2,02		
950	1,12	3350	1,54	5750	1,81	8150	2,03		
1000	1,13	3400	1,55	5800	1,82	8200	2,03		
1050	1,15	3450	1,55	5850	1,82	8250	2,03		
1100	1,16	3500	1,55	5900	1,83	8300	2,04		
1150	1,19	3550	1,57	5950	1,83	8350	2,04		
1200	1,19	3600	1,57	6000	1,84	8400	2,04		
1250	1,19	3650	1,58	6050	1,85	8450	2,04		
1300	1,19	3700	1,58	6100	1,85	8500	2,06		
1350	1,22	3750	1,59	6150	1,84	8550	2,06		
1400	1,22	3800	1,59	6200	1,86	8600	2,06		
1450	1,24	3850	1,59	6250	1,86	8650	2,06		
1500	1,26	3900	1,61	6300	1,87	8700	2,06		
1550	1,26	3950	1,61	6350	1,87	8750	2,08		
1600	1,27	4000	1,61	6400	1,86	8800	2,07		
1650	1,28	4050	1,63	6450	1,87	8850	2,08		
1700	1,29	4100	1,62	6500	1,88	8900	2,08		
1750	1,31	4150	1,63	6550	1,89	8950	2,08		
1800	1,31	4200	1,63	6600	1,89	9000	2,09		
1850	1,31	4250	1,65	6650	1,90	9050	2,09		
1900	1,32	4300	1,66	6700	1,90	9100	2,10		
1950	1,32	4350	1,66	6750	1,90	9150	2,10		
2000	1,34	4400	1,67	6800	1,91	9200	2,11		
2050	1,36	4450	1,67	6850	1,93	9250	2,11		
2100	1,36	4500	1,68	6900	1,94	9300	2,11		
2150	1,36	4550	1,69	6950	1,93	9350	2,11		
2200	1,37	4600	1,68	7000	1,93	9400	2,12		
2250	1,38	4650	1,70	7050	1,92	9450	2,12		
2300	1,38	4700	1,71	7100	1,94	9500	2,13		
2350	1,39	4750	1,71	7150	1,94	9550	2,13		



Asfaltová směs: ACO 11+
Množství pojiva: 5,7 %
Směs: V
Zkušební teplota: 60 °C
Deska: V3 (0,5 % vláken)

Průměrná hloubka vyjeté koleje po 10000 cyklech $Y_{S,10000}$ [mm]	2,30
Průměrná poměrná hloubka vyjeté koleje po 10000 cyklech PRD_{AIR} [%] $PRD_{AIR} = (Y_{S,10000} / t) \times 100$	4,6
Průměrný přírůstek hloubky vyjeté koleje WTS_{AIR} [mm / 1000 cyklů] $WTS_{AIR} = (Y_{S,10000} - Y_{S,5000}) / 5$	0,078

