

Využití vláken v asfaltových směsích a konstrukčních vrstvách vozovek

Bakalářská práce

Studijní program: B3107 – Textil
Studijní obor: 3106R016 – Textilní technologie, materiály a nanomateriály
Autor práce: **Tereza Urbánková**
Vedoucí práce: Ing. Jiří Chaloupek, Ph.D.





Use of fibers in asphalt mixtures and road construction layers

Bachelor thesis

Study programme: B3107 – Textil
Study branch: 3106R016 – Textilní technologie, materiály a nanomateriály
Author: **Tereza Urbánková**
Supervisor: Ing. Jiří Chaloupek, Ph.D.



Tento list nahradte originálem zadání

Prohlášení

Byla jsem seznámena s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědoma povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Bakalářskou práci jsem vypracovala samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé bakalářské práce a konzultantem.

Současně čestně prohlašuji, že tištěná verze práce se shoduje s elektronickou verzí, vloženou do IS STAG.

16. 4. 2019

Tereza Urbánková

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych chtěla poděkovat panu Ing. Jiřímu Chaloupkovi Ph.D. za odborné vedení mé bakalářské práce, schovívavost a trpělivost.

Dále bych chtěla poděkovat Českému vysokému učení technickému v Praze a především panu Ing. Petrovi Mondscheinovi Ph.D. za umožnění výzkumu v silniční laboratoři, odbornou konzultaci a vstřícný přístup.

Mé další poděkování patří Bc. Čestmíru Krousovi za obrovskou pomoc při výzkumu a zpracování této bakalářské práce a Ing. Františku Buráně za poskytnutí důležitých informací.

A v neposlední řadě bych chtěla poděkovat svému otci za podporu a pomoc. Děkuji.

ANOTACE

Tato bakalářská práce se zabývá studiem a testováním asfaltových směsí s vláknými přísadami.

Teoretická část je zaměřena na problematiku silničních staveb, konstrukce vozovek a modifikace. Další část je zaměřena na poruchy silnic a defekty. Dále se práce věnuje detailnímu popisu vlastností použitých vláken ve směsích. Experimentální část se zabývá výrobou zkušebních těles z jednoho typu asfaltové směsi ve čtyřech variacích a jejich testováním. Jednotlivé variace jsou mezi sebou porovnávány a vyhodnocovány přínosné nebo naopak nepřínosné vlastnosti vláken v asfaltových směsích.

Klíčová slova: konstrukce vozovky, asphalt, vlákná výztuž, defekt

ANNOTATION

This bachelor thesis deals with the study and testing of asphalt mixtures with fiber admixtures.

The theoretical part is focused on the issue of road construction, road structure and modification. The next part deals with road defects and malfunctions. Furthermore, the thesis deals with detailed descriptions of the properties of the fibers used in the mixtures. The experimental part deals with the production of specimens from one type of asphalt mixture in four variations and their testing. The individual variations are compared with each other and results of mixtures with fibers are evaluated if they are beneficial or not.

Key words: road construction, asphalt, fiber reinforcement, defect

Obsah

| | |
|---|----|
| Seznam zkratk | 9 |
| Seznam veličin | 10 |
| 1 Teoretická část | 13 |
| 1.1 Úvod do technologie stavby vozovek | 13 |
| 1.1.1 Konstrukce vozovky | 13 |
| 1.1.2 Dělení vozovek podle deformačních vlastností | 14 |
| 1.1.3 Dělení konstrukčních vrstev | 14 |
| 1.1.4 Jednotlivé složky konstrukce | 15 |
| 1.1.5 Druhy asfaltových směsí a vrstev | 17 |
| 1.1.6 Modifikace asfaltových směsí | 19 |
| 1.1.7 Poruchy vozovek | 20 |
| 1.2 Vlákna použitá ve směsi | 24 |
| 1.2.1 FORTA-FI® | 24 |
| 1.2.2 Namflex | 25 |
| 1.3 Zkoušky | 26 |
| 1.3.1 Příprava těles | 26 |
| 1.3.2 Maximální objemová hmotnost | 29 |
| 1.3.3 Objemová hmotnost | 29 |
| 1.3.4 Stanovení modulu tuhosti | 30 |
| 1.3.5 Pevnost v příčném tahu | 30 |
| 1.3.6 Stanovení odolnosti zkušebního tělesa vůči vodě | 31 |
| 1.3.7 Odolnost vůči šíření trhlin | 32 |
| 1.3.8 Marshallova zkouška | 33 |
| 1.3.9 Odolnost vůči tvorbě trvalých deformací | 34 |

| | | |
|-----|--|----|
| 2 | Experimentální část | 36 |
| 2.1 | Maximální objemová hmotnost..... | 36 |
| 2.2 | Objemová hmotnost | 38 |
| 2.3 | Stanovení modulu tuhosti..... | 40 |
| 2.4 | Pevnost v příčném tahu | 42 |
| 2.5 | Odolnost vůči vodě | 43 |
| 2.6 | Odolnost vůči šíření trhlin..... | 45 |
| 2.7 | Marshallova zkouška..... | 47 |
| 2.8 | Odolnost vůči tvorbě trvalých deformací..... | 48 |
| 3 | Závěr..... | 51 |
| 4 | Literatura | 52 |
| 5 | Přílohy | 55 |

Seznam zkratek

Zkratka Popis

| | |
|-------|--|
| AC | Asphalt Concrete (Asfaltový beton) |
| ACL | Asfaltový beton pro ložní vrstvy |
| ACO | Asfaltový beton pro obrusné vrstvy |
| ACP | Asphalt Concrete Pavement (Asfaltový beton pro podkladní vrstvy) |
| AKO | Asfaltový koberec otevřený |
| BBTM | Beton Bitumineux très minces (Asfaltový beton pro velmi tenké vrstvy) |
| CH | Nemotoristické komunikace a chodníkové úpravy |
| IT-CY | Indirect Stiffness Modulus (Zkouška v příčném tahu) |
| LVDT | Linear Variable Differential Transformer, senzor |
| MA | Mastic Asphalt (Litý asfalt) |
| MZ | Mechanicky zpevněná zemina |
| MZK | Mechanicky zpevněné kamenivo |
| PA | Porous Asphalt (Asfaltový koberec drenážní) |
| SMA | Stone Mastix Asphalt (Asfaltový koberec mastixový) |
| SSD | Saturated Surface Dry (Metoda měření objemové hm. - nasycený suchý povrch) |
| ŠD | Štěrkodrt' |
| ŠP | Štěrkopísek |
| VMT | Asfaltová směs s vysokým modulem tuhosti |
| VŠ | Vibrovaný štěrk |
| PMB | (Polymer Modified Bitumen), polymery modifikované pojivo |

Seznam veličin

| Zkratka | Popis | Jednotka |
|--|--|---------------------|
| a | Hloubka drážky | mm |
| c | Korekční faktor | - |
| d _{5 000} , d _{10 000} | Hloubka vyjeté koleje po 5 000 zatěžovacích cyklech a po 10 000 zatěžovacích cyklech | mm |
| e | Konečná tloušťka desky | mm |
| f (a/w) | Geometrický faktor | - |
| h | Výška/tloušťka | mm |
| l | Délka/ vnitřní šířka | mm |
| m | Hmotnost | g |
| t | Tloušťka | mm |
| v/V _m | Mezerovitost | % |
| z | Amplituda horizontální deformace | mm |
| D | Průměr | mm |
| F | Maximální síla | N |
| F | Přetvoření=deformace zkušebního tělesa | mm |
| F _{max} | Maximální zatížení | kN |
| F _t | Tečné přetvoření | mm |
| H | Výška | mm |
| ITS | Indirect Tensile Strength (Pevnost v příčném tahu) | MPa |
| ITS _d | Průměrná pevnost v příčném tahu suchých těles | kPa |
| ITSR | Indirect Tensile Strength Ratio (Poměr pevnosti v příčném tahu) | % |
| ITS _w | Průměrná pevnost v příčném tahu mokrých těles | kPa |
| K _{lc} | Odolnost vůči lomu | N/mm ^{1,5} |
| L | Délka/vnitřní délka | mm |
| M | Hmotnost | kg |
| P | Maximální zatížení | N |

| | | |
|---------------------|---|-----------|
| PRD_{AIR} | Proportional Rut Depth (Poměrná průměrná hloubka vyjeté koleje) | % |
| S_m | Modul tuhosti | MPa |
| T | Teplota | °C |
| V | Objem zkušebního tělesa | ml |
| V_p | Objem | m^3 |
| W | Výška zkušebního tělesa | mm |
| WTS_{AIR} | Wheel Tracking Slope (Přírůstek hloubky vyjeté koleje na vzduchu) | $mm/10^3$ |
| ΔW | Svislá deformace | mm |
| ε_{max} | Relativní protažení při maximální síle | % |
| ν | Poissonovo číslo | - |
| ρ_b | Objemová hmotnost zkušebního tělesa | kg/m^3 |
| ρ_{bssd} | Objemová hmotnost SSD | Mg/m^3 |
| ρ_m | Maximální objemová hmotnost | kg/m^3 |
| ρ_w | Hustota vody | Mg/m^3 |
| σ_{max} | Maximální napětí při porušení | N/mm^2 |

Úvod

Vlákna jsou všeobecně jedním z nejstarší a nejvíce využívaných materiálů vůbec. Ať už se jedná o vlákna přírodní nebo syntetická, všechna mají svá uplatnění především díky svým odlišným vlastnostem. Pro výrobu oděvů volíme vlákna, která jsou příjemná na omak a záleží nám na jejich vzhledu, v technickém průmyslu je nutné dbát na technické parametry jako pevnost, odolnost vůči různým typům deformací a jiné. Jejich vlastnosti se postupem času vyvíjejí a zlepšují k dokonalosti a stejně tak tomu je u asfaltových směsí.

Každá firma má na výrobu asfaltové směsi vlastní recepturu, a i když se jedná o stejný typ směsi, vlastnosti mohou být velmi odlišné. Asfaltové směsi lze modifikovat různými způsoby jako např. polymery, propojením s výztužemi (geotextilie), zpevněním pomocí rozdrčených pneumatik nebo pomocí 3D rozptýlené výztuže, vláken. Propojením asfaltových směsí s vláknennou výztuží by mělo dojít ke zvýšení pevnosti, odolnosti vůči tvorbě trvalých deformací nebo odolnosti vůči šíření trhlin. Do směsi stačí přidat opravu malé procento vláken (v řádu desetin procent), tudíž náklady na výrobu by neměly být nijak vysoké a zároveň by mělo dojít k jejich snížení v rámci údržby.

Vlákna jako výztuž by měla nejlépe fungovat na místech s vysokým zatížením, např. křižovatky, kruhové objezdy nebo autobusové zastávky. Jedná se o úseky, kde dochází, vlivem brzdných sil, k nahromadění asfaltu a tvorbě kolejí nebo různých vyboulenin. Na kruhových objezdech zase kvůli projíždění nadrozměrných vozidel dochází, vlivem tangenciálních sil, k trhání a prskání asfaltu.

Cílem této práce bylo prozkoumat oblast asfaltových směsí s vláknennými příměsmi s použitím konkrétních typů vláken – Forta FI a Namflex a vyhodnotit naměřené hodnoty. Její koncept vznikl na základě výzkumu pro firmu CIUR a. s. na ČVUT Fakultě stavební, která s firmou spolupracuje. Mimo jiné tato práce vznikla ve spolupráci se studentem Stavební fakulty Bc. Čestmírem Krousem, který se v rámci tohoto tématu zabýval ve své diplomové práci.

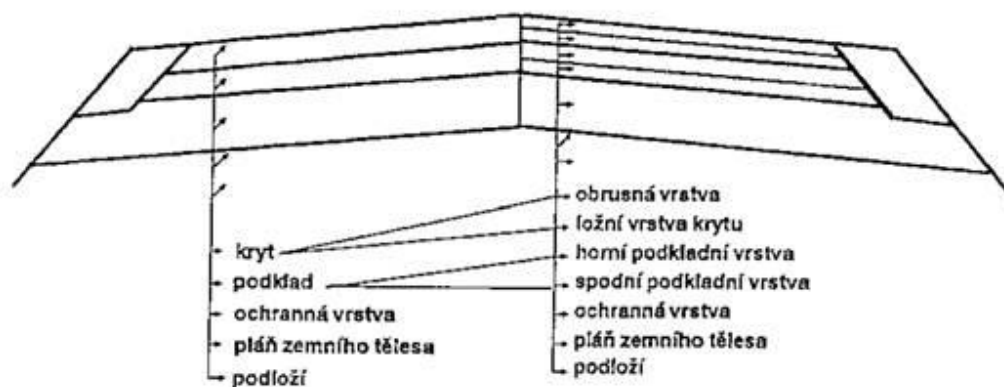
1 Teoretická část

1.1 Úvod do technologie stavby vozovek

1.1.1 Konstrukce vozovky

Definicí vozovky rozumíme zpevněnou část pozemní komunikace, umožňující svojí únosností a rovným povrchem bezpečnou, rychlou a pohodlnou jízdu vozidel. Skládá se z konstrukčních vrstev. Konstrukční vrstva může být vyrobena z jednoho druhu stavební směsi anebo z různých materiálů jednotným technologickým postupem. Konstrukční vrstva je buď stmelená pojivem (asfalt, cement) nebo nestmelená (bez pojiva). Vozovky obecně dělíme na tři druhy. Tuhé s cementobetonovým krytem, které mají vysoký modul pružnosti a vysokou pevnost, netuhé s asfaltovým, dlážděným nebo nestmeleným krytem, které jsou relativně pevné, ale při dlouhodobém zatěžování a vlivem klimatických změn začnou měnit tvar. Vyznačují se poměrně nízkým modulem pružnosti. Polotuhé vozovky mají vrstvy stmelené hydraulickým pojivem, jejich modul pružnosti je docela vysoký, naopak pevnost mají nižší. Často u nich dochází k tvorbě smršťovacích trhlin.

Vozovka se skládá z jednotlivých vrstev (viz Obr. 1). Kryt tvoří první dvě svrchní vrstvy. Kryt vozovky je složen z vrstvy obrusné (horní) a ložní (dolní). Na obrusné vrstvě dochází k přímému kontaktu s koly vozidel. Podle typu krytu se vozovky dělí na asfaltové, cementobetonové, dlážděné a vozovky s nestmeleným krytem. Mezi krytem a zemní plání se nacházejí podkladní vrstvy, které dělíme na asfaltovou, horní a spodní vrstvu. Slouží k roznášení tlaků kol vozidel z krytu do podloží [1].



Obr. 1 Vozovka na zemním tělese a její konstrukční vrstvy [2]

1.1.2 Dělení vozovek podle deformačních vlastností

Jak již bylo zmíněno výše, vozovky dělíme podle deformačních vlastností na tři typy, tuhé, netuhé a polotuhé. Tuhé vozovky jsou víceméně odolné vůči tvorbě trvalých deformací (vyjeté koleje), kryt tuhé vozovky se vyznačuje dlouhou trvanlivostí, a proto jsou nejvíce využívány na místech, kde dochází k největším zatížením jako přistávací/vzletové plochy na letištích, dálnice či rychlostní silnice. Využití nalézají také na místech, kde vozidla zpomalují, zastavují nebo se rozjíždějí. Jelikož vlastnosti tuhého krytu jsou důležité pro funkčnost celé vozovky není možné, aby jeho tloušťka byla snižována jako u netuhých vozovek a jeho pořizovací cena je relativně vysoká. Z hlediska změn vlastností vlivem klimatických podmínek je u tohoto typu vozovek nutné provádět smršťovací a dilatační spáry. Patří sem zejména vozovky betonové.

Netuhé vozovky jsou vhodné pro všechny třídy dopravního zařízení. Vstupní náklady jsou oproti tuhým vozovkám nižší, za to jsou náročnější na údržbu. Řadí se mezi ně vozovky s asfaltovým krytem a s asfaltem stmelenými nebo vůbec nestmelenými podkladními vrstvami.

U polotuhých vozovek je nutno brát v potaz jejich tendenci k tvorbě nekontrolovatelných trhlin a najít kompromis pro jejich využití vzhledem k pevnosti hydraulicky stmelené směsi a znemožnění tvorbě trhlin [1].

1.1.3 Dělení konstrukčních vrstev

Obrusná vrstva je nejsvrchnější část konstrukce vozovky, tudíž je vystavěna přímému kontaktu s vozidly a také klimatickým vlivům. Vzhledem k tomu musí být odolná vůči dešťové vodě, mrazu a chemickým látkám a nepropustná, aby voda nezatékala do spodních vrstev. Důležité jsou její protismykové vlastnosti, rovinatost a příčný sklon pro odtok srážkové vody. Volba materiálů, technologie, a především kvalita provedení souvisí s trvanlivostí celé konstrukce, a proto jsou v těchto ohledech na obrusnou vrstvu kladeny nejvyšší nároky.

Ložní vrstva se využívá u asfaltových vozovek jako podklad pod obrusnou vrstvu. Zajišťuje rovný podklad a zesiluje výšku krytu což vede k získání vhodné únosnosti konstrukce vozovky.

Podkladní vrstva má za úkol přenášet zatížení, způsobené projíždějícími vozidly, z vrchní vrstvy (krytu) do podloží tak, aby konečné zatížení bylo minimální. Nejčastěji bývají podkladní vrstvy nestmelené nebo stmelené hydraulickými pojivy, běžně bývají

stmelené i asfaltem (ACP, VMT). Na rozdíl od krytu není, z hlediska nižšího namáhání, nutné klást tak vysoké nároky na materiál a technologii.

Ochranná vrstva se využívá v případě, je-li nutné nějakou ochrannou funkci posílit. Může se jednat například o zvýšení tloušťky vozovky z důvodu ochrany před promrzáním nebo zajištění odtoku vody prosakující z podloží [1].

1.1.4 Jednotlivé složky konstrukce

1.1.4.1 Kamenivo

Základním a nejdůležitějším materiálem pro silniční stavby je kamenivo. Může být využito pro výrobu směsí či rovnou použito pro některé vrstvy vozovky.

Kamenivo je zrnitý materiál přírodního, umělého nebo recyklovaného původu. Je využíván pro všechny vrstvy při stavbě silnic a funguje jako pevný skelet vozovky. Dělí se podle objemové hmotnosti, původu, způsobu vzniku zrn a podle velikosti zrn.