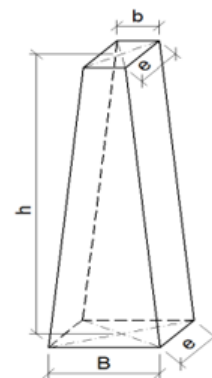




Závislosti hloubky vyjeté koleje na počtu cyklů									
Počet cyklů	Hloubka koleje [mm]	Počet cyklů	Hloubka koleje [mm]	Počet cyklů	Hloubka koleje [mm]	Počet cyklů	Hloubka koleje [mm]	Počet cyklů	Hloubka koleje [mm]
0	0,00	2400	1,50	4800	1,88	7200	2,11	9600	2,27
50	0,14	2450	1,51	4850	1,87	7250	2,12	9650	2,28
100	0,65	2500	1,52	4900	1,88	7300	2,13	9700	2,28
150	0,75	2550	1,51	4950	1,89	7350	2,12	9750	2,29
200	0,79	2600	1,54	5000	1,91	7400	2,13	9800	2,28
250	0,85	2650	1,52	5050	1,90	7450	2,13	9850	2,29
300	0,90	2700	1,55	5100	1,89	7500	2,14	9900	2,29
350	0,93	2750	1,55	5150	1,91	7550	2,14	9950	2,3
400	0,97	2800	1,56	5200	1,91	7600	2,17	10000	2,3
450	0,99	2850	1,59	5250	1,93	7650	2,15		
500	1,02	2900	1,59	5300	1,92	7700	2,15		
550	1,04	2950	1,59	5350	1,94	7750	2,15		
600	1,06	3000	1,60	5400	1,96	7800	2,15		
650	1,08	3050	1,60	5450	1,95	7850	2,18		
700	1,10	3100	1,62	5500	1,94	7900	2,16		
750	1,12	3150	1,64	5550	1,94	7950	2,18		
800	1,13	3200	1,65	5600	1,97	8000	2,17		
850	1,15	3250	1,65	5650	1,97	8050	2,18		
900	1,17	3300	1,65	5700	1,97	8100	2,18		
950	1,19	3350	1,67	5750	1,99	8150	2,17		
1000	1,20	3400	1,69	5800	1,99	8200	2,19		
1050	1,22	3450	1,67	5850	1,98	8250	2,22		
1100	1,22	3500	1,70	5900	1,98	8300	2,20		
1150	1,24	3550	1,71	5950	1,97	8350	2,21		
1200	1,24	3600	1,72	6000	2,00	8400	2,20		
1250	1,26	3650	1,72	6050	2,00	8450	2,20		
1300	1,28	3700	1,72	6100	2,01	8500	2,19		
1350	1,29	3750	1,74	6150	2,02	8550	2,21		
1400	1,31	3800	1,74	6200	2,02	8600	2,21		
1450	1,31	3850	1,75	6250	2,02	8650	2,20		
1500	1,32	3900	1,76	6300	2,04	8700	2,21		
1550	1,33	3950	1,79	6350	2,04	8750	2,22		
1600	1,35	4000	1,75	6400	2,05	8800	2,21		
1650	1,35	4050	1,78	6450	2,04	8850	2,22		
1700	1,36	4100	1,80	6500	2,04	8900	2,22		
1750	1,36	4150	1,79	6550	2,05	8950	2,23		
1800	1,38	4200	1,80	6600	2,06	9000	2,26		
1850	1,39	4250	1,81	6650	2,04	9050	2,26		
1900	1,41	4300	1,80	6700	2,07	9100	2,24		
1950	1,42	4350	1,80	6750	2,07	9150	2,24		
2000	1,42	4400	1,82	6800	2,07	9200	2,25		
2050	1,42	4450	1,84	6850	2,08	9250	2,24		
2100	1,43	4500	1,85	6900	2,08	9300	2,25		
2150	1,44	4550	1,84	6950	2,10	9350	2,26		
2200	1,46	4600	1,84	7000	2,09	9400	2,26		
2250	1,46	4650	1,85	7050	2,09	9450	2,29		
2300	1,49	4700	1,86	7100	2,10	9500	2,26		
2350	1,50	4750	1,87	7150	2,10	9550	2,28		

PŘÍLOHA 8: Rozměry zkušebních trapezoidů – (tuhost, odolnost vůči únavě)

rozměry zkušebních trapezoidů					
vzorek	B [mm]	b [mm]	h [mm]	e [mm]	m [g]
R1T1	68,54	24,69	249,91	51,89	1378,3
R1T2	68,77	24,88	249,73	51,39	1378,0
R1T3	68,66	24,01	250,08	51,66	1381,2
R1T4	68,72	23,93	250,18	51,50	1394,7
R1T5	69,59	25,21	250,10	51,95	1414,9
R2T1	69,43	23,49	248,61	51,63	1365,3
R2T2	69,15	24,50	248,84	51,41	1372,8
R2T3	68,42	23,98	248,99	51,38	1373,4
R2T4	69,03	24,83	249,34	51,55	1389,7
R2T5	68,49	24,78	249,79	52,27	1389,0
R4T1	68,93	24,11	249,33	51,77	1388,0
R4T2	69,47	24,92	248,73	51,47	1383,5
R4T3	69,29	25,04	248,65	51,25	1367,2
R4T4	69,50	24,95	248,37	51,27	1369,2
R4T5	69,20	24,80	248,42	51,57	1372,6
V2T1	69,12	24,16	248,92	51,97	1375,3
V2T2	68,78	24,02	249,07	51,82	1375,1
V2T3	69,76	24,77	249,05	51,63	1370,4
V2T4	69,28	24,19	248,94	51,95	1386,9
V2T5	69,13	24,92	248,42	52,41	1387,4
V4T1	68,89	24,09	251,87	52,47	1412,3
V4T2	68,90	24,13	251,88	51,76	1400,7
V4T3	68,80	23,97	251,55	51,57	1389,0
V4T4	68,63	23,97	251,99	51,12	1380,0
V4T5	68,53	24,79	251,30	51,63	1372,9
V1T1	69,00	24,09	250,09	51,77	1387,3
V1T2	69,16	24,14	250,38	51,62	1387,9
V1T3	69,32	24,85	250,38	51,39	1387,4
V1T4	69,15	24,60	250,69	51,43	1382,7
V1T5	69,08	24,30	250,71	51,71	1390,1





PŘÍLOHA 9: Tuhost

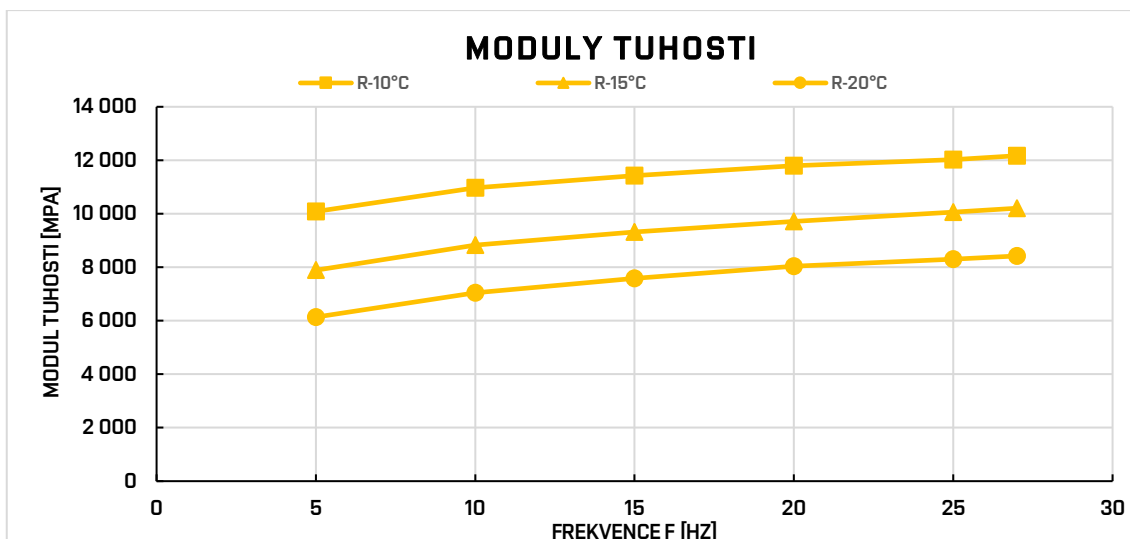
Asfaltová směs: ACO 11+

Směs: R (0 %vláken)

moduly tuhosti (při 10 °C) [MPa]						
frekvence [Hz]	5	10	15	20	25	27
vzorek						
R1-T2	9822	10688	11166	11503	11836	12019
R1-T3	10432	11341	11819	12188	12406	12478
R1-T5	9900	10813	11256	11651	11845	12034
R2-T1	9687	10516	10929	11286	11439	11615
R2-T2	10034	10948	11458	11809	12139	12326
R2-T3	10353	11191	11643	11972	12133	12175
R2-T4	10549	11472	11896	12316	12539	12684
R2-T5	9900	10813	11256	11651	11845	12034
Ø	10085	10973	11428	11797	12023	12171

moduly tuhosti (při 15 °C) [MPa]						
frekvence [Hz]	5	10	15	20	25	27
vzorek						
R1-T2	7739	8648	9166	9522	9850	10032
R1-T3	8153	9100	9611	9992	10240	10286
R1-T5	7672	8640	9135	9546	10056	10244
R2-T1	7599	8485	8942	9325	9720	9936
R2-T2	7874	8839	9370	9743	10097	10276
R2-T3	8161	9068	9539	9868	10098	10114
R2-T4	8240	9190	9682	10130	10388	10526
R2-T5	7672	8640	9135	9546	10056	10244
Ø	7889	8826	9323	9709	10063	10207

moduly tuhosti (při 20 °C) [Mpa]						
frekvence [Hz]	5	10	15	20	25	27
vzorek						
R1-T1	5478	6314	6762	7129	7349	7488
R1-T2	5996	6911	7442	7830	8160	8335
R1-T3	6293	7244	7761	8149	8425	8456
R1-T4	6523	7506	8040	8497	8760	8891
R1-T5	6135	7020	7575	8124	8366	8531
R2-T1	5835	6719	7230	7766	8004	8156
R2-T2	6043	6983	7535	7909	8263	8432
R2-T3	6269	7190	7696	8102	8307	8334
R2-T4	6377	7302	7820	8253	8553	8599
R2-T5	6135	7020	7575	8124	8366	8531
Ø	6135	7049	7579	8032	8306	8422