Výroba spočívá v povrchové těžbě v lomech a provádí se clonovými odstřely. Další zpracování probíhá pomocí drtičů, které se dělí na čelist'ové, odrazové a kuželové. Pro největší balvany se využívají drtiče čelist'ové, které zredukuje velikost přibližně z 1200 mm na 300 mm. Odrazové se využívají pro sekundární drcení, kde dojde ke zmenšení zrn na cca 25 mm. Princip spočívá v systému rychle rotujících lopatek, které zrna odrážejí na odrazové části stroje a kameny se rozdrťí na menší [1].

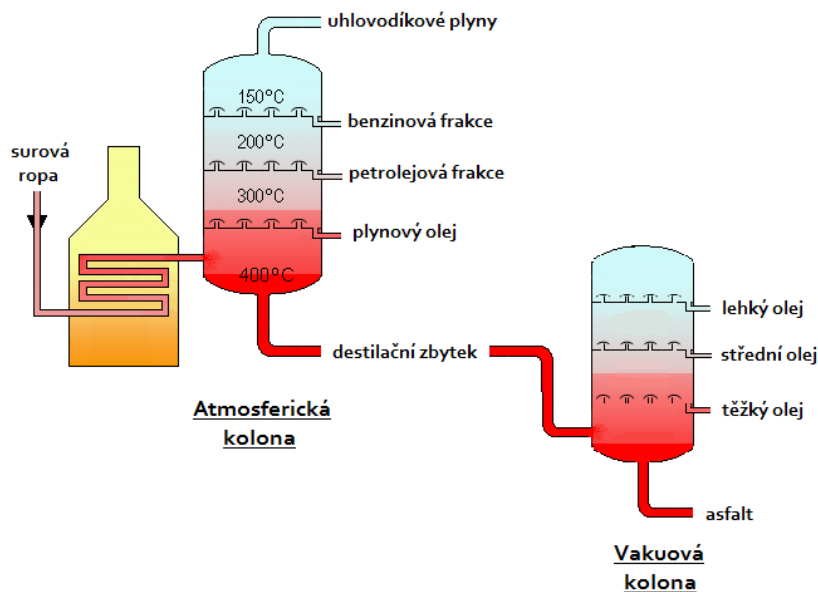
1.1.4.2 Asfalt

Asfalt, nebo jiným názvem bitumen, řadíme mezi živice. Pod tímto pojmem rozumíme směsi asfaltických nebo pyrogenetických uhlovodíků a jejich nekovových derivátů. Za běžné teploty jsou živice polotekuté nebo tuhé směsi rozpustné v sirouhlíku, tvárné a vlivem mechanického namáhání dochází u nich k trvalé deformaci [3]. Jejich viskozita je závislá na teplotě, čím vyšší, tím jsou tekutější.

Asfalty dělíme na přírodní a ropné. Přírodní asfalty se mohou vyskytovat samostatně nebo vzniknou vytavením hornin, ve kterých se asfalt nachází. V současnosti je přírodní asfalt nahrazován asfaltem ropným. Asfalt ropný vzniká jako zbytkový podíl frakční destilace ropy.

Ropa je hnědá až do černa zbarvená olejovitá látka s obsahem plynných, kapalných i tuhých příměsí. Je lehčí než voda a je obsažena ve svrchních vrstvách zemské kůry. Základní složení je 84-87 % uhlíku, 11-14 % vodíku, až 4 % síry, až 1 % dusíku a

kyslíku. Nejtěžší podíly ropy obsahují vysokomolekulární sloučeniny např. pryskyřice a asfaltény. Zpracovává se v rafinériích pomocí frakční destilace (=rektifikace), která je umožněna použitím tzv. kolony (viz Obr. 2). Za postupného ohřívání se z ropy získávají jednotlivé frakce. Rektifikace se dělí na dvě fáze, atmosférickou a vakuovou. Při atmosférické je využíván atmosférický tlak (101,3 kPa) a vznikají čtyři frakce, uhlovodíkové plyny, benzinová frakce, petrolejová frakce, plynový olej (využívá se jako pohonná hmota pro dieselové motory) a mazut, tj. destilační zbytek. Při vakuové fázi dochází k rektifikaci mazutu. Provádí se za sníženého tlaku a zvýšené teplotě a výsledkem jsou tři frakce, tj. lehký, střední a těžký olej a destilační zbytek, asfalt. Poslední fáze je tzv. krakování, kdy dochází ke zkracování uhlíkových řetězců a látky takto upravené se využívají pro další zpracování [4][5].



Obr. 2 Schéma frakční destilace ropy [4]

Pro silniční stavebnictví se využívají i asfalty modifikované polymery, a to především kvůli zlepšení fyzikálně mechanických vlastností. Modifikovaný asfalt je méně citlivý na změny teplot, lépe přilnavý ke kamenivu a má větší odolnost vůči stárnutí. Dalším z důvodů je snížení nákladů z hlediska častých oprav.

Polymery všeobecně dělíme na elastomery a plasty. Elastomery se v případě působení mechanických sil vrací do původního tvaru a řadíme mezi ně kaučuky. Plasty se dále dělí na termoplasty a reaktoplasty (termosety). U termosetů po zahřátí nastávají nevratné změny, tudíž jsou pro modifikace nevhodné, řadíme mezi ně např. epoxidové a

formaldehydové pryskyřice. Termoplasty si po zahřátí zachovávají své vlastnosti a lze je dále zpracovávat, a proto se přimíchávají do asfaltů a vzniklá směs je viskóznější [6].

1.1.5 Druhy asfaltových směsí a vrstev

1.1.5.1 Nestmelené vrstvy

Všeobecně dělíme konstrukční vrstvy na nestmelené a stmelené. Nestmelené jsou bez pojiva a jejich soudržnost závisí na fyzikálních a mechanických vlastnostech, to popisuje Mohrova teorie. Soudržnost nestmelené vrstvy je založena na vnitřním a smykovém tření, při čemž tření vnitřní je významně větší než tření smykové a za přispění vnějších sil materiál klade odpor. Pro dosažení rovnováhy v soustavě působí ještě tangenciální a normálové napětí. Je důležité, aby částice kameniva měly ostré hrany, díky kterým se do sebe mohou zaklínit.

Vrstva je složena ze směsi drceného kameniva, které je dostatečně tvrdé. Při aplikaci je důležité nastavení optimální vlhkosti, protože nízký nebo naopak příliš vysoký obsah vody způsobí potíže při hutnění. Vysoká vlhkost může způsobit problémy i u hotové vozovky, ale úplné odstranění není vlivem klimatických podmínek možné, tudíž je potřeba opatřit konstrukci např. propustným podložím, aby voda mohla odtékat.

Existuje několik druhů nestmelených směsí a vrstev jako mechanicky zpevněné kamenivo (MZK), která je považována za nejkvalitnější. Štěrkodeř (ŠD) využívaná pro středně nebo málo zatížené komunikace. Štěrkopísek (ŠP) nevhodný pro nestmelené vrstvy z důvodu velkého obsahu hladkých částic, spíše pro podkladní či ochranné vrstvy. Dále mechanicky zpevněná zemina (MZ) nebo vibrovaný štěrk (VŠ). Před zimním obdobím by se nestmelené vrstvy měly překrýt ochrannou stmelenou vrstvou, aby nedošlo k pronikání vody do spodních vrstev.

Nestmelené vrstvy jsou sice finančně méně náročné, ale z hlediska procesu stavby jsou náročné na kvalitu provedení [1].

1.1.5.2 Stmelené vrstvy – asfaltové za horka

Stmelené vrstvy bývají asfaltové, cementobetonové, stmelené hydraulickými pojivy, prolévané, vrstvy z dlažeb a dílců a se speciálními úpravami. Pro výzkum byly využity vrstvy asfaltové, které jsou nejvíce využívaným typem a uplatňují se u krytů vozovek.

Asfaltové vrstvy se obecně skládají z kameniva a asfaltového pojiva. Na obalovnách je za vysokých teplot kamenivo obaleno asfaltem, směs je odvezena na stavbu a tam položena a zhutněna. Během hutnění vznikají tři fáze, kdy dochází k zaklínění obalených částic kameniva, čímž se vytvoří základní skelet, malé částice vytvoří s horkým asfaltem tzv. mastix, asfaltovou maltu, která pomáhá skelet zafixovat a nezbytnou součástí jsou také vzduchové mezery, bez kterých by směs nefungovala správně.

Druhů asfaltových vrstev je několik a jejich vlastnosti záleží na způsobu použití. Nejčastěji se skládají z 93-96 % hmotnostního podílu kameniva a 4-7 % hmotnostního podílu pojiva [1].

1.1.5.3 Druhy asfaltových směsí a vrstev

Asfaltový beton (AC – Asphalt Concrete) se využívá pro stavbu krytových a podkladních vrstev silničních a dálničních vozovek, letištních a jiných zpevněných ploch. Obsahuje zrna všech velikostí v rovnoměrném množství. Mezerovitost by se měla pohybovat okolo 1,5-4,5 % u obrusných vrstev, 4-6 % u ložních vrstev a 4-7 % u podkladních vrstev. Označení pro asfaltový beton pro obrusné vrstvy je ACO, pro ložní vrstvy ACL a pro podkladní vrstvy ACP. Dále se jednotlivé druhy asfaltových betonů označují podle kvalitativních požadavků, pro úseky s vysokou intenzitou dopravního zatížení symbolem *S*, se střední intenzitou + a pro úseky s nízkou intenzitou jsou bez označení. Nemotoristické komunikace či chodníkové úpravy mají značení *CH*.

Asfaltový koberec mastixový (SMA – Stone Mastix Asphalt) se využívá především na místech s vysokým dopravním zatížením, a to do obrusné vrstvy. Pro základní kostru směsi je typická nejhrubší frakce kameniva a mastix pro fixaci. Používají se také vlákna, celulózová nebo akrylátová, aby zabránila stékavosti asfaltového pojiva a směs stabilizovala. Směsi SMA mají vysokou odolnost vůči vzniku trvalých deformací, trhlin působením mrazu a je pro ně typická dobrá přilnavost k podkladu. Jako u předchozí směsi se zde používá označení *S*.

Asfaltový beton pro velmi tenké vrstvy (BBTM – Beton Bitumineux Très Minces) se využívá při stavbě silnic, dálnic a letištních ploch. Lze provádět tenké úpravy, údržbové a opravné technologie a díky otevřené povrchové textuře je typickou vlastností snížení hluku z vozovky. Jednotlivé směsi se dělí podle čáry zrnitosti, což je grafické vyjádření výsledků prosévací zkoušky, která určuje velikosti jednotlivých zrn

podle hodnot propadů přepočtených na procentuální podíl z celkového množství, a značí se písmeny *A*, *B*, *C*, kde *A* je směs s vyšším obsahem drobného kameniva a jemných částic, *B* jsou směsi s nižším obsahem kameniva a jemných částic a *C* je pro směsi s vyšším obsahem drobného kameniva a nejvyšším obsahem jemných částic.

Asfaltový koberec drenážní (PA – Porous Asphalt) je využíván především v obrusných vrstvách na silnicích a dálnicích. Může být použit jako podklad pro sportovní hřiště. Drenážní koberec odvádí srážkovou vodu z povrchu vozovky a tím se snižuje riziko aquaplaningu, snižuje hlučnost, ale dlouhodobým působením vnějších vlivů dochází k vytrhávání zrn.

Asfaltový koberec otevřený (AKO) se využívá v obrusných, ložních nebo podkladních vrstvách a nemá, v rámci evropských norem, specifikované požadavky.

Litý asfalt (MA – Mastic Asphalt) se používá pro stavbu silnic, dálnic, chodníků nebo např. skladovacích ploch. Je specifický tím, že si po vychladnutí zachovává dvoufázový systém a neobsahuje vzduchové póry [1].

1.1.6 Modifikace asfaltových směsí

Jak již bylo zmíněno výše, existují i tzv. modifikované asfalty, to znamená, že přidáním aditiva do asfaltového pojiva v podobě např. polymeru, se zlepši požadované vlastnosti asfaltové směsi a výsledný produkt se buď lépe aplikuje, má delší trvanlivost nebo menší sklon k tvorbě trvalých deformací aj. Další z možností ovlivnění vlastností asfaltových směsí je modifikace asfaltových směsí např. přidáním polymerních vláken.

Používání vláken všeobecně ve stavebnictví není žádná novinka. Již ve starověkém Egyptě, před 3000 lety, Egypťané využívali hlínu a slaměná vlákna pro stavbu svých obydlí. Historie vláken využívaných v asfaltu sahá do počátků 20. století, kdy společnost Warren Brothers Company of Boston (Massachusetts) získala patent za použití azbestových vláken do asfaltových plátů, které se v současnosti používají například při stavbě střešní krytiny. Vlákna měla zabránit „roztékání“ asfaltu vlivem vysokých teplot [7]. Následně své využití našla v konstrukci asfaltové vrstvy za studena, kde došlo k omezení oddělování kameniva. Díky studii, kterou na konci padesátých let provedli *US Army Corps of Engineers, the Asphalt Institute* a *Johns-Manville Co.*, byla vlákna použita i v asfaltových směsích konstruovaných za horka. Studie dokázala, že vlákna způsobují větší pevnost v tahu, tlaku, vyšší stabilitu a větší odolnost vůči povětrnostním vlivům.

Všeobecně lze do asfaltových směsí použít různá vlákna, nejdůležitějším parametrem bude odolnost vůči vyšším teplotám, které jsou nutné při výrobě a zpracování, vůči kterým by vlákna měla být odolná nebo si zachovat potřebné vlastnosti.

Nejpoužívanějším materiálem vláknenného druhu je celulóza. Celulózová vlákna jsou rostlinného původu a lze je získávat například z recyklovaného papíru, což má pozitivní vliv na životní prostředí. Jejich výhodou a všeobecně vlastností celulózy je schopnost vysoké absorpce, díky tomu může směs obsahovat vyšší obsah pojiva. Celulózová vlákna jsou relativně levná a snadno dostupná. Mohou se vyskytovat samostatně anebo v peletách. Pelety umožňují lepší a rovnoměrnější promíchání se směsí. Jejich nevýhodou je nízká odolnost v tahu.

Minerální vlákna mohou být přírodního typu (azbest) nebo vyráběná roztavením minerálů a následným protlačováním taveniny skrz trysky. Také se mohou vyrábět z taveniny podobným způsobem jako výroba cukrové vaty. Zahrnují metalurgickou strusku, která vzniká při tavení a rafinaci kovů, čedič, brucit, ocel a uhlík. Uhlíková a ocelová vlákna byla využívána v poměrně zajímavém směru jako elektricky vodivý asfalt, který lze využít pro odmrazování nebo léčení mikrotrhlin. Minerální vlákna nejsou tolik nasákavá jako celulóza. Nevýhodou může být jejich drsný povrch způsobující opotřebení pneumatik [8].

Vlákna ze syntetických polymerů jsou v současnosti nejvíce využívána. Především polyester, polypropylen nebo aramidy. Každý polymer má jinou teplotu tání, na což musí být brán ohled při zpracování s horkou asfaltovou směsí. Pro tento experiment byla zvolena právě vlákna ze syntetických polymerů, a to konkrétně vlákna Namflex ze speciálně upraveného polyethyltereftalátu a Forta ze 100% panenské směsi aramidových a polyolefinových vláken.

1.1.7 Poruchy vozovek

Poruchy vozovek mohou vznikat vlivem klimatických podmínek, z dlouhodobého hlediska opotřebením, ale i vlivem špatné výroby směsi či nedokonale provedené samotné pokládky. Mohou vznikat pouze na povrchu, šířit se z povrchu do spodních vrstev nebo naopak ze spodních vrstev nahoru. Některé lze relativně snadno opravit a u jiných je nutná celková rekonstrukce vozovky. Dělí se na poruchy tuhých a netuhých vozovek. Vzhledem k zaměření této práce se budu zabývat poruchami vozovek

netuhých. Všeobecně se poruchy netuhých vozovek dělí do pěti kategorií (ztráta protismykových vlastností, ztráta hmoty, trhliny, deformace a další) a každá kategorie má svá další rozdělení. Vlákna jsou do směsi přidávána především kvůli šíření trhlin a vzniku trvalých deformací.

Trhliny se dělí na mozaikové, síťové, příčné a podélné. Mozaikové trhliny zasahují pouze obrusnou vrstvu a hlavní příčinou jejich vzniku je nedokonalé spojení obrusné a ložní vrstvy. Stejně tak předčasné zestárnutí asfaltového pojiva současně s vysokou mezerovitostí obrusné vrstvy nebo (viz Obr č. 3).



Obr č. 3 Mozaiková trhlina [1]

Síťové trhliny vznikají z důvodu únavy konstrukce vozovky jako přirozený proces působení dopravního zatížení (viz Obr č. 4). Ke vzniku může dojít přirozenou cestou, ale i předčasně, což může být způsobeno chybou projektanta nebo několika následných situací, např. snížení únosnosti vlivem nekvalitního provedení nebo nadměrné zatěžování dopravními prostředky. Po vzniku síťové trhliny je nutná rekonstrukce vozovky, protože způsobí hloubkové porušení vozovky a její konstrukce je na konci své životnosti.



Obr. č. 4 Sít'ová trhlina [1]

Příčné a podélné trhliny mohou vznikat z několika různých důvodů a postupně se vlivem zatěžování, průniku nečistot a vody rozšiřují (viz Obr. č. 5 a 6). Zhoršují vlastnosti vozovky, a navíc srážková voda proniká do její konstrukce, kde vlivem mrazu způsobuje rozpínání a následné zborcení podloží.

Rozlišujeme trhliny podle vzniku, např. mrazové a reflexní nebo podle stadia, úzká/široká. Mrazové vznikají vlivem použití nevhodného asfaltu, který v krátké době ztratí viskoelastické vlastnosti během chladných období. Šíří se od povrchu směrem do podloží. Reflexní trhliny vznikají prokopírováním trhlín ze spodních vrstev vozovky stmelených hydraulickými pojivy do svrchní opravené vrstvy, tedy zdola nahoru. Též může dojít k jejich kombinaci, a tím rychlejšímu vývoji trhliny.



Obr. č. 5 Trhlina příčná úzká [1]



Obr. č. 6 Trhlina podélná rozvětvená [1]

Mezi deformace se řadí poruchy jako olamování okrajů vozovky, puchýře, hrboly nebo vyjeté koleje. Vyjeté koleje vznikají vlivem vyjetí vozovky koly nákladních vozidel a jejich nadměrným zatížením (viz Obr č. 7). Kritickými místy jsou křižovatky, autobusové zastávky, kruhové objezdy, kde dochází k častému brždění vozidel. Další vliv mají vysoké teploty v letních obdobích, při nichž asfaltová smě ztrácí svou tuhost. Vzniku trvalých deformací nelze zabránit, lze ale omezit jejich hloubku na minimum zvolením kvalitní směsi, případně přidáním vláken jako zpevňovacího media [1].