Asfaltová směs: ACO 11+

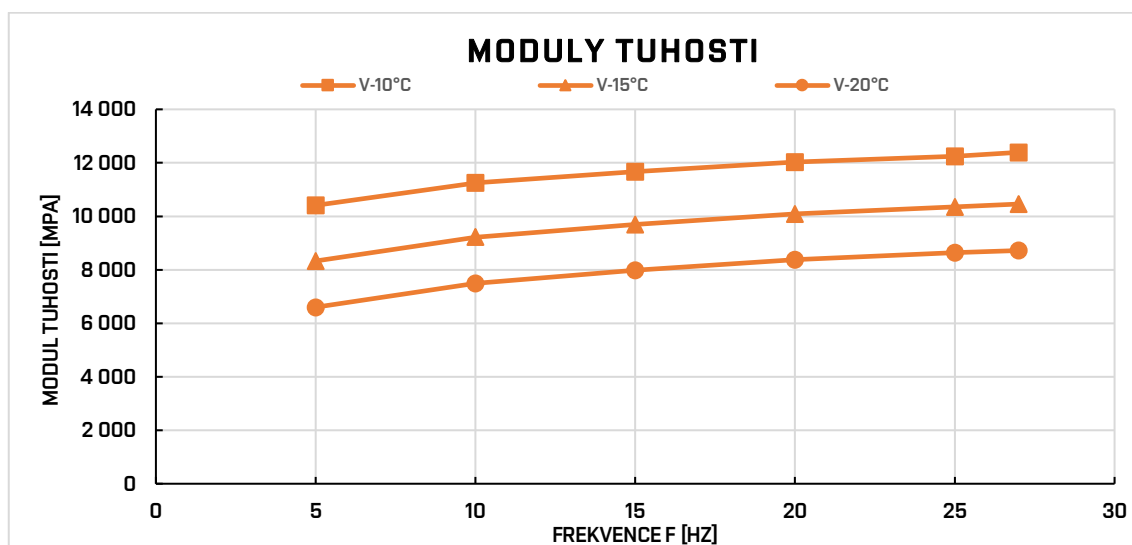
Směs: V (0,5 %vláken)

Moduly tuhosti (při 10 °C) [MPa]						
frekvence [Hz]	5	10	15	20	25	27
vzorek						
V1-T1	9764	10594	10998	11337	11624	12012
V1-T2	9667	10578	11077	11404	11715	11890
V1-T3	10391	11259	11734	12055	12213	12261
V1-T4	10616	11523	11984	12435	12717	12887
V2-T2	10786	11698	12208	12564	12846	13059
V2-T3	10338	11177	11618	11948	12127	12197
V2-T4	10775	11621	12043	12471	12727	12878
V2-T5	10091	10936	11363	11690	11881	11954
V4-T1	9901	10613	10945	11262	11371	11459
V4-T3	10702	11435	11797	12076	12222	12278
V4-T4	10782	11522	11864	12268	12500	12641
V4-T5	11111	11994	12408	12829	13050	13188
Ø	10410	11246	11670	12028	12249	12392

Moduly tuhosti (při 15 °C) [MPa]						
frekvence [Hz]	5	10	15	20	25	27
vzorek						
V1-T1	7697	8574	9051	9620	9863	10023
V1-T2	7801	8731	9259	9718	10080	10047
V1-T3	8219	9146	9654	10020	10277	10294
V1-T4	8343	9303	9804	10262	10546	10707
V2-T2	8686	9638	10184	10544	10879	11052
V2-T3	8238	9120	9601	9946	10169	10197
V2-T4	8575	9486	9956	10394	10663	10816
V2-T5	7901	8798	9285	9645	9904	9933
V4-T1	8027	8816	9188	9507	9661	9813
V4-T3	8804	9607	10023	10323	10514	10582
V4-T4	8882	9683	10094	10485	10742	10869
V4-T5	8786	9726	10195	10636	10899	11038
Ø	8330	9219	9691	10092	10358	10459



Moduly tuhosti (při 20 °C) [MPa]						
frekvence [Hz]	5	10	15	20	25	27
vzorek						
V1-T1	6063	6978	7451	7917	8254	8230
V1-T3	6353	7319	7812	8205	8454	8491
V1-T4	6487	7454	7972	8390	8698	8709
V2-T1	6061	6953	7488	7886	8115	8264
V2-T2	6817	7774	8338	8702	9051	9231
V2-T3	6404	7287	7778	8157	8400	8434
V2-T4	6745	7662	8152	8589	8860	9005
V2-T5	6396	7287	7776	8142	8382	8385
V4-T1	6376	7185	7588	7926	8113	8240
V4-T3	7105	7933	8389	8702	8918	8998
V4-T4	7189	8016	8460	8891	9154	9279
V4-T5	7216	8116	8600	9025	9267	9384
$\bar{\sigma}$	6601	7497	7984	8378	8639	8721