Obr č. 7 Vyjeté koleje ve špatné asfaltové směsi [9]

1.2 Vlákna použitá ve směsi

1.2.1 FORTA-FI®

FORTA-FI® je směs syntetických vláken s vysokou pevností určená k zesílení asfaltových směsí. Jedná se o směs aramidových a polyolefinových vláken (viz Obr. č. 8), kde každé má svou funkci. Aramidová vlákna jsou odolná vůči vysokým teplotám a zajišťují směsi dokonalou pevnost, polyolefinová vlákna mají za úkol zajistit homogenní distribuci aramidových vláken ve směsi. Vlákna se přidávají přímo do směsi během výroby, kde vytváří trojrozměrnou výztuž v rámci celé vrstvy vozovky. Omezuje vznik trvalých defektů vzniklých termálními a únavovými vlivy jakou jsou trhliny nebo vyjeté koleje. Výhodou je, že jsou relativně málo nákladná a zároveň poslouží jako efektivní výztuž vozovky. Uplatní se na místech typu letiště, dálnice nebo parkoviště. Vlastnosti vlákenné směsi jsou uvedeny v Tabulce č. 1 [10].

| Vlákno | Aramid | Polyolefin |
|------------------------------|--------------|-------------------|
| Hustota [kg/m ³] | 1 440 | 910 |
| Pevnost v tahu [MPa] | 2 758 | * |
| Provozní teplota [°C] | -73-427 | * |
| Délka [mm] | 19 | 19 |
| Forma | monofilament | vlákna s obloučky |
| Barva | žlutá | žlutá |

*Během výroby směsi dochází k roztavení a vlákna se stávají plastickými

Tab. 1: Technologické parametry vláken Forta-FI® [10]



Obr. č. 8 Vlákna Forta FI

1.2.2 Namflex

Vlákna Namflex jsou ze speciálně upraveného polyethylentereftalátu vzniklého recyklací použité suroviny (viz Obr č. 9). Výrobce uvádí následující informace:

„Vlákno je vhodné jako stabilní rozptýlená výztuž do ložních i obrusných vrstev všech druhů asfaltových směsí (především typu AC). Vlákno ve směsi vylepšuje odolnost proti trvalým deformacím, vyjíždění kolejí, tvorbě a šíření trhlin. Díky přísadě lze snížit tloušťku asfaltové vrstvy a tím uspořit finanční náklady. Doporučené dávkování vláken je v množství 0,5 – 2 kg / t z hmotnosti asfaltové směsi. Balení s vláknem lze vkládat přímo do míchacího zařízení obalovny. Při výrobě je nutné dodržet teplotu výroby na obalovně do 170 °C. Vlákno ve směsi vylepšuje odolnost proti trvalým deformacím, vyjíždění kolejí, tvorbě a šíření trhlin“ [11].

| Vlákno | Polyester |
|------------------------------|--------------|
| Hustota [kg/m ³] | 1 300-1400 |
| Jemnost [dtex] | 1,87 |
| Pevnost [cN/dtex] | 4,3 |
| Prodloužení [%] | 37 |
| Srážení (suchým teplem) [%] | 2,8 |
| Délka [mm] | 12 |
| Teplota tání [°C] | 200-260 |
| Teplota rozkladu [°C] | Od 300 |
| Barva | špinavě bílá |

Tab. 2 Technologické parametry vláken Namflex [12]



Obr č. 9 Vlákna Namflex

1.3 Zkoušky

Pro tuto bakalářskou práci byly zvoleny tyto zkoušky:

1. Maximální objemová hmotnost
2. Objemová hmotnost
3. Stanovení modulu tuhosti
4. Pevnost v příčném tahu
5. Odolnost vůči vodě
6. Odolnost vůči šíření trhlin
7. Marshallova zkouška
8. Odolnost vůči tvorbě trvalých deformací

1.3.1 Příprava těles

1.3.1.1 Příprava těles rázovým zhutňovačem

Tělesa se vyrábí na rázovém zhutňovacím zařízení též zvaném Marshallův pěch (viz Obr 10). Vyrábí se ze směsi vyrobené buď přímo v laboratoři umíchané pomocí laboratorní míchačky, anebo na obalovně. Hotovou směs je potřeba natemperovat v sušárně bez přístupu vzduchu na teplotu, která je stanovena normou ČSN EN 12697–35 pro asfaltovou směs podle normy ČSN EN 12591 nebo dodavatelem pro směsi ČSN EN 14023 a ČSN EN 13924-1 a ČSN EN 13924-2, po dobu minimálně jedné hodiny. U prvního zkušebního tělesa je třeba bicí hlavu hutnicího pěchu a podložku formy zahřát. Smontuje se podložka formy, forma pro hutnění a nástavec a zahřejí se na teplotu hutnění. Před plněním se na dno formy položí nesavý papír, forma se naplní, povrch zarovná a navrch se znovu položí nesavý papír.

Zkouška probíhá 50–60 s a těleso je hutněno nejčastěji 50x z obou stran. Může se hutnit také 2x25 nebo 2x75, záleží na typu asfaltové směsi a účelu použití zkušebních těles. Těleso musí mít tvar válce o průměru $101,6 \pm 0,1$ mm a výšku $63,5 \pm 2,5$ mm (viz Obr č. 11). Maximální velikost kameniva ve směsi nesmí být větší než 22,4 mm [13].

Pro tento experiment byla referenční tělesa a tělesa s vlákny hutněna při 150 °C a směs s modifikovaným pojivem při 165 °C.



Obr. 10 Marshallův pěk [14]



Obr. č. 11 Marshallovo těleso

1.3.1.2 Příprava zkušebních těles zhutňovačem desek

Příprava zkušebních těles v podobě desek se vyrábí podle normy ČSN EN 12697-33. Tělesa se vyrábí hutněním, dokud nemají požadovaný objem, z čehož lze stanovit i míru mezerovitosti. Norma udává tři způsoby, jak tělesa zhutnit:

1. Metoda hutnění jedním nebo dvěma koly s pneumatikou
2. Metoda hutnění ocelovým válcem
3. Metoda hutnění ocelovými lamelami

Směs se zhutní, v plošné formě se zatížením pomocí ocelového hladkého válce přímo na směs nebo na lamely, které směs hnětou. Pro výrobu těles určených pro tento experiment byla zvolena metoda užívající lamely zatlačované válcem (viz Obr. č. 12).



Obr. č. 12 Lamelový zhutňovač

1.3.1.2.1 Metoda užívající lamely zatlačované válcem

Formy určené pro výrobu deskových těles mívají většinou rozměry $L = 320$ mm, $l = 260$ mm a $h \geq 230$ mm. Tělesa vyrobená pro experiment měla rozměry $L = 320$ mm, $l = 260$ mm, $h \doteq 43$ mm. Pro asfaltovou směs s maximální velikostí zrna by mělo mít zkušební těleso ideální výšku 40 mm. Průměr ocelového válce musí být tak velký, aby se mohl pohybovat po vertikálně uložených lamelách. Zatížení musí být dostatečně veliké, aby byla směs zhutněna na požadovaný objem. Během hutnění se pohybuje buď válec, nebo stůl ve vodorovném směru rychlostí 250 ± 100 mm/s. Hmotnost dávkování je dána rovnicí

$$M = 10^{-6} \times L \times l \times e \times \rho_m \times \left(\frac{100-v}{100} \right) \quad , \quad (1)$$

kde M [kg] je hmotnost desky asfaltové směsi, L [mm] vnitřní délka formy, l [mm] vnitřní šířka formy, e [mm] konečná tloušťka desky, ρ_m [kg/m³] maximální objemová hmotnost asfaltové směsi a v [%] mezerovitost směsi v desce.

Formu i lamely je nutné před hutněním nahřát na požadovanou teplotu alespoň 2 hodiny. Směs se rovnoměrně rozprostře do formy a lamely se vloží navrch a stroj se uvede do chodu. Po ukončení se tělesa nechají před rozebráním vychladnout. Desky lze využít přímo (viz Obr. č. 13) anebo je možné z nich vyřezat jiné zkušební vzorky [15].



Obr. č. 13 Zkušební těleso v podobě desky

1.3.2 Maximální objemová hmotnost

Maximální objemová hmotnost se měří podle normy ČSN EN 12697-5, která popisuje výpočet objemové hmotnosti asfaltové směsi bez mezer. Norma udává tři způsoby, jak maximální objemovou hmotnost získat:

1. Volumetrický
2. Hydrostatický
3. Matematický

Společně s objemovou hmotností lze vypočítat obsah mezer ve zhutněném vzorku. Maximální objemová hmotnost se vypočítá podle vzorce

$$\rho_{mv} = \frac{m_2 - m_1}{10^6 \times V_p - (m_3 - m_2) \div \rho_w} \quad , \quad (2)$$

kde V_p [m^3] je objem pyknometru při naplnění po referenční značce nástavce, ρ_w [Mg/m^3] hustota vody, m_1 [g] hmotnost prázdného pyknometru, m_2 [g] hmotnost pyknometru naplněného směsí a m_3 [g] hmotnost pyknometru naplněného směsí a destilovanou vodou [16].

1.3.3 Objemová hmotnost

Objemová hmotnost se měří podle normy ČSN EN 12697-6, která uvádí čtyři možné postupy a jejich volba je závislá na odhadovaném obsahu a přístupnosti mezer po položení a zhutnění asfaltové směsi. Jsou to:

1. Objemová hmotnost – suchá (pro tělesa s velmi uzavřeným povrchem)
2. Objemová hmotnost – nasycený suchý povrch (SSD) (pro tělesa s uzavřeným povrchem)
3. Objemová hmotnost – utěsněné zkušební těleso (pro tělesa s otevřeným nebo hrubozrnným povrchem)
4. Objemová hmotnost podle rozměrů (pro tělesa s pravidelným povrchem mající geometrický tvar, tj. čtverce, obdélníky, válce atd.)

Podstata zkoušky spočívá ve stanovení hmotnost zkušebního tělesa a jeho objemu. Pro tělesa tohoto výzkumu byla použita Objemová hmotnost – nasycený suchý povrch (SSD).

1.3.3.1 Objemová hmotnost – nasycený suchý povrch (SSD)

Výpočet vychází ze tří hmotností – hmotnost suchého tělesa, hmotnost tělesa ve vodě a hmotnost tělesa osušeného. Objemová hmotnost se vypočítá ze vzorce

$$\rho_{bssd} = \frac{m_1}{(m_3 - m_2)} \times \rho_w , \quad (3)$$

kde ρ_{bssd} [Mg/m³] je objemová hmotnost SSD, m_1 [g] hmotnost suchého zkušebního tělesa, m_2 [g] hmotnost ponořeného zkušebního tělesa ve vodě, m_3 [g] hmotnost zkušebního tělesa nasyceného vodou a povrchově osušeného a ρ_w [Mg/m³] hustota vody při zkušební teplotě [17].

1.3.4 Stanovení modulu tuhosti

Zkouška modulu tuhosti je prováděna podle normy ČSN EN 12697-26, která udává několik alternativních zkoušek, pomocí kterých se tuhost charakterizuje. Pro experiment byla zvolena zkouška IT-CY, tj. zkouška v příčném tahu. Zkouška probíhá v uzavřené komoře, která je temperována na požadovanou teplotu, v zatěžovacím zařízení. Na těleso umístěné ve speciální soustavě působí zatěžovací ocelové čelisti horizontálními údery v sinusové frekvenci. Při měření na těleso působí 5 zatěžovacích pulzů a modul tuhosti je vypočítán z rovnice

$$S_m = \frac{F \times (v + 0,27)}{(z \times h)} , \quad (4)$$

kde S_m [MPa] je modul tuhosti, F [N] maximální hodnota použitého svislého zatížení, v Poissonovo číslo, z [mm] amplituda horizontální deformace zjištěná v průběhu zatěžovacího cyklu a h [mm] průměrná tloušťka zkušebního tělesa [18].

1.3.5 Pevnost v příčném tahu

Zkouška pevnosti v příčném tahu se provádí, podle normy ČSN EN 12697-23, na válcovitých Marshallových tělesech. Výsledné hodnoty se použijí pro výpočet odolnosti zkušebního tělesa vůči vodě (viz kap. 1.3.6). Pevnost v příčném tahu je

maximální hodnota tahového napětí vypočítaného z nejvyššího zatížení, které způsobilo porušení tělesa. Vyplývá z rovnice

$$ITS = \frac{2P}{\pi D H} \quad , \quad (5)$$

kde ITS [MPa] je pevnost v příčném tahu, P [N] maximální zatížení, D [mm] průměr zkušební tělesa a H [mm] výška zkušební tělesa [19].

1.3.6 Stanovení odolnosti zkušební tělesa vůči vodě

Zkouška odolnosti vůči vodě vyplývá z normy ČSN EN 12697-12, která popisuje tři různé metody, jak ji stanovit:

1. Metoda A – pracuje s pevností v příčném tahu u zkušebních těles tvaru válce z asfaltu
2. Metoda B – pracuje s pevností v tlaku u zkušebních těles ve tvaru válce z asfaltu
3. Metoda C – určuje míru ztráty hmotnosti pro směs z měkkého asfaltu po 1 hodině od výroby směsi

V tomto případě byla použita metoda A.

1.3.6.1 Metoda A

Metoda A je vhodná především pro měkké asfaltové směsi s viskozitou, při 60 °C, vyšší než 4000 mm²/s. Série válcovitých zkušebních těles je rozdělena do dvou skupin o stejné velikosti a je temperována. Suchá tělesa se temperují na vzduchu při laboratorní teplotě 20±5 °C. Mokrá tělesa jsou nasycena vodou a uložena do vodní lázně se zvýšenou teplotou. Poté se stanoví pevnost v příčném tahu u obou typů těles podle EN 12697-23. Odolnost vůči vodě se vypočítá jako poměr zjištěné pevnosti v příčném tahu u mokrých těles k pevnosti v příčném tahu suchých těles podle vzorce

$$ITSR = \frac{ITS_w}{ITS_d} \times 100 \quad , \quad (6)$$

kde $ITSR$ [%] je poměr pevnosti v příčném tahu, ITS_w [kPa] průměrná pevnost v příčném tahu mokrých těles a ITS_d [kPa] průměrná pevnost v příčném tahu suchých těles [20].

1.3.7 Odolnost vůči šíření trhlin

Zkouška odolnosti vůči šíření trhlin je prováděna podle normy ČSN EN 12697-44, kdy dochází k třibodovému zatížení zkušební tělesa, ve tvaru půlválce, ohybem. Těleso vzniká rozpůlením Marshallova tělesa přesným řezem (jakákoli nepřesnost by mohla způsobit chyby v měření) a je předem opatřeno umělou trhlinou (hloubka=10 mm, šířka=0,9 mm) ve středu průřezu tělesa (viz Obr. č. 14) a následně vloženo do zkušebního rámu. Třibodové zatížení způsobí, že střed tělesa je vystaven tahovému napětí a v místě umělé trhliny se porušení tělesa začne rozšiřovat až do jeho úplné deformace, která se v průběhu zkoušky zvyšuje při konstantní rychlosti 5 mm/min. Současně se zvyšuje zatížení na hodnotu F_{max} , která je přímo vztažena k odolnosti tělesa vůči lomu.



Obr. č. 14 Zkušební tělesa s umělou trhlinou
i se vzniklou trhlinou po zatěžování

Z grafu se určí maximální zatížení F_{max} a svislá deformace ΔW_i . Přetvoření při maximální síle se vypočítá ze vzorce

$$\varepsilon_{max,i} = \frac{\Delta W_i}{W_i} \times 100 \quad , \quad (7)$$

kde W_i [mm] je výška zkušební tělesa a ΔW_i [mm] svislý posun zkušební tělesa i při maximální síle. Dále se vypočítá maximální napětí při porušení $\sigma_{max,i}$ [N/mm²] podle rovnice

$$\sigma_{max,i} = \frac{4,263 \times F_{max,i}}{D_i \times t_i} , \quad (8)$$

kde $F_{max,i}$ [N] je maximální síla zkušební tělesa, D_i [mm] průměr zkušební tělesa a t_i [mm] tloušťka zkušební tělesa. Spočítá se odolnost vůči lomu, tzv. kritická hodnota lomové houževnatosti $K_{lc,i}$ [N/mm^{1,5}] podle vzorce

$$K_{lc,i} = \sigma_{max,i} \times f \left(\frac{a_i}{W_i} \right) , \quad (9)$$

kde $\sigma_{max,i}$ [N/mm²] je napětí při porušení tělesa, $f(a_i/W_i)$ [-] geometrický faktor zkušební tělesa (uvádí se bez jednotky a zaokrouhluje na tři číslice), a_i [mm] hloubka drážky zkušební tělesa a W_i [mm] výška zkušební tělesa [21].

1.3.8 Marshallova zkouška

Marshallova zkouška se provádí podle normy ČSN EN 12697-34 na zařízení Stupně 2 nebo podle EN ISO 7500-1 s doporučenou minimální silou 28 N (viz Obr č. 15). Jejím výsledkem je stanovení hodnoty stability, přetvoření F a tečného přetvoření F_t u zkušebních těles vyrobených rázovým zhutňovačem. Korigovaná stabilita se vypočítá pomocí vzorce

$$c = 5,24e^{-0,028h} = 5,24e^{3,2 \times 10^{-6}V} , \quad (10)$$

kde c je korekční faktor, h [mm] výška zkušební tělesa a V [ml] objem zkušební tělesa [22].



Obr. č. 15 Zařízení pro Marshallovu zkoušku

1.3.9 Odolnost vůči tvorbě trvalých deformací

Zkouška odolnosti vůči tvorbě trvalých deformací, jinak Zkouška pojíždění kolem, se provádí podle normy ČSN EN 12697-22+A1 na deskových tělesech jejichž výroba je popsána v kapitole 1.3.1.2. Deformace se určuje změřením hloubky vyjeté koleje způsobené opakovaným pojížděním za určité teploty. Zkoušku lze provádět na malých, velkých nebo extra velkých zkušebních zařízeních. Pro tyto účely byla zkouška provedena na malém laboratorním zkušebním zařízení (viz Obr. č. 16).

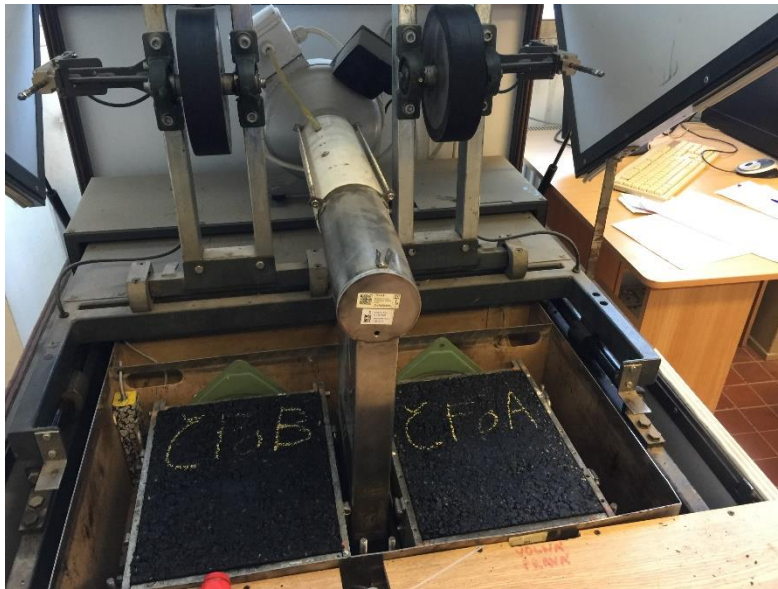
Zkoušku lze provést dvěma způsoby, A nebo B. Způsob A umožňuje temperaci pouze na vzduchu a doba temperování je závislá na velikosti zkušebního tělesa. Způsob B umožňuje temperaci na vzduchu i ve vodní lázni. Před samotným měřením je stroj potřeba uvést do záběhu a provede se pět zatěžovacích cyklů.

Během postupu A se hloubka vyjeté koleje měří automaticky a zkušební těleso je zatěžováno 1000 zatěžovacími cykly, v případě, že dříve dojde k vyjetí 15 mm koleje, stroj se zastaví. U postupu B je prováděno 10 000 cyklů a stroj se zastaví v případě dosažení hloubky vyjeté koleje 20 mm.

Zařízení je navrženo tak, aby umožnilo pohyb vpřed a vzad zkušebního tělesa v rámu pod zatíženým kolem nebo zatíženého kola po tělese v horizontální ose.

V závislosti na tloušťce zkušební tělesa se určuje doba temperace na suchu:

1. menší nebo rovno 60 mm – 4 hodiny temperace
2. větší než 60 mm – 6 hodin temperace
3. max 24 hodin temperace



Obr. č. 16 Zařízení pro vyjždění kolem

Přírůstek hloubky vyjeté koleje na vzduchu se vypočítá podle vzorce

$$WTS_{AIR} = \frac{d_{10\,000} - d_{5000}}{5} \quad , \quad (11)$$

kde WTS_{AIR} [mm/10³ zatěžovacích cyklů] je přírůstek hloubky vyjeté koleje, $d_{10\,000}$ [mm] a d_{5000} [mm] hloubka vyjeté koleje po 5 000 a 10 000 zatěžovacích cyklech. Určuje se ještě poměrná průměrná hloubka vyjeté koleje na vzduchu, která je vyjádřena z průměru hloubky vyjeté koleje u dvou zkušebních těles podle vzorce

$$PRD_{AIR} = \frac{d_{10\,000}}{h} \times 100 \quad , \quad (12)$$

kde PRD_{AIR} [%] je poměrná průměrná hloubka vyjeté koleje, $d_{10\,000}$ [mm] hloubka vyjeté koleje po 10 000 cyklech a h [mm] výška zkušební tělesa [23].

2 Experimentální část

Experimentální část je zaměřena na využití polymerních vláken v asfaltových směsích jako výztuže konstrukce obrusné vrstvy. Bylo připraveno celkem 60 Marshallových těles, z nichž část byla hutněna 2x25 údery a část 2x75 údery, a 34 desek. Ze směsi typu ACO 11S byly vytvořeny čtyři druhy vzorků – s vlákny Namflex (ACO 11S 50/70 NAMFLEX), s vlákny Forta (ACO 11S 50/70 FORTA), s modifikovaným pojivem PmB (ACO 11S PMB 45/80 – 55) a referenční bez žádných příměsí se silničním pojivem 50/70 (ACO 11S). Poměry u jednotlivých druhů směsí (50/70, 45/80) charakterizují konzistenci asfaltu. Tuto vlastnost popisuje *Zkouška penetrace jehlou*, která se provádí podle normy ČSN EN 1426, a na základě penetrace se určí základní označení pojiv, např 50/70 tj. 5-7 mm. Rozměry vzorků a další parametry jsou uvedeny v Příloze I.

Výroba směsi proběhla na obalovně Libodřice. Vlákna byla přidána v poměru 2 kg vláken na 2 t směsi (0,1 %) s kamenivem míchána 15 s a následně s pojivem při 170 °C. Směs byla dopravena do laboratoře ČVUT a z ní byla připravena zkušební tělesa.

2.1 Maximální objemová hmotnost

U všech čtyř druhů směsí byla zjištěna maximální objemová hmotnost a následně dopočítána i mezerovitost.

2.1.1.1.1 Pomůcky a zařízení

- Sušárna
- Špachtle – na oddělování vzorků
- Váhy
- Teploměr
- Pyknometr s těsně přiléhajícím nástavcem
- Vývěva

2.1.1.1.2 Postup měření

Vzorky byly nejprve očištěny kartáčem při teplotě, která nesměla být vyšší než 110±5 °C, a směs rozdrobena na hrubé částice a shluky. Maximální objemová hmotnost byla měřena pomocí pyknometru takové velikosti, aby byl maximálně ze 2/3 naplněn

asfaltovou směsí (viz Obr. č. 17). Pro měření byl zvolen postup volumetrický. Nejprve byl zvážen prázdný pyknometr (m_1) s přiléhajícím nástavcem o známém objemu. Pyknometr byl naplněn směsí a zvážen (m_2), poté byl naplněn destilovanou vodou bez obsahu vzduchových bublin a pomocí špachtle byl zbaven přebytečných bublin. Poté byl pyknometr vložen do vakua, kde se zbývající vzduch vytěsnil. Nakonec byl pyknometr vyjmut a zvážen (m_3). Výsledné hodnoty byly zapsány a z nich dopočítány dané údaje uvedené v Tabulce 3. Objemová hmotnost byla vypočítána postupem *Objemová hmotnost – nasycený suchý povrch (SSD)*.



Obr. č. 17 Pyknometr s těsně přiléhajícím nástavcem

V Tabulce 3 jsou uvedené veškeré potřebné údaje pro výpočet maximální objemové hmotnosti ρ_{mv} , kde V_p je objem pyknometru při naplnění po vyznačenou risku, m_1 hmotnost prázdného pyknometru, m_2 hmotnost pyknometru naplněného směsí, m_3 hmotnost pyknometru naplněného směsí a destilovanou vodou po vyznačenou risku, T teplota vody a ρ_{vody} hustota vody vyjádřená v megagramech [Mg/m^3], kde jeden megagram je roven jedné tuně.

Největší maximální objemovou hmotnost má směs s modifikovaným pojivem, směsi s vlákny mají oproti prvním dvěma nižší.

| | V_p [m ³] | m_1 [g] | m_2 [g] | m_3 [g] | T [°C] | ρ_{vody} [Mg/m ³] | ρ_{mv} [kg/m ³] |
|-----------------|-------------------------|-----------|-----------|-----------|----------|------------------------------------|----------------------------------|
| ACO 11S | 0,001316 | 707,5 | 1686,5 | 2645,2 | 20,4 | 0,9981 | 2757,6 |
| ACO 11S PMB | 0,001311 | 702,2 | 1674,2 | 2633,9 | 20,8 | 0,9980 | 2780,7 |
| ACO 11S NAMFLEX | 0,001315 | 699,8 | 1715,5 | 2659,3 | 20,8 | 0,9980 | 2748,5 |
| ACO 11S FORTA | 0,001321 | 707,7 | 1688,3 | 2649,1 | 20,6 | 0,9981 | 2733,2 |

Tab. 3 Maximální objemová hmotnost jednotlivých směsí

2.2 Objemová hmotnost

Objemová hmotnost byla prováděna podle normy ČSN EN 12697-6. Byla zvolena metoda Objemová hmotnost: Nasycený suchý povrch (SSD), která vychází ze tří hmotností, jak bylo zmíněno v kap. 1.3.3.

2.2.1.1.1 Pomůcky a zařízení

- Váhy
- Vodní lázeň
- Teploměr
- Vlhká jelenice

2.2.1.1.2 Postup měření

Nejprve se stanovila hmotnost suchého tělesa a hustota vody při zkušební teplotě s přesností na 0,001 Mg/m³. Následně bylo těleso ponořeno do vody pomocí závěsného zařízení (viz Obr č. 18) a nechalo se sytit vodou, dokud se hodnota hmotnosti neustálila, hodnoty se zapsaly. Poté bylo těleso vyjmuto, povrchově otřeno jelenicí a ihned stanovena jeho hmotnost.

Z maximální objemové hmotnosti a objemové hmotnosti lze vypočítat mezerovitost V_m [%], která vychází ze vzorce

$$V_m = \frac{\rho_m - \rho_b}{\rho_m} \times 100 \quad , \quad (13)$$

kde ρ_m [kg/m³] je maximální objemová hmotnost směsi a ρ_b [kg/m³] objemová hmotnost zkušební tělesa.

Hodnoty mezerovitosti by se měly, pro směs ACO 11S, pohybovat mezi 2 – 5,5 %.

| Směs | Objemová hmotnost [kg/m ³] | Maximální objemová hmotnost [kg/m ³] | Mezerovitost [%] |
|------------------|--|--|------------------|
| ACO 11 S | 2695,4 | 2757,6 | 2,3 |
| ACO 11 S PMB | 2687,6 | 2780,7 | 3,3 |
| ACO 11 S NAMFLEX | 2681,5 | 2748,5 | 2,4 |
| ACO 11 S FORTA | 2668,0 | 2733,2 | 2,4 |

Tab. 4 Mezerovitost asfaltových směsí Marshallových těles



Obr. č. 18 Závěsné zařízení pro měření mokré hmotnosti

Na veškeré parametry zmíněné v Tabulce 5 by vlákna ani modifikované pojivo neměli mít zásadní vliv, tudíž hodnoty jsou v porovnání s referenčním vzorkem víceméně totožné. Hutnění může probíhat několika způsoby v závislosti na výsledných požadavcích, zda je stanovena hutnicí energie nebo konečná objemová hmotnost. Pro hutnění zkušebních těles, určených pro tento experiment, byla zvolena metoda hutnění lamelovým zhutňovačem, který se používá pouze pro výrobu těles se zadanou objemovou hmotností nebo mezerovitostí. Míra zhutnění se vyjádří poměrem objemové hmotnosti tělesa a průměrné objemové hmotnosti směsi v procentech

| Deska | Hmotnost na suchu [g] | Hmotnost ve vodě [g] | Hmotnost po vyndání [g] | Objemová hmotnost [kg/m ³] | Objemová hmotnost směsi [kg/m ³] | Míra zhutnění [%] |
|--------------------|-----------------------|----------------------|-------------------------|--|--|-------------------|
| ACO 11 S A | 8958,2 | 5617,0 | 8989,4 | 2652,8 | 2695,4 | 98,4 |
| ACO 11 S B | 8956,1 | 5583,9 | 9006,0 | 2613,7 | | 97,0 |
| ACO 11 S PMB A | 8944,9 | 5565,6 | 9027,7 | 2580,3 | 2687,6 | 96,0 |
| ACO 11 S PMB B | 8938,2 | 5571,7 | 9026,6 | 2583,7 | | 96,1 |
| ACO 11 S NAMFLEX A | 8925,1 | 5600,5 | 8959,8 | 2653,3 | 2681,54 | 98,9 |
| ACO 11 S NAMFLEX B | 8925,5 | 5588,0 | 8960,7 | 2642,9 | | 98,6 |
| ACO 11 S FORTA A | 8829,6 | 5499,1 | 8870,6 | 2615,4 | 2668,0 | 98,0 |
| ACO 11 S FORTA B | 8877,4 | 5543,3 | 8914,2 | 2630,1 | | 98,6 |

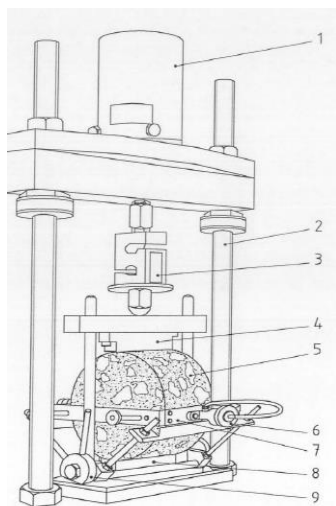
Tab. 5 Objemová hmotnost a míra zhutnění desek

2.3 Stanovení modulu tuhosti

Modul tuhosti byl stanoven pouze u těles s hutněním 2x75, podle normy ČSN EN 12697-26, při čtyřech teplotách (0, 15, 27 a 40 °C).

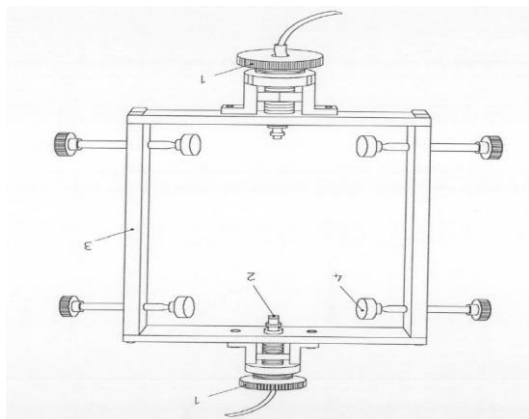
2.3.1.1.1 Pomůcky a zařízení

- Ocelový zatěžovací rám
- Zatěžovací zařízení (viz Obr č. 19)
- Systém pro měření deformace – rámeček (Obr č. 20), podpěra (Obr č. 21)
- Záznamové zařízení
- Komora pro udržení stálé teploty

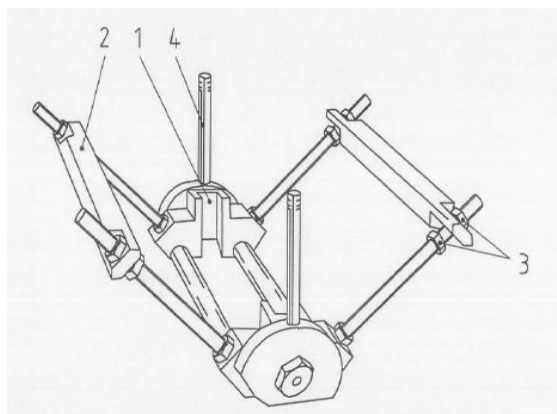


1. Pneumatický zdroj zatížení
2. Ocelový zatěžovací rám
3. Snímač síly
4. Horní čelist
5. Zkušební těleso
6. LVDT nastavovací šroub
7. Rámeček s LVDT
8. Spodní čelist
9. Nastavovací podpěra rámečku

Obr č. 19 Zkušební zařízení [18]



Obr. č. 20 Rámeček pro měření vodorovné deformace [18]



Obr. č. 21 Nastavovací podpěra pro rámeček [18]

2.3.1.1.2 Postup měření

Tělesa byla zkoušena při čtyřech různých teplotách (0, 15, 27 a 40 °C), při čemž před každým měřením za dané teploty byla min. 4 hodiny temperována. Těleso bylo vloženo do zkušebního rámu upevněného v podpěrách a vloženo pod zatěžovací zařízení. Celá soustava byla umístěna v komoře temperované na zvolenou zkušební teplotu. Správné umístění udávaly sondy (LVDT) zasazené do rámečku. Pro každé těleso bylo nutné nastavit podmínky měření (rozměry tělesa, Poissonovo číslo, zkušební teplota), aby software mohl následně modul vypočítat. Těleso bylo nejprve zatíženo deseti zkušebními pulzy, aby se zařízení nastavilo pro měření. Následně zatěžovací hlava provedla 5 zatěžovacích pulzů a do systému byl zaznamenán průběh zatížení v čase a horizontální deformace tělesa. Každé těleso bylo měřeno dvakrát, z jedné strany a následně pootočené o 90° kolem horizontální osy. Po ukončení zkoušky by se na tělesech neměly během 24 hodin provádět další zkoušky. Výsledky měření byly zaznamenány do počítače a pomocí softwaru vyhodnocen modul tuhosti (viz Tabulka 6).

Standartně by měla směs ACO S, při 15 °C, mít modul pružnosti cca 7 500 MPa. Směs ACO 11S vyrobená pro tento experiment má při této teplotě modul dvakrát větší, což znamená, že směs byla nadměrně kvalitní sama o sobě.

Z tabulky vyplývá, že při 0 °C se nejlépe chovala směs s modifikovaným pojivem a následně směs referenční. Směsi s vlákny mají nižší hodnoty, což může způsobovat nižší teplota, kdy se vlastnost vláken neprojeví. Naopak u teplot 15 °C a 40 °C jsou hodnoty u směsi s vlákny Namflex výrazně vyšší než u referenční směsi, vlákna dosáhnou nějaké funkční teploty, při které se jejich vlastnosti začnou projevovat.