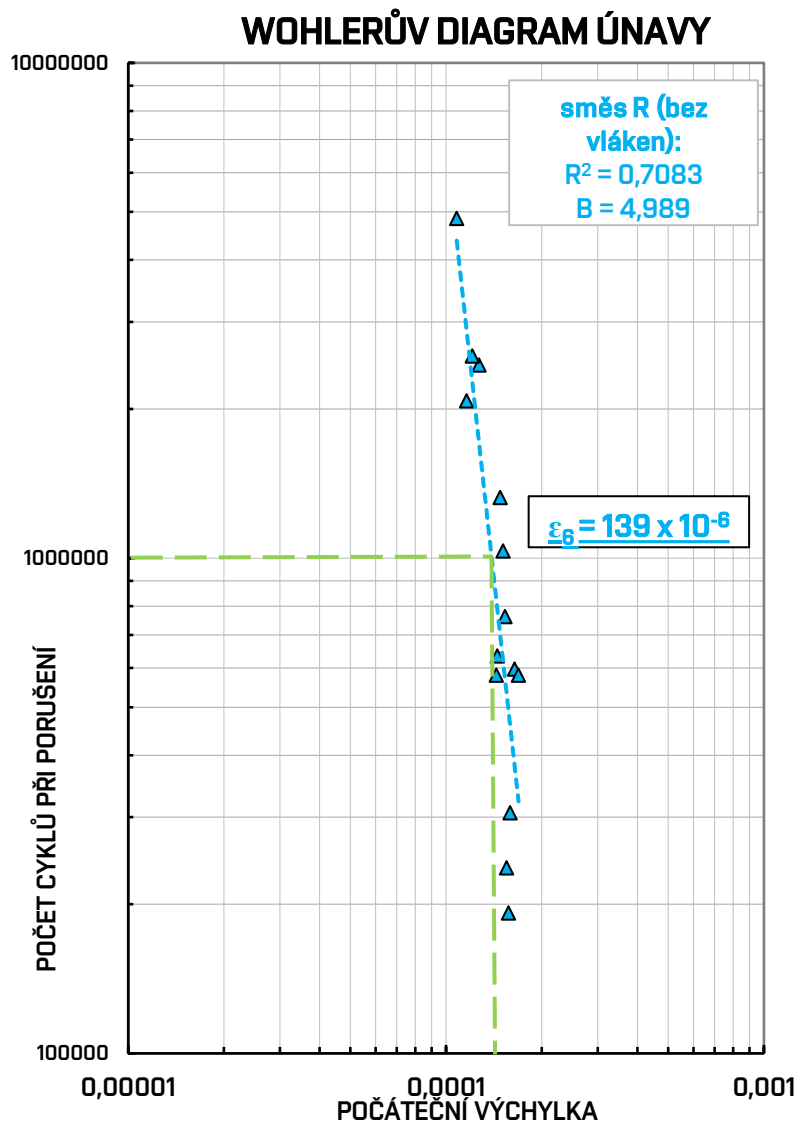
PŘÍLOHA 10: Odolnost vůči únavě

Asfaltová směs: ACO 11+

Směs: R (0 % vláken)

vzorek	poměrné přetvoření [-]	počet cyklů
R2-T1	0,000148	1327016
R2-T2	0,000153	762753
R2-T3	0,000151	1033989
R2-T4	0,000157	192275
R2-T5	0,000145	635094
R1-T1	0,000127	2456375
R1-T2	0,000121	2560286
R1-T3	0,000116	2078303
R1-T5	0,000144	580556
R4-T1	0,000155	237221
R4-T2	0,000164	597695
R4-T3	0,000159	306385
R4-T4	0,000169	580793
R4-T5	0,000108	4856980

směs	R ²	B	ε ₆
R	0,7083	4,989	1,392E-04





Asfaltová směs: ACO 11+

Směs: V (0,5 % vláken)

vzorek	poměrné přetvoření [-]	počet cyklů
V1-T1	0,000169	250280
V1-T2	0,000182	515657
V1-T3	0,000162	279501
V1-T4	0,000172	476646
V1-T5	0,000162	195354
V2-T1	0,000148	514444
V2-T2	0,000110	1872238
V2-T3	0,000109	6065349
V2-T4	0,000111	3027144
V2-T5	0,000178	144963
V4-T1	0,000121	1277745
V4-T2	0,000118	985328
V4-T3	0,000116	1585759
V4-T4	0,000126	2296345

směs	R ²	B	ε ₆
V	0,7882	5,822	1,328E-04