Vlákna Forta se v tomto případě projevila jako neúčinná a v podstatě zbytečná příměs. Nelze ale jednoznačně určit, která ze směsí byla nejideálnější. Moduly tuhosti referenční směsi jsou však nadstandardní. Referenční směs má velice vysokou tuhost a dala by se charakterizovat jako směs typu VMT (směs s vysokým modulem tuhosti).

| | Modul 0 °C [MPa] | Modul 15 °C [MPa] | Modul 27 °C [MPa] | Modul 40 °C [MPa] |
|-----------------|---------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| ACO 11S Normal | 24888 | 12464 | 5793 | 1684 |
| ACO 11S PMB | 24971 | 13076 | 5713 | 1878 |
| ACO 11S NAMFLEX | 24570 | 13002 | 5743 | 1818 |
| ACO 11S FORTA | 23223 | 12146 | 5114 | 1418 |

Tab. 6 Modul tuhosti

V Tabulce 7 jsou uvedeny hodnoty naměřené v laboratoři ČVUT v rámci výzkumu použití vláken Forta FI pro asfaltové směsi. Byl zvolen typ ACO 11S 50/70 a stejný typ směsi byl použit i pro tento experiment. Hodnoty naměřené pro tento experiment jsou dvakrát větší než hodnoty naměřené pro FORTA Corp.

| Zkušební teplota | 50/70 | 50/70 Forta FI |
|------------------|--------|----------------|
| 0 °C | 12 330 | 13 070 |
| 15 °C | 6 600 | 7 730 |
| 27 °C | 2 070 | 2 860 |
| 40 °C | 810 | 1 170 |

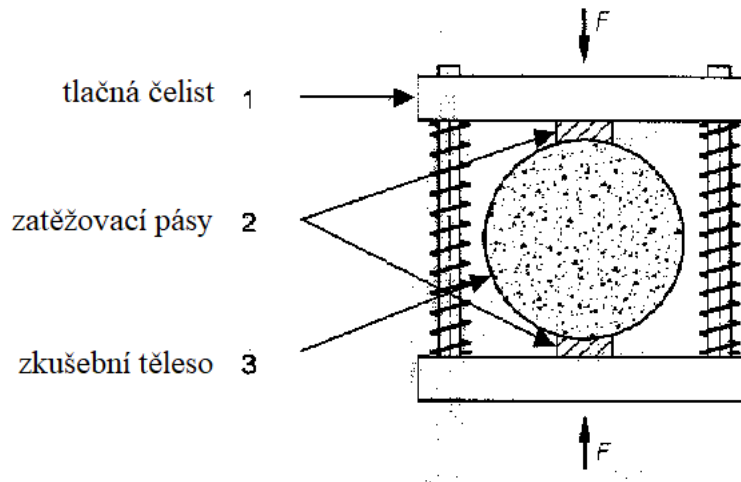
Tab. 7 Výsledky odolnosti asfaltové směsi ACO 11 S (laboratoř ČVUT) vůči tvorbě trvalých deformací -Směs ACO 11S- [24]

2.4 Pevnost v příčném tahu

Zkouška pevnosti v příčném tahu byla měřena na suchých a mokřích tělesech. Následně z nich byla vypočítána hodnota ITSR, která udává, jak je těleso odolné vůči vodě (viz 2.5).

2.4.1.1.1 Pomůcky a zařízení

- Lis (např. Marshallův lis) – schopen vyvinout min. sílu 28 kN při konstantní rychlosti 50 ± 2 mm/min
- Tlačné čelisti se zatěžovacími pásy (viz Obr č. 22)
- Měřící zařízení
- Vodní lázeň



Obr č. 22 Tlačné čelisti se zkušebním tělesem [19]

2.4.1.1.2 Postup měření

Tělesa byla v každé skupině (referenční, PMB, Namflex, Forta) rozdělena na dvě poloviny, z nichž jedna polovina těles byla měřena za sucha a druhá za mokra. Těleso se vloží do čelistí při laboratorní teplotě. Zahájí se stlačování, které probíhá plynule bez nárazů až do dosažení maximálního zatížení (viz Obr č. 23). Zkouška musí být provedena do 2 minut po vyjmutí tělesa z temperované komory. Hodnoty byly zaznamenány a využity pro výpočet ITS_R.

2.5 Odolnost vůči vodě

Odolnost vůči vodě se vypočítá z poměru pevnosti v příčném tahu za mokra a za sucha. Tělesa byla rozdělena na polovinu tak, aby se průměrná objemová hmotnost obou skupin těles nelišila od průměrné objemové hmotnosti všech těles o více než 15 kg/m^3 a výška nebyla větší než 5 mm. Vzorky musí být stejně staré, vyrobené maximálně během jednoho týdne.



Obr. č. 23 Zdeformované těleso upnuté v tlačných čelistech se zatěžovacími pásky

2.5.1.1.1 Pomůcky a zařízení:

- Zkušební lis (viz Obr. č. 24)
- Vakuový systém
- Vodní lázeň – musí být dostatečně velká, aby tělesa byla ponořena min. 20 mm pod hladinou
- Sušárna – musí obsahovat termostatickou regulaci pro udržení teploty 25 ± 2 °C.



Obr. č. 24 Zkušební lis pro měření odolnosti vůči vodě

2.5.1.1.2 Postup:

Suchá tělesa byla ponechána na rovném povrchu při laboratorní teplotě 20 ± 5 °C. Mokrá tělesa byla vložena do vakuové komory s destilovanou vodou o teplotě 20 ± 5 °C. Po 30 minutách se do komory vpustil atmosférický tlak a tělesa se nechala ve vodě dalších 30 minut. Následně byl vypočítán objem podle ČSN EN 12697-6. Mokrá tělesa byla poté vložena do vodní lázně o teplotě 40 °C na 72 hod. Zkouška proběhla pro suchá a mokrá tělesa zvlášť, tak jak je popsáno v kap 1.3.6.

Tělesa s vlákny byla za sucha pevnější. Naopak za mokra byla pevnost vyšší u referenční směsi a směsi s modifikovaným pojivem což mohlo být způsobeno nasákavostí vláknenného materiálu (viz Tabulka 8). Přesto byla výsledná hodnota ITSR nejvyšší u referenční směsi a směsi s modifikovaným pojivem. Přidáním vláken Namflex do směsi došlo k výraznému zhoršení odolnosti.

| Směs | Pevnost v příčném tahu suchá [MPa] | Pevnost v příčném tahu mokrá [MPa] | ITSR [%] |
|------------------|------------------------------------|------------------------------------|----------|
| ACO 11 S | 2,387 | 2,324 | 97,4 |
| ACO 11 S PMB | 2,480 | 2,127 | 85,7 |
| ACO 11 S NAMFLEX | 2,426 | 1,916 | 79,0 |
| ACO 11 S FORTA | 2,468 | 2,053 | 83,2 |

Tab. 8 Odolnost vůči vodě ITSR

2.6 Odolnost vůči šíření trhlin

Pro zkoušku odolnosti vůči šíření trhlin byla Marshallova tělesa rozřezána na dvě poloviny a ve středu řezu se vytvořila umělá trhlina. Tělesa byla vložena do zkušebního rámu a zatěžována rychlostí $5,0 \pm 0,2$ mm/min. Zkouška má dvě fáze mechanismu. V první fázi dojde k únavě materiálu a vytvoření trhliny, v druhé fázi se trhlina začne rozšiřovat a dojde k dynamickému zatěžování.

2.6.1.1.1 Pomůcky a zařízení:

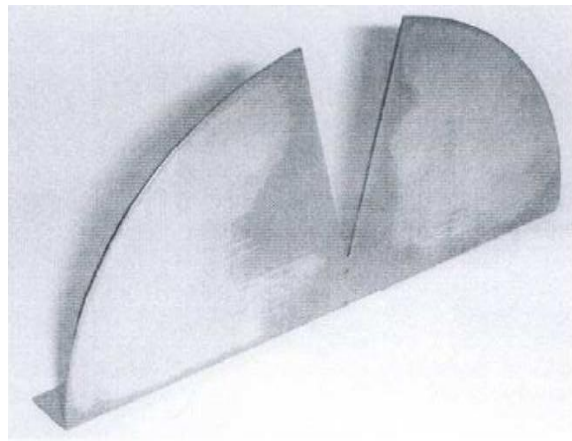
- Zkušební zařízení (viz Obr č. 25)
- Siloměr
- Zařízení pro měření deformace
- Snímací zařízení pro záznam dat

2.6.1.1.2 Postup:

Tělesa byla nejprve temperována na teplotu 0 °C, změřena a následně byla temperována na -10 °C a změřena při této teplotě. Těleso bylo umístěno do zkušebního zařízení a zatěžováno při rychlosti deformace $5 \pm 0,2$ mm/min. Byly zapsány hodnota síly [kN] a deformace [mm] při maximální síle. Trhlina musela být v oblasti ± 15 mm od středu zatěžování, což bylo ověřeno pomocí půlkruhové destičky s výsečí o těchto rozměrech (viz Obr. č. 26).



Obr. č. 25 Zkušební zařízení a snímací zařízení pro měření odolnosti vůči šíření trhlin



Obr. č. 26 Půlkruhová destička s výsečí pro usnadnění ověření platnosti zkoušky [21]

Zkouška byla prováděna při teplotách 0 °C a -10 °C. V případě měření při 0 °C byl asfalt ještě viskózní a při zatížení pouze relaxoval, vlákna se nestačila projevit. Naopak při -10 °C svou viskozitu ztratil, ztuhl a vlákenná výztuž začala fungovat a pomohla udržet napětí v tělese při zatěžování (viz Tabulka 9).

| Směs | Při 0 °C | | Při -10 °C | |
|------------------|---|-------------------------|---|-------------------------|
| | Kritická hodnota EN 2011 [N/mm ^{3/2}] | Lomová houževnatost [J] | Kritická hodnota EN 2011 [N/mm ^{3/2}] | Lomová houževnatost [J] |
| ACO 11 S | 43,8 | 2,3 | 44,2 | 2,0 |
| ACO 11 S PMB | 45,4 | 1,9 | 42,3 | 1,5 |
| ACO 11 S NAMFLEX | 40,5 | 1,5 | 44,4 | 1,6 |
| ACO 11 S FORTA | 38,3 | 1,2 | 45,4 | 1,9 |

Tab. 9 Odolnost vůči šíření trhlin

2.7 Marshallova zkouška

Marshallova zkouška se provádí na zařízení se dvěma čelistmi o daných rozměrech pro Marshallova tělesa. Jejich pohyb umožňují vodící tyče, které musí být naolejovány pro volný pohyb. Čelisti musí být řádně očištěny, aby nedocházelo při měření k nepřesnostem.

2.7.1.1.1 Pomůcky a zařízení:

- Zkušební zařízení – stupně 2 nebo podle ISO 7500-1 s minimální silou 28 N
- Zařízení pro měření
- Zařízení pro grafický záznam křivky síly a přetvoření
- Tlačné zařízení
- Vodní lázeň – s regulovatelnou teplotou na 60±1 °C
- Teploměr
- Sušárna

2.7.1.1.2 Postup:

Tělesa se ponořila do vodní lázně po dobu 40-60 minut. V lázni je třeba udržovat stálou teplotu 60±1 °C. Následně bylo těleso vloženo do čelistí boční stranou a zatěžováno s konstantní rychlostí posunu 50±2 mm/min až do maximálního zatížení. Zkouška byla provedena na třech tělesech od každé skupiny.

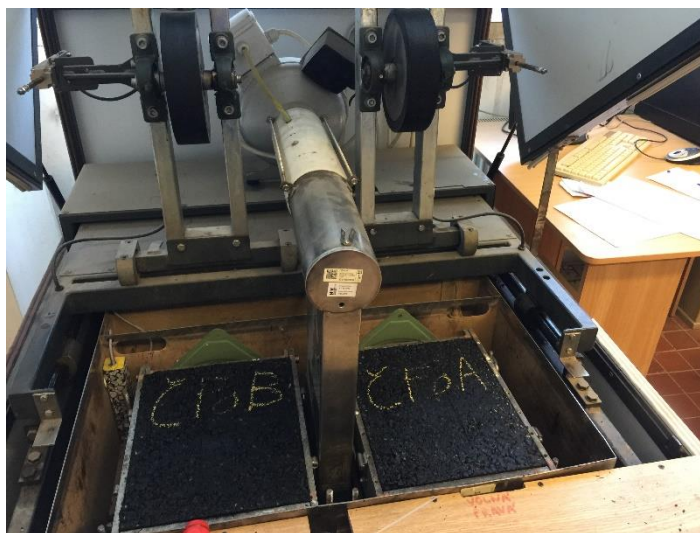
Nejlépe se projevila směs s modifikovaným pojivem. Směsi s vlákny měly hodnoty o něco nižší. Data byly zaznamenány do Tabulky 10.

| Směs | Stabilita [kN] |
|------------------|----------------|
| ACO 11 S | 21,7 |
| ACO 11 S PMB | 22,8 |
| ACO 11 S NAMFLEX | 19,7 |
| ACO 11 S FORTA | 18,5 |

Tab. 10 Marshallova zkouška

2.8 Odolnost vůči tvorbě trvalých deformací

Odolnost vůči tvorbě trvalých deformací se provádí na deskových tělesech vyrobených podle normy ČSN EN 12697-33, popsané v kap. 1.3.1.2, na zkušebním stroji (viz Obr č. 27) pojezdy zatíženým kolem.



Obr č. 27 Zkušební zařízení pro měření odolnosti vůči trvalým deformacím

2.8.1.1.1 Pomůcky a zařízení:

- Zkušební zařízení – složeno ze zatíženého kola, které působí na těleso upevněné na zkušebním stole
- Obruče – s vnějším průměrem 200-205 mm jimiž je kolo osazeno. Obruč je z pevné pryže bez dezénu.
- Zkušební stůl
- Zařízení pro regulaci teploty
- Ocelové pravítko

- Posuvné měřítko
- Prostředky pro zamezení nalepování asfaltové směsi na pojižděné kolo (mastek, křída)

2.8.1.1.2 Postup měření

Zkouška byla provedena podle postupu A, který popisuje kap. 1.3.9 při teplotě 60 °C. Pro výpočet bylo potřeba zaznamenat hodnoty po 5000 cyklech a po 10 000 cyklech. Stroj měření vyhodnotil pomocí softwaru a hodnoty byly zaznamenány do Tabulky 12. V Tabulce 11 jsou uvedeny technické parametry zkušebních těles.

| | ACO 11S | ACO 11S PMB | ACO 11S NAMFLEX | ACO 11S FORTA |
|---------------------------|---------|-------------|--------------------|---------------|
| Tloušťka h_1 [mm] | 42,4 | 43,2 | 42,2 | 41,8 |
| Tloušťka h_2 [mm] | 43,2 | 43,7 | 42,5 | 41,9 |
| Průměr \varnothing [mm] | 42,8 | 43,45 | 42,35 | 41,85 |
| Hmotnost M_1 [kg] | 8,958 | 8,945 | 8,925 | 8,83 |
| Hmotnost M_2 [kg] | 8,956 | 8,938 | 8,926 | 8,877 |

Tab. 11 Technické parametry zkušebních těles

Čím nižší je hodnota PRD_{AIR} , tím je směs odolnější. Při této zkoušce se, ze všech zkoušených směsí, nejlépe zachovala směs s modifikovaným pojivem a směs s vlákny Namflex. Směs s vlákny Forta vyšla jako nejméně odolná vůči trvalým deformacím. Modifikování směsí vlákny nebo polymery se v tomto případě jeví jako výhodné, protože referenční směs bez jakýchkoli příměsí vykazovala nejvyšší hodnotu PRD_{AIR} , tudíž nejmenší odolnost.

| Směs | Průměrná hloubka koleje po 5 000 cyklech [mm] | Průměrná hloubka koleje po 10 000 cyklech [mm] | Přírůstek hloubky vyjeté koleje WTS_{AIR} (d 10 000 - d 5 000) / 5 [mm/10 ³] | PRD_{AIR} |
|-----------------|---|--|--|-------------|
| ACO 11S | 1,36 | 1,69 | 0,066 | 3,2 |
| ACO 11S PMB | 0,91 | 1,00 | 0,018 | 2,1 |
| ACO 11S NAMFLEX | 1,01 | 1,16 | 0,03 | 2,4 |
| ACO 11S FORTA | 1,28 | 1,51 | 0,046 | 3,1 |

Tab. 12 Zkouška odolnosti vůči tvorbě trvalých deformací

V Tabulce 13 jsou uvedeny hodnoty, které byly naměřeny v laboratoři ČVUT pro výzkum společnosti FORTA Corp. Je evidentní, že vlákna měla na směs velmi pozitivní vliv a došlo ke zvýšení odolnosti vůči trvalým deformacím.

| Vlastnost | 50/70 Forta FI | 50/70 | Požadavek ČSN EN 13108-1 |
|---|----------------|-------|--------------------------|
| WTS _{AIR} [mm/10 ³ cyklů] | 0,026 | 0,032 | 0,070 |
| PRD _{AIR} [%] | 3,93 | 5,15 | 5,00 |

Tab. 13 Výsledky odolnosti asfaltové směsi ACO 11 S (laboratoř ČVUT) vůči tvorbě trvalých deformací - Směs ACO 11S [24]

V porovnání s hodnotami v Tabulce 12 je nutno poznamenat, že směs pro tento experiment byla nadstandardně kvalitní, jelikož hodnoty byly dvakrát vyšší.

3 Závěr

Cílem práce bylo prozkoumat vlastnosti asfaltových směsí s vláknennými příměsemi a jaký vliv na směs budou mít.

V teoretické části byly detailně popsány vlastnosti vozovky, její konstrukce a jednotlivé vrstvy, jejich dělení a způsob modifikace. Dále se tato část zabývala popisem jednotlivých poruch vozovek a popisem použitých druhů vláken a jejich vlastností. Poslední část byla zaměřena na popis zkoušek prováděných v rámci experimentu. V experimentální části byly vyhodnoceny použité zkoušky a popsány postupy měření.

Z celkového vyhodnocení jednotlivých zkoušek bylo zjištěno, že směs ACO 11S 50/70 byla sama o sobě velmi kvalitní a vyhodnocení zkoušek samotné směsi bez příměsí vykazovaly nadstandartní výsledky. Proto bylo velmi těžké vyhodnotit objektivně přínosnost vláken, zda měly na vlastnosti asfaltové směsi významný vliv či nikoli. Při zkoušce měření modulu tuhosti jednoznačně lepší výsledky vykazovala směs ACO 11S 50/70 s vlákny Namflex, ale zlepšení se projevilo až při vyšších teplotách, zatímco při nižších měly spíše negativní vliv. Co se týče dalších zkoušek, např. Marshallova zkouška nebo zkouška odolnosti proti vzniku trvalých deformací, měla směs s vlákny Namflex oproti směsi s vlákny Forta lepší vlastnosti. Zkouška odolnosti vůči vzniku trvalých deformací také prokázala, že vlákna Namflex se zdají být lepší, ale při dalších zkouškách, např. odolnost vůči šíření trhlin nebo vůči vodě, se směsi s vlákny Forta ukázaly jako lepší. Velmi pozitivní výsledky měla směs s modifikovaným pojivem.

Všeobecně nelze určit, který ze dvou druhů použitých vláken je lepší nebo zda použití vláken v této směsi je výhodné, protože výsledky nejsou jednoznačné. Lze konstatovat, že směs připravená pro tento účel by nebylo nutné dále zlepšovat.

Vláknenná výztuž by mohla být vhodná pro typy směsí vykazující standartní vlastnosti a hodnoty, které je potřeba zvýšit nebo snížit, tedy zlepšit směs celkově. Dále by mohla být vhodná pro hůře namíchanou směs jako relativně levný modifikátor, který by bylo možné použít přímo při výstavbě vozovky. Došlo by tak k rychlému a efektivnímu zvýšení kvality směsi s minimální náročností na aplikaci. Zároveň by bylo vhodné nějakým způsobem, a bez ovlivnění vlastností, převést formu jednotlivých vláken do podoby granulí, díky kterým by došlo k rovnoměrnějšímu rozptýlení vláken ve směsi.

4 Literatura

[1] ZAJÍČEK, Jan. *Technologie stavby vozovek*. Praha: ČKAIT, 2014. ISBN 978-80-87438-59-6.

[2] Konstrukce vozovky pozemních komunikací. In: *Thalíkovo* [online]. [cit. 2019-04-10]. Dostupné z: <http://thalikovo.xf.cz/nauka4.htm>

[3] SVOBODA, Luboš a . *Stavební hmoty* [online]. 4. Praha, 2018 [cit. 2019-02-27]. Dostupné z: <http://people.fsv.cvut.cz/~svobodal/sh/SH4v1.pdf>

[4] Ropa. *Webchemie* [online]. 2016 [cit. 2019-02-27]. Dostupné z: <https://www.webchemie.cz/ropa.html>

[5] READ, John, David WHITEOAK a Robert N. HUNTER. *The Shell Bitumen handbook*. 5th ed. London: Thomas Telford, 2003. ISBN 072773220x.

[6] Přednášky z předmětu Polymery. *Úvod – základní pojmy*. [cit. 2019-04-04]. Autor: Ing. Věra Jenčová, Ph.D. Technická univerzita v Liberci. Dostupné z: https://nanoed.tul.cz/pluginfile.php/10252/mod_resource/content/1/P1_%C3%BAvod%2C%20z%C3%A1kladn%C3%AD%20pojmy%2C%20nomenklatura.pdf

[7] Bradley J. Putman, “Effects of Fiber Finish on the Performance of Asphalt Binders and Mastics,” *Advances in Civil Engineering*, vol. 2011, Article ID 172634, 11 pages, 2011. <https://doi.org/10.1155/2011/172634>

[8] MCDANIEL, Rebecca S. *Fiber additives in asphalt mixtures*. Washington, DC: Transportation Research Board of the National Academies, 2015. ISBN 978-0-309-27177-6.

[9] Přednáška. *Poruchy vozovek a jejich příčiny* [online]. Autor: Ing. Petr Hýzl, Ph.D. Vysoké učení technické v Brně [cit. 2019-04-17].

- [10] FORTA-FI®. *Forta: Asphalt Fiber* [online]. USA, 2018 [cit. 2019-03-30]. Dostupné z: <http://www.forta-fi.com/wp-content/uploads/2017/12/FORTA-FI-Fact-Data-1.pdf>
- [11] Výztužná vlákna – Namflex®. *CIUR a.s.* [online]. Brandýs nad Labem-Stará Boleslav [cit. 2019-03-30]. Dostupné z: <http://www.ciur.cz/produkty/obsah/vyztuzna-vlakna-namflex>
- [12] GMBH, Ruthmann. *Advansa fibers*: Specification sheet. Německo [cit. 2019-04-11].
- [13] ČSN EN 12697-30. *Asfaltové směsi – Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka: Část 30: Příprava zkušebních těles rázovým zhutňovačem*. Praha: Fakulta stavební ČVUT v Praze, 2012.
- [14] Automatický Marshallův pěch. *Controls* [online]. 2011 [cit. 2019-03-03]. Dostupné z: <https://www.strojeprozkusebnictvi.cz/automaticky-marshalluv-pech.html>
- [15] ČSN EN 12697-5. *Asfaltové směsi – Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka: Část 33: Příprava zkušebních těles zhutňovačem desek*. Praha: Fakulta stavební ČVUT v Praze, 2007.
- [16] ČSN EN 12697-5. *Asfaltové směsi – Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka: Část 5: Stanovení maximální objemové hmotnosti*. Praha: Fakulta stavební ČVUT v Praze, 2009.
- [17] ČSN EN 12697-6. *Asfaltové směsi – Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka: Část 6: Stanovení objemové hmotnosti asfaltového zkušebního tělesa*. Praha: Fakulta stavební ČVUT v Praze, 2009.
- [18] ČSN EN 12697-26. *Asfaltové směsi – Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka: Část 26: Tuhost*. Praha: Fakulta stavební ČVUT v Praze, 2006.

[19] ČSN EN 12697-23. *Asfaltové směsi – Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka: Část 23: Stanovení pevnosti v příčném tahu*. Praha: Fakulta stavební ČVUT v Praze, 2005.

[20] ČSN EN 12697-12. *Asfaltové směsi – Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka: Část 12: Stanovení odolnosti zkušebního tělesa vůči vodě*. Praha: Fakulta stavební ČVUT v Praze, 2009.

[21] ČSN EN 12697-44. *Asfaltové směsi – Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka: Šíření trhliny zkouškou ohybem na půlválcovém zkušebním tělese*. Praha: Fakulta stavební ČVUT v Praze, 2011.

[22] ČSN EN 12697-34+A1. *Asfaltové směsi – Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka: Marshallova zkouška*. Praha: Fakulta stavební ČVUT v Praze, 2007.

[23] ČSN EN 12697-22+A1. *Asfaltové směsi – Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka: Zkouška poježdění kolem*. Praha: Fakulta stavební ČVUT v Praze, 2007.

[24] *Aramidová vlákna: Moderní způsob vyztužení asfaltových směsí* [online]. 2014 [cit. 2019-04-16]. ISSN SLINICE ŽELEZNICE. Dostupné z: <http://www.silnice-zeleznice.cz/clanek/aramidova-vlakna-moderni-zpusob-vyztuzeni-asfaltovych-smesi/>

5 Přílohy

OBSAH

| | |
|--|----|
| Příloha č. I: Rozměry vzorků a další naměřené parametry..... | 56 |
| Příloha č. I: Vyhodnocení zkoušky modulu tuhosti..... | 62 |
| Příloha č. II: Vyhodnocení Marshallovy zkoušky..... | 70 |
| Příloha č. III.: Vyhodnocení zkoušky odolnosti vůči tvorbě trvalých deformací..... | 72 |

Příloha I. Rozměry vzorků a další naměřené parametry

| Vzorek | Výška [mm] | Průměr [mm] | Objem [mm ³] | Hmotnost na suchu [g] | Hmotnost ve vodě [g] | Hmotnost po vyndání [g] | ρ/ρ_{ssd} [kg/m ³] | Mezerovitost V _m [%] | Objemová hmotnost průměrná [kg/m ³] |
|---------------------------|------------|-------------|--------------------------|-----------------------|----------------------|-------------------------|---|---------------------------------|---|
| ACO 11S normal 2x25 údery | | | | | | | | | |
| Č11 | 56,82 | 101,88 | 463200 | 1143,3 | X | X | 2468,3 | X | 2471,4 |
| Č12 | 56,55 | 102,02 | 462267 | 1140,8 | X | X | 2467,8 | X | |
| Č13 | 56,13 | 102,07 | 459284 | 1143,8 | X | X | 2490,4 | X | |
| Č14 | 56,37 | 102,24 | 462785 | 1146,8 | X | X | 2478,0 | X | |
| Č15 | 56,99 | 101,55 | 461581 | 1141,6 | X | X | 2473,2 | X | |
| Č16 | 57,18 | 101,71 | 464581 | 1137,5 | X | X | 2448,4 | X | |
| Č17 | 56,74 | 101,85 | 462276 | 1147,0 | X | X | 2481,2 | X | |
| Č18 | 56,95 | 101,52 | 460985 | 1135,8 | X | X | 2463,9 | X | |
| ACO 11S normal 2x75 údery | | | | | | | | | |
| Č21 | 53,30 | 101,99 | 435444 | 1144,1 | 721,4 | 1145,5 | 2694,2 | 2,3 | 2695,4 |
| Č22 | 52,88 | 101,70 | 429559 | 1136,1 | 716,8 | 1137,3 | 2698,2 | 2,2 | |
| Č23 | 53,00 | 101,84 | 431720 | 1136,0 | 715,3 | 1137,4 | 2687,8 | 2,5 | |
| Č24 | 52,93 | 101,81 | 430896 | 1142,1 | 720,3 | 1142,7 | 2700,3 | 2,1 | |
| Č25 | 52,87 | 102,32 | 434731 | 1149,1 | 724,5 | 1150,1 | 2696,4 | 2,2 | |
| Č26 | 53,11 | 101,86 | 432786 | 1148,5 | 724,4 | 1149,4 | 2698,8 | 2,1 | |
| Č27 | 52,99 | 101,75 | 430876 | 1141,7 | 719,9 | 1142,6 | 2697,4 | 2,2 | |
| Č28 | 51,81 | 103,04 | 432031 | 1140,2 | 717,6 | 1141,0 | 2689,4 | 2,5 | |

| | | | | | | | | | |
|----------------------------|-------|--------|--------|--------|-------|--------|--------|-----|---------|
| Č29 | 52,64 | 102,26 | 432332 | 1140,8 | 718,8 | 1141,4 | 2695,9 | 2,2 | |
| ACO 11S NAMFLEX 2x25 údery | | | | | | | | | |
| Č31 | 57,31 | 101,71 | 465637 | 1142,8 | X | X | 2454,3 | X | 2446,0 |
| Č32 | 57,22 | 101,90 | 466644 | 1144,8 | X | X | 2453,3 | X | |
| Č33 | 56,75 | 101,73 | 461269 | 1137,6 | X | X | 2466,2 | X | |
| Č34 | 57,38 | 101,83 | 467307 | 1142,5 | X | X | 2444,9 | X | |
| Č35 | 58,01 | 101,78 | 471974 | 1150,6 | X | X | 2437,8 | X | |
| Č36 | 57,45 | 102,17 | 471006 | 1159,8 | X | X | 2462,4 | X | |
| Č37 | 57,12 | 102,31 | 469585 | 1146,4 | X | X | 2441,3 | X | |
| Č38 | 57,68 | 102,24 | 473540 | 1140,2 | X | X | 2407,8 | X | |
| ACO 11S NAMFLEX 2x75 údery | | | | | | | | | |
| Č41 | 52,33 | 103,16 | 437384 | 1143,2 | 718,1 | 1145,2 | 2673,1 | 2,7 | 2681,54 |
| Č42 | 53,57 | 101,81 | 436106 | 1142,1 | 718,1 | 1143,6 | 2680,6 | 2,5 | |
| Č43 | 53,76 | 101,73 | 436966 | 1148,8 | 722,0 | 1150,4 | 2678,1 | 2,6 | |
| Č44 | 53,50 | 101,86 | 435964 | 1149,3 | 723,8 | 1150,3 | 2691,2 | 2,1 | |
| Č45 | 53,23 | 101,89 | 434020 | 1136,8 | 715,0 | 1137,9 | 2684,6 | 2,3 | |
| Č46 | 53,12 | 101,88 | 433038 | 1133,7 | 712,9 | 1135,1 | 2681,7 | 2,4 | |
| ACO 11S PMB 2x25 údery | | | | | | | | | |
| Č51 | 57,01 | 101,89 | 464841 | 1138,3 | X | X | 2448,8 | X | 2454,7 |
| Č52 | 57,21 | 101,86 | 466197 | 1143,4 | X | X | 2452,6 | X | |
| Č53 | 56,72 | 102,31 | 466297 | 1140,6 | X | X | 2446,1 | X | |

| | | | | | | | | | |
|------------------------|-------|--------|--------|--------|-------|--------|--------|-----|--------|
| Č54 | 57,03 | 101,86 | 464730 | 1142,8 | X | X | 2459,1 | X | |
| Č55 | 56,96 | 101,89 | 464433 | 1142,1 | X | X | 2459,1 | X | |
| Č56 | 57,27 | 101,64 | 464672 | 1144,4 | X | X | 2462,8 | X | |
| ACO 11S PMB 2x75 údery | | | | | | | | | |
| Č61 | 53,76 | 101,81 | 437653 | 1151,6 | 725,8 | 1152,7 | 2694,0 | 3,1 | |
| Č62 | 53,24 | 101,88 | 434016 | 1145,0 | 720,7 | 1146,3 | 2686,8 | 3,4 | |
| Č63 | 53,13 | 101,82 | 432609 | 1142,0 | 719,6 | 1144,0 | 2687,3 | 3,4 | |
| Č64 | 53,21 | 102,24 | 436842 | 1151,4 | 724,9 | 1153,1 | 2685,4 | 3,4 | 2687,6 |
| Č65 | 53,83 | 101,94 | 439343 | 1151,4 | 724,3 | 1153,0 | 2682,3 | 3,5 | |
| Č66 | 52,11 | 103,21 | 435968 | 1145,3 | 721,7 | 1147,3 | 2687,5 | 3,4 | |
| Č67 | 53,12 | 101,81 | 432443 | 1141,2 | 719,3 | 1143,0 | 2689,9 | 3,3 | |
| ACO 11S FORTA 2x25 | | | | | | | | | |
| Č71 | 59,82 | 101,87 | 487561 | 1196,2 | X | X | 2453,4 | X | |
| Č72 | 59,78 | 101,91 | 487618 | 1197,5 | X | X | 2455,8 | X | |
| Č73 | 59,52 | 101,80 | 484449 | 1189,1 | X | X | 2454,5 | X | |
| Č74 | 60,24 | 101,67 | 489058 | 1196,0 | X | X | 2445,5 | X | |
| Č75 | 59,71 | 102,22 | 490014 | 1200,5 | X | X | 2449,9 | X | |
| Č76 | 58,91 | 103,17 | 492477 | 1199,4 | X | X | 2435,4 | X | |
| Č77 | 60,01 | 101,81 | 488534 | 1196,8 | X | X | 2449,8 | X | |
| Č78 | 59,98 | 101,97 | 489825 | 1195,3 | X | X | 2440,3 | X | |
| ACO 11S FORTA 2x75 | | | | | | | | | |

| | | | | | | | | | |
|-----|-------|--------|--------|---------|-------|--------|--------|-----|--------|
| Č81 | 54,51 | 103,12 | 455252 | 1192,1 | 747,4 | 1193,9 | 2666,4 | 2,4 | 2668,0 |
| Č82 | 55,99 | 101,79 | 455628 | 1186,4 | 742,6 | 1188,4 | 2657,8 | 2,8 | |
| Č83 | 55,31 | 102,28 | 454438 | 1196,3 | 751,0 | 1198,1 | 2672,2 | 2,2 | |
| Č84 | 55,69 | 101,84 | 453632 | 1191,4 | 747,3 | 1192,5 | 2672,6 | 2,2 | |
| Č85 | 55,44 | 101,73 | 450621 | 1187,6 | 745,6 | 1189,1 | 2674,3 | 2,2 | |
| Č86 | 55,94 | 101,84 | 455669 | 1193,2 | 748,9 | 1195,3 | 2669,4 | 2,3 | |
| Č87 | 55,82 | 101,79 | 454245 | 1193,6 | 747,6 | 1195,2 | 2663,2 | 2,6 | |
| Č88 | 58,63 | 101,82 | 477393 | vyřazen | | | | | |

Tab. 14 Rozměry Marshallovo zkušebních těles

| Deska | Tloušťka [mm] | | | | | | |
|--------------------|---------------|------|------|------|------|------|--------|
| | t1 | t2 | t3 | t4 | t5 | t6 | průměr |
| ACO 11 S A | 44,2 | 44,0 | 40,8 | 41,9 | 41,2 | 42,0 | 42,4 |
| ACO 11 S B | 43,7 | 42,7 | 44,0 | 44,6 | 42,5 | 41,9 | 43,2 |
| ACO 11 S PMB A | 44,9 | 43,0 | 41,5 | 43,2 | 44,3 | 42,4 | 43,2 |
| ACO 11 S PMB B | 45,5 | 41,7 | 41,9 | 44,8 | 43,3 | 45,1 | 43,7 |
| ACO 11 S NAMFLEX A | 42,3 | 42,6 | 41,6 | 43,9 | 41,8 | 40,8 | 42,2 |
| ACO 11 S NAMFLEX B | 43,6 | 43,4 | 41,4 | 44,1 | 41,4 | 41,1 | 42,5 |
| ACO 11 S FORTA A | 43,2 | 42,6 | 40,5 | 41,5 | 40,7 | 42,5 | 41,8 |
| ACO 11 S FORTA B | 41,8 | 41,7 | 42,9 | 42,4 | 41,3 | 41,1 | 41,9 |

Tab. 15 Rozměry desek

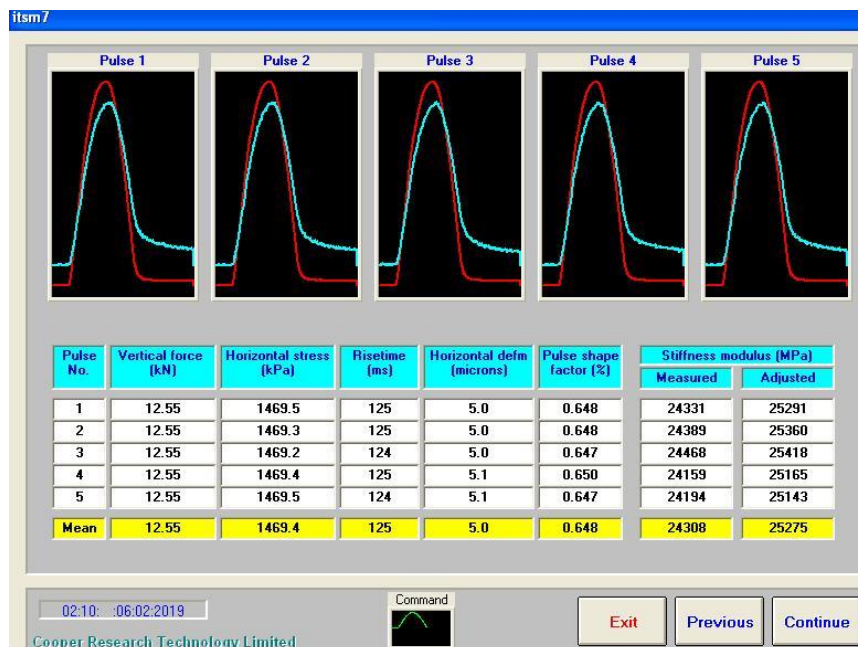
| Vzorek | Výška [mm] | Šířka [mm] | Tloušťka [mm] |
|----------------------------|------------|------------|---------------|
| ACO 11S normal 2x75 údery | | | |
| Č24a | 50,80 | 102,00 | 51,20 |
| Č24b | 47,50 | 101,40 | 50,90 |
| Č25a | 51,10 | 102,30 | 51,20 |
| Č25b | 47,70 | 101,80 | 51,20 |
| Č26a | 51,10 | 101,90 | 51,50 |
| Č26b | 47,20 | 101,30 | 51,10 |
| Č27a | 48,90 | 101,60 | 51,30 |
| Č27b | 49,47 | 101,80 | 51,40 |
| Č28a | 50,80 | 103,20 | 50,50 |
| Č28b | 48,80 | 102,80 | 50,40 |
| Č29a | 49,80 | 102,30 | 51,20 |
| Č29b | 48,60 | 102,10 | 51,10 |
| ACO 11S NAMFLEX 2x75 údery | | | |
| Č44a | 47,00 | 101,30 | 50,80 |
| Č44b | 50,80 | 101,90 | 50,40 |
| Č45a | 50,60 | 101,90 | 50,60 |
| Č45b | 47,70 | 101,50 | 50,90 |
| Č46a | 51,40 | 102,00 | 51,20 |
| Č46b | 47,30 | 101,60 | 51,20 |
| ACO 11S PMB 2x75 údery | | | |
| Č64a | 51,20 | 102,20 | 50,70 |
| Č64b | 47,60 | 101,80 | 50,60 |
| Č65a | 50,60 | 101,90 | 49,40 |
| Č65b | 47,60 | 101,30 | 49,50 |
| Č66a | 51,80 | 103,20 | 50,30 |
| Č66b | 47,90 | 102,70 | 49,40 |
| Č67a | 51,10 | 101,50 | 50,50 |
| Č67b | 47,30 | 101,20 | 50,20 |
| ACO 11S FORTA 2x25 | | | |
| Č84a | 47,40 | 101,40 | 49,10 |
| Č84b | 50,70 | 101,90 | 49,10 |
| Č85a | 50,80 | 101,80 | 47,80 |
| Č85b | 47,20 | 101,60 | 47,90 |
| Č86a | 46,90 | 101,40 | 48,90 |
| Č86b | 51,20 | 101,80 | 49,30 |
| Č87a | 50,90 | 101,90 | 49,50 |
| Č87b | 47,20 | 101,60 | 49,30 |

Tab. 16 Rozměry zkušebních vzorků pro zkoušku odolnosti vůči šíření trhlin

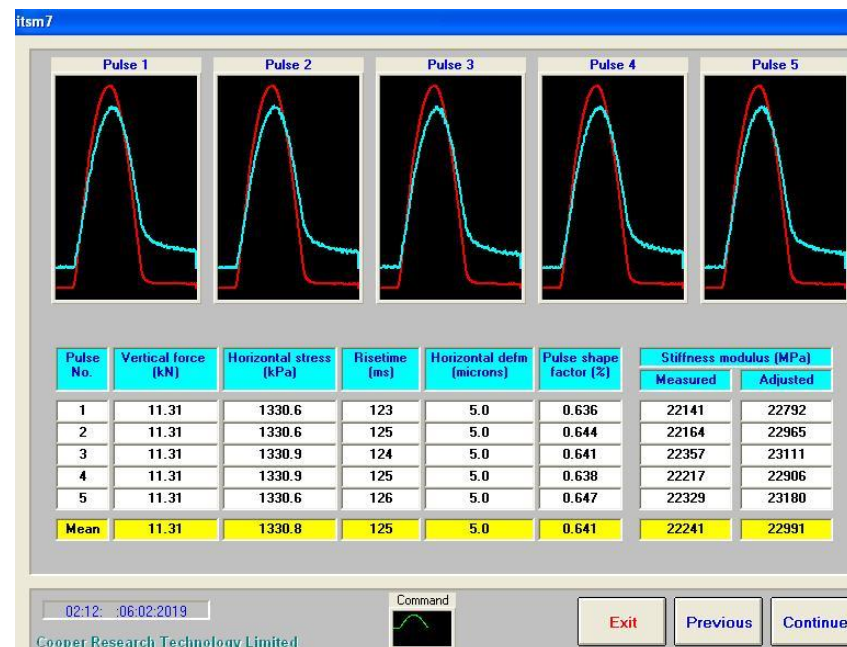
| Vz. | M na suchu [g] | ρ/ρ_{pbssd} [kg/m ³] | Průměrná ρ [kg/m ³] | Sk. | Vzorek | ρ/ρ_{pbssd} [kg/m ³] | Průměrná ρ [kg/m ³] | Odychlka [kg/m ³] | Síla [kN] | Deformace [mm] | Průměr [mm] | Výška [mm] | Pevnost v příčném tahu ITS [MPa] | Průměrná pevnost v příčném tahu [MPa] | ITSR [%] | Pozn. |
|----------------------------|----------------|---|--------------------------------------|-----|--------|---|--------------------------------------|-------------------------------|-----------|----------------|-------------|------------|----------------------------------|---------------------------------------|----------|---|
| ACO 11S normal 2x25 údery | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Č11 | 1143,3 | 2468,3 | 2471,4 | A | Č13 | 2490,4 | 2470,2 | 1,2 | 21,59 | 2,70 | 102,07 | 56,13 | 2,399 | 2,324 | 97,4 | Č18 vyřazeno z měření síla F příliš nízká oproti průměru |
| Č12 | 1140,8 | 2467,8 | | | Č14 | 2478,0 | | | 20,46 | 2,67 | 102,24 | 56,37 | 2,260 | | | |
| Č13 | 1143,8 | 2490,4 | | | Č16 | 2448,4 | | | 21,12 | 2,58 | 101,71 | 57,18 | 2,312 | | | |
| Č14 | 1146,8 | 2478,0 | | | Č18 | 2463,9 | | | 14,80 | 3,04 | 101,52 | 56,95 | 1,630 | | | |
| Č15 | 1141,6 | 2473,2 | | B | Č11 | 2468,3 | 2472,6 | -1,2 | 22,03 | 2,83 | 101,88 | 56,82 | 2,423 | 2,387 | | |
| Č16 | 1137,5 | 2448,4 | | | Č12 | 2467,8 | | | 19,89 | 2,91 | 102,02 | 56,55 | 2,195 | | | |
| Č17 | 1147,0 | 2481,2 | | | Č15 | 2473,2 | | | 21,53 | 3,09 | 101,55 | 56,99 | 2,368 | | | |
| Č18 | 1135,8 | 2463,9 | | | Č17 | 2481,2 | | | 23,25 | 2,56 | 101,85 | 56,74 | 2,561 | | | |
| ACO 11S NAMFLEX 2x25 údery | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Č31 | 1142,8 | 2454,3 | 2446,0 | A | Č31 | 2454,3 | 2447,7 | -1,7 | 17,09 | 2,35 | 101,71 | 57,31 | 1,867 | 1,916 | 79,0 | x |
| Č32 | 1144,8 | 2453,3 | | | Č33 | 2466,2 | | | 18,51 | 2,44 | 101,73 | 56,75 | 2,041 | | | |
| Č33 | 1137,6 | 2466,2 | | | Č36 | 2462,4 | | | 18,66 | 2,69 | 102,17 | 57,45 | 2,024 | | | |
| Č34 | 1142,5 | 2444,9 | | | Č38 | 2407,8 | | | 16,05 | 2,82 | 102,24 | 57,68 | 1,733 | | | |
| Č35 | 1150,6 | 2437,8 | | B | Č32 | 2453,3 | 2444,3 | 1,7 | 23,49 | 2,39 | 101,90 | 57,22 | 2,565 | 2,426 | | |
| Č36 | 1159,8 | 2462,4 | | | Č34 | 2444,9 | | | 21,60 | 2,91 | 101,83 | 57,38 | 2,353 | | | |
| Č37 | 1146,4 | 2441,3 | | | Č35 | 2437,8 | | | 23,04 | 2,46 | 101,78 | 58,01 | 2,484 | | | |
| Č38 | 1140,2 | 2407,8 | | | Č37 | 2441,3 | | | 21,11 | 2,98 | 102,31 | 57,12 | 2,300 | | | |
| ACO 11S PMB 2x25 údery | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Č51 | 1138,3 | 2448,8 | 2454,7 | A | Č52 | 2452,6 | 2453,8 | 0,9 | 20,89 | 3,01 | 101,86 | 57,21 | 2,282 | 2,127 | 85,7 | x |
| Č52 | 1143,4 | 2452,6 | | | Č53 | 2446,1 | | | 17,87 | 2,96 | 102,31 | 56,72 | 1,960 | | | |
| Č53 | 1140,6 | 2446,1 | | | Č56 | 2462,8 | | | 19,54 | 3,13 | 101,64 | 57,27 | 2,137 | | | |
| Č54 | 1142,8 | 2459,1 | | B | Č51 | 2448,8 | 2455,7 | -0,9 | 22,43 | 2,94 | 101,89 | 57,01 | 2,458 | 2,480 | | |
| Č55 | 1142,1 | 2459,1 | | | Č54 | 2459,1 | | | 22,50 | 2,78 | 101,86 | 57,03 | 2,466 | | | |
| Č56 | 1144,4 | 2462,8 | | | Č55 | 2459,1 | | | 22,94 | 2,47 | 101,89 | 56,96 | 2,516 | | | |
| ACO 11S FORTA 2x25 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Č71 | 1196,2 | 2453,4 | 2448,1 | A | Č72 | 2455,8 | 2446,7 | 1,4 | 20,27 | 2,92 | 101,91 | 59,78 | 2,118 | 2,053 | 83,2 | x |
| Č72 | 1197,5 | 2455,8 | | | Č74 | 2445,5 | | | 20,36 | 2,58 | 101,67 | 60,24 | 2,116 | | | |
| Č73 | 1189,1 | 2454,5 | | | Č75 | 2449,9 | | | 19,39 | 2,57 | 102,22 | 59,71 | 2,022 | | | |
| Č74 | 1196,0 | 2445,5 | | | Č76 | 2435,4 | | | 18,67 | 2,63 | 103,17 | 58,91 | 1,956 | | | |
| Č75 | 1200,5 | 2449,9 | | B | Č71 | 2453,4 | 2449,5 | -1,4 | 23,74 | 3,02 | 101,87 | 59,82 | 2,480 | 2,468 | | |
| Č76 | 1199,4 | 2435,4 | | | Č73 | 2454,5 | | | 24,86 | 2,62 | 101,80 | 59,52 | 2,612 | | | |
| Č77 | 1196,8 | 2449,8 | | | Č77 | 2449,8 | | | 22,51 | 2,32 | 101,81 | 60,01 | 2,346 | | | |
| Č78 | 1195,3 | 2440,3 | | | Č78 | 2440,3 | | | 23,39 | 2,44 | 101,97 | 59,98 | 2,435 | | | |

Tab. 17 Odolnost vůči vodě

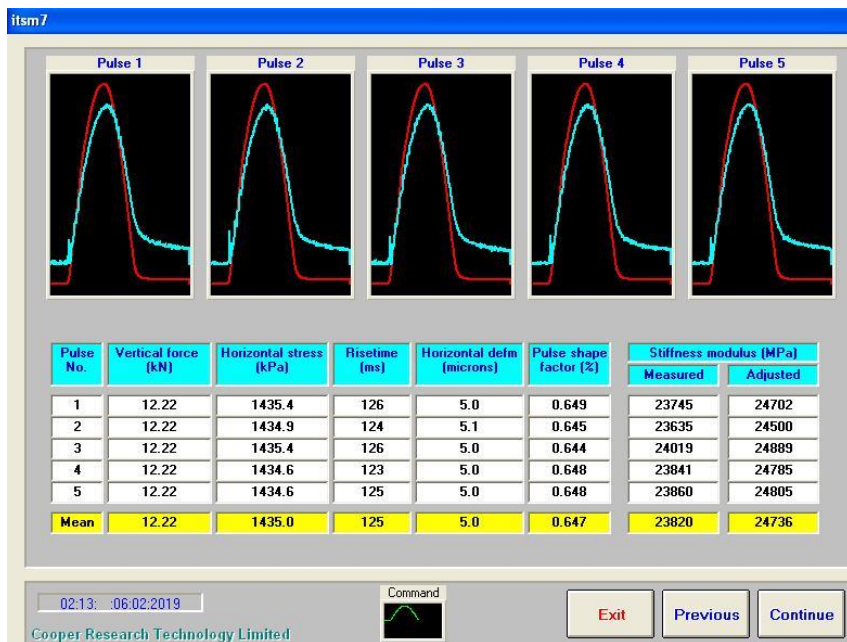
Příloha č. II: Vyhodnocení zkoušky modulu tuhosti



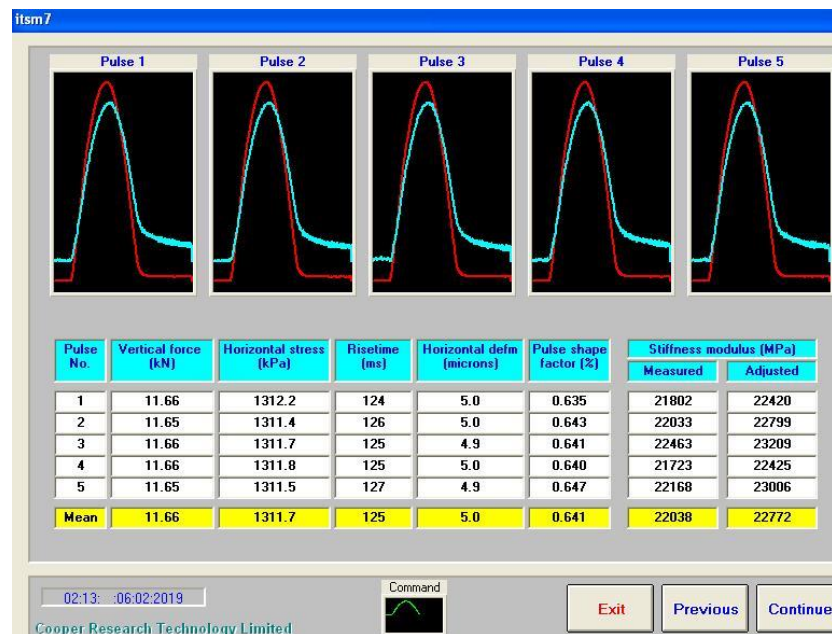
Obr. č. 28 Grafy a hodnoty naměřené při pěti zatěžovacích pulzech - Směs ACO 11S 2x75 při 0 °C



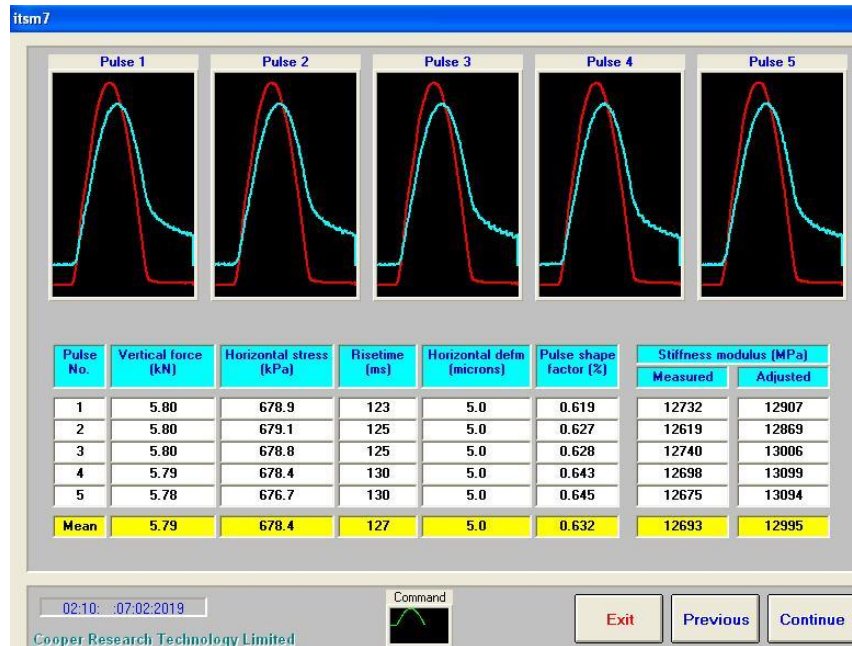
Obr. č. 29 Grafy a hodnoty naměřené při pěti zatěžovacích pulzech - Směs ACO 11S NAMFLEX 2x75 při 0 °C-



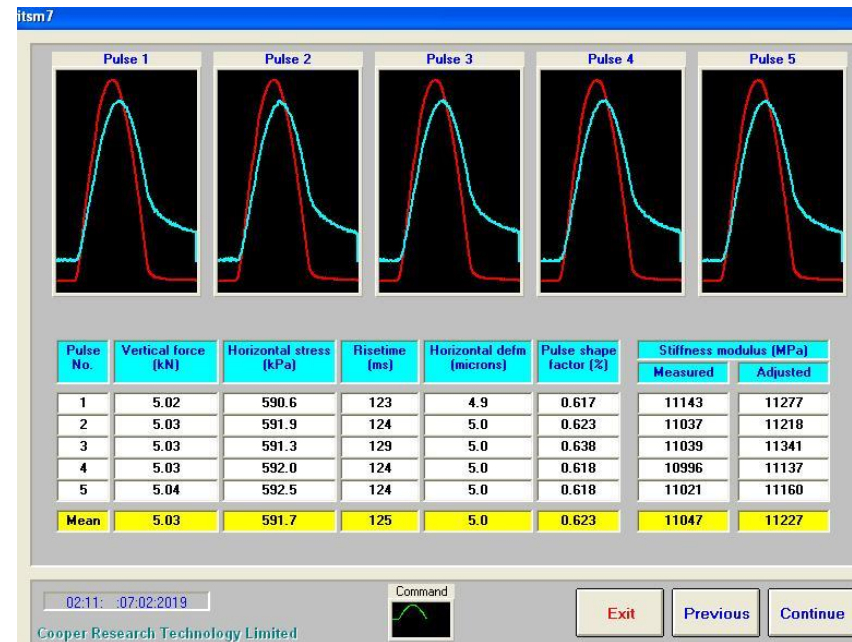
Obr. č. 30 Grafy a hodnoty naměřené při pěti zatěžovacích pulzech
- Směs ACO 11S PMB 2x75 při 0 °C-



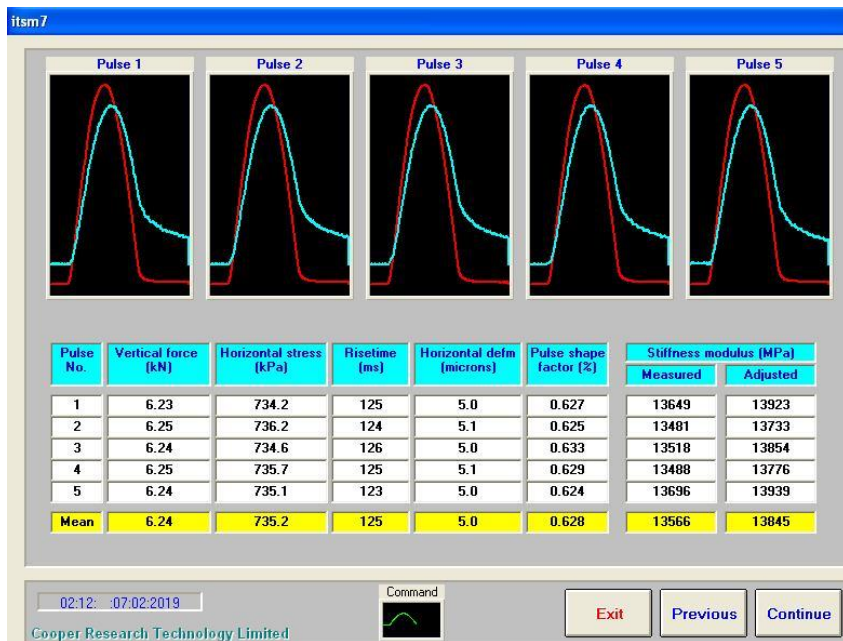
Obr. č. 31 Grafy a hodnoty naměřené při pěti zatěžovacích pulzech
- Směs ACO 11S FORTA 2x75 při 0 °C-



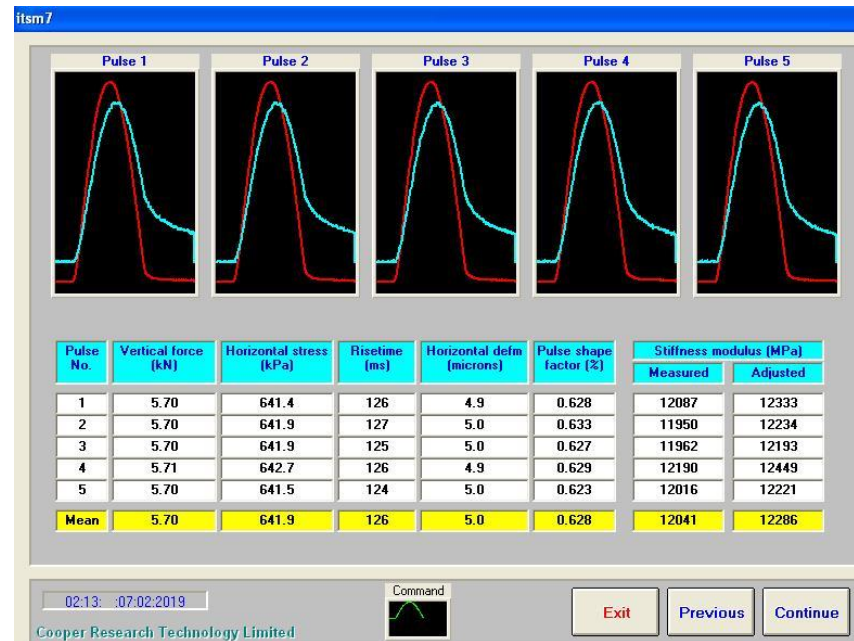
Obr. č. 32 Grafy a hodnoty naměřené při pěti zatěžovacích pulzech
- Směs ACO 11S 2x75 při 15 °C-



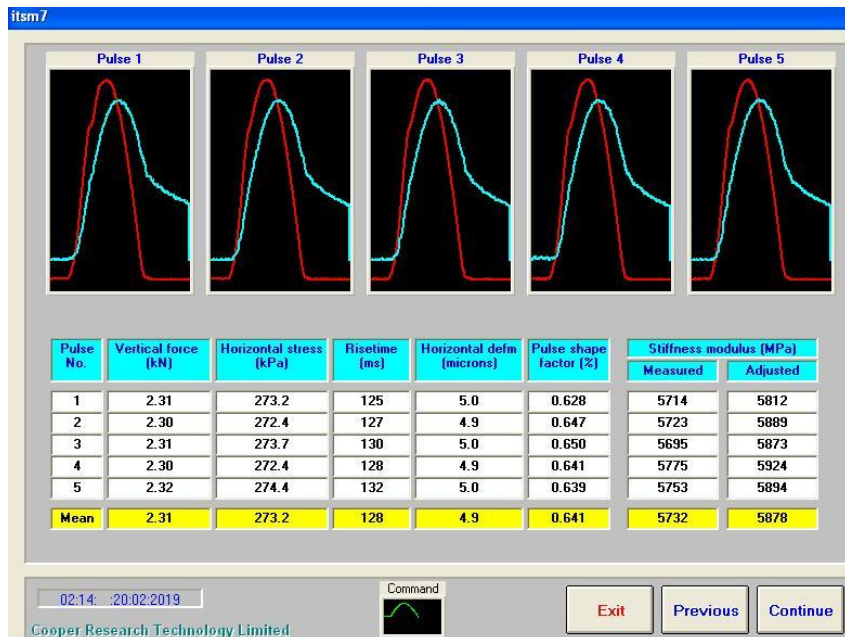
Obr. č. 33 Grafy a hodnoty naměřené při pěti zatěžovacích pulzech
- Směs ACO 11S NAMFLEX 2x75 při 15 °C-



Obr. č. 34 Grafy a hodnoty naměřené při pěti zatěžovacích pulzech
- Směs ACO 11S PMB 2x75 při 15 °C-



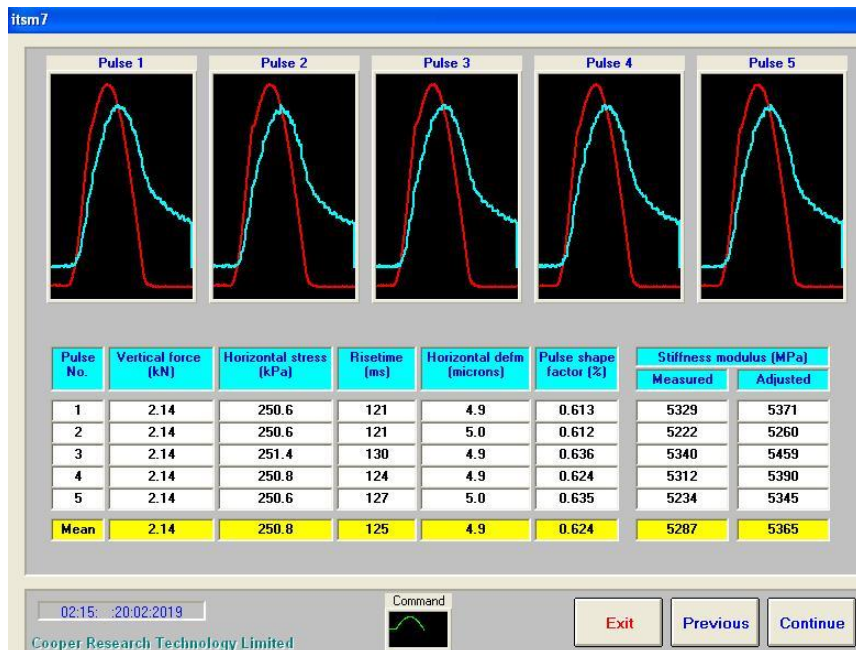
Obr. č. 35 Grafy a hodnoty naměřené při pěti zatěžovacích pulzech
- Směs ACO 11S FORTA 2x75 při 15 °C-



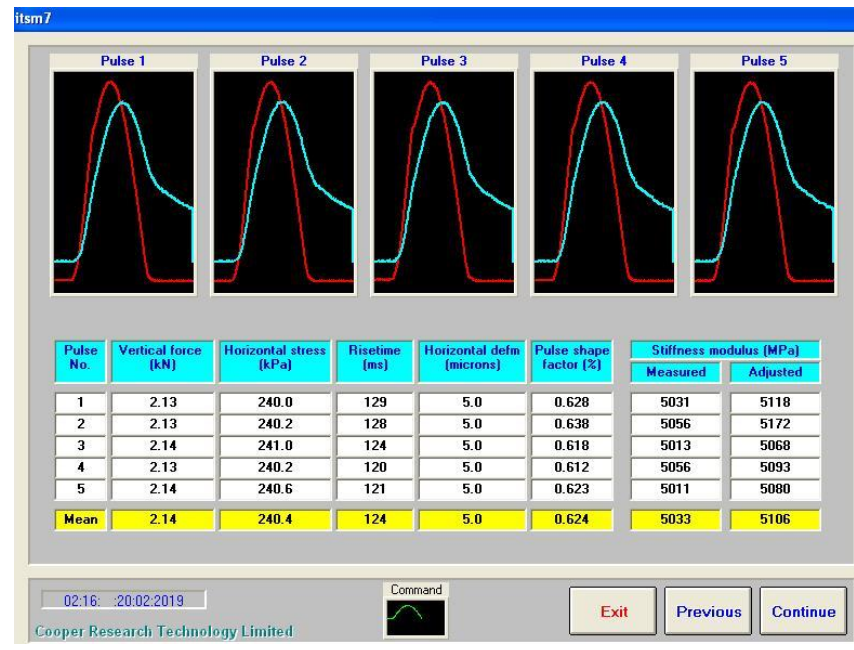
Obr. č. 36 Grafy a hodnoty naměřené při pěti zatěžovacích pulzech
- Směs ACO 11S 2x75 při 27 °C-



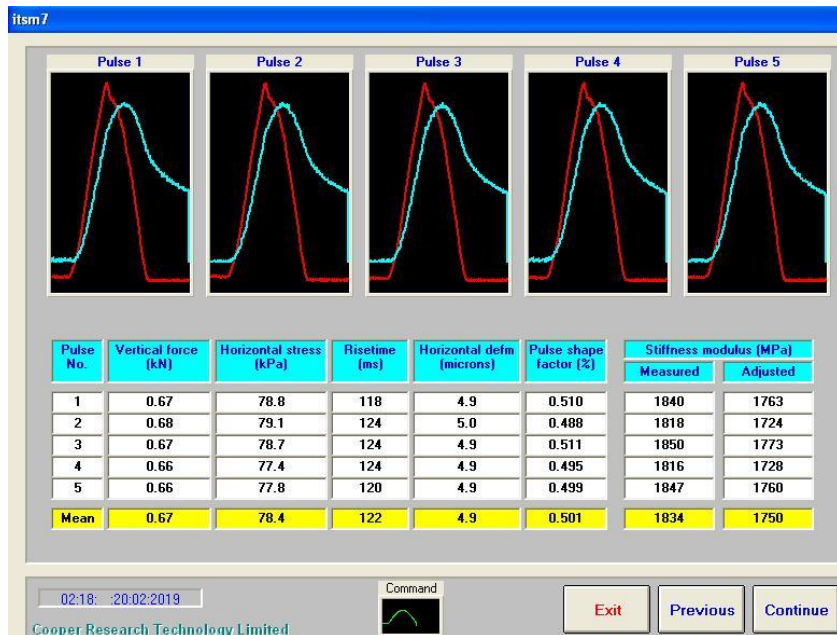
Obr. č. 37 Grafy a hodnoty naměřené při pěti zatěžovacích pulzech
- Směs ACO 11S NAMFLEX 2x75 při 27 °C-



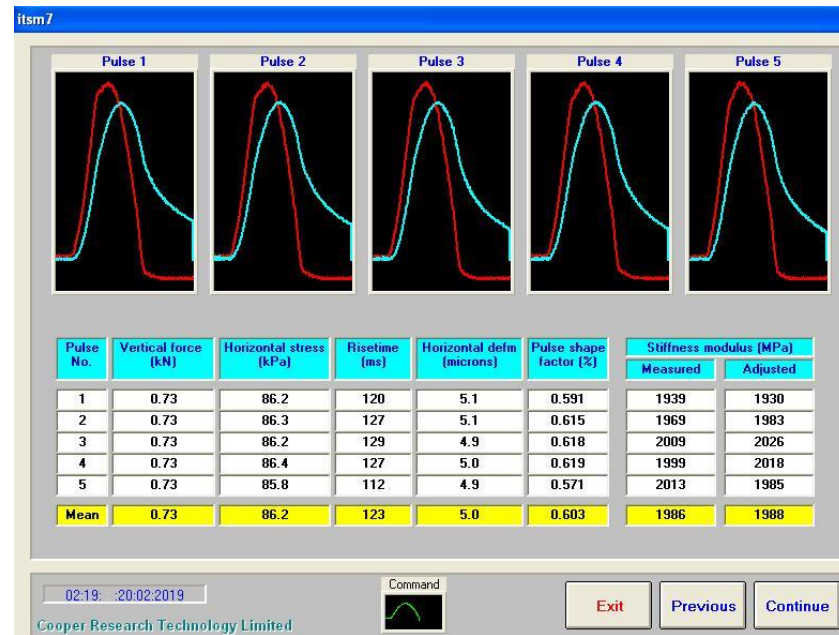
Obr. č. 38 Grafy a hodnoty naměřené při pěti zatěžovacích pulzech
- Směs ACO 11S PMB 2x75 při 27 °C-



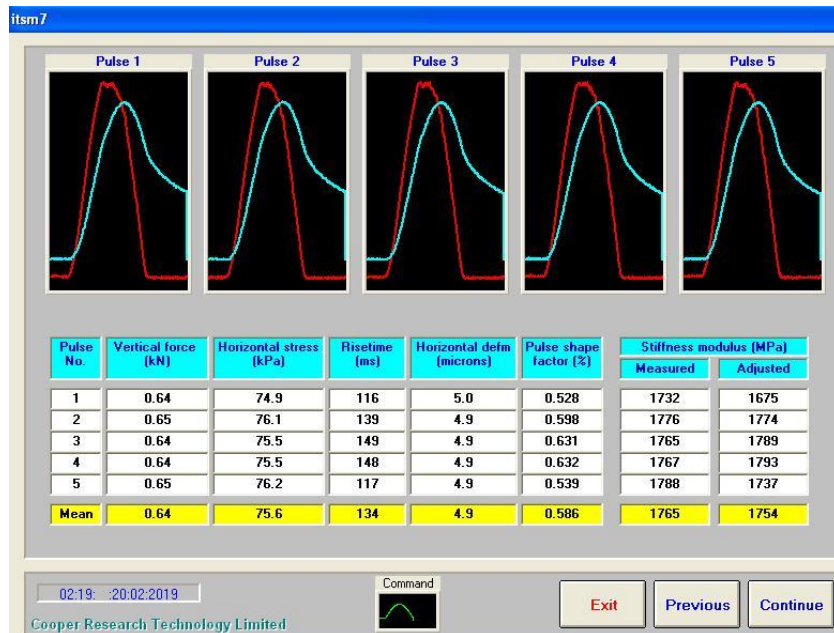
Obr. č. 39 Grafy a hodnoty naměřené při pěti zatěžovacích pulzech
- Směs ACO 11S FORTA 2x75 při 27 °C-



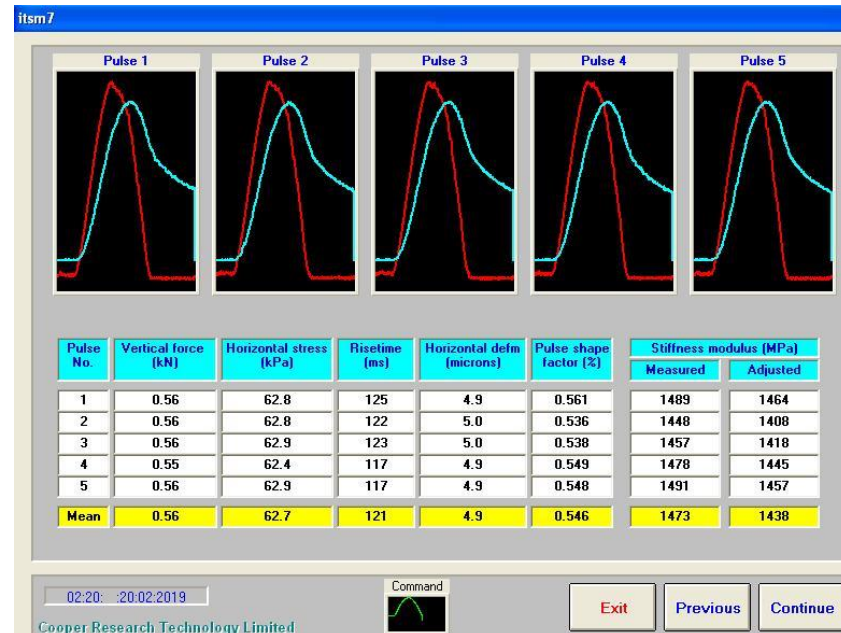
Obr. č. 40 Grafy a hodnoty naměřené při pěti zatěžovacích pulzech - Směs ACO 11S 2x75 při 40 °C-



Obr. č. 41 Grafy a hodnoty naměřené při pěti zatěžovacích pulzech - Směs ACO 11S NAMFLEX 2x75 při 40 °C-

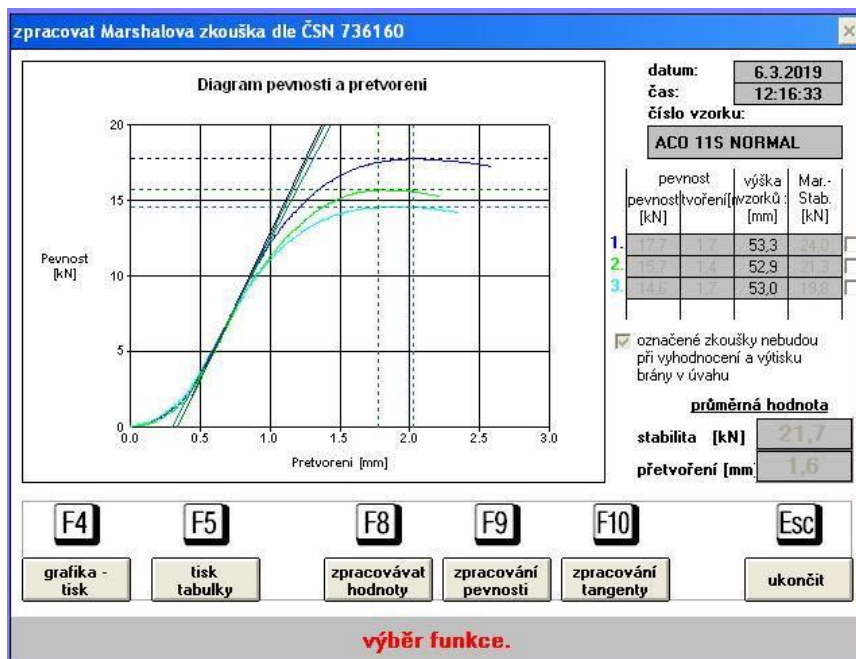


Obr. č. 42 Grafy a hodnoty naměřené při pěti zatěžovacích pulzech
- Směs ACO 11S PMB 2x75 při 40 °C-

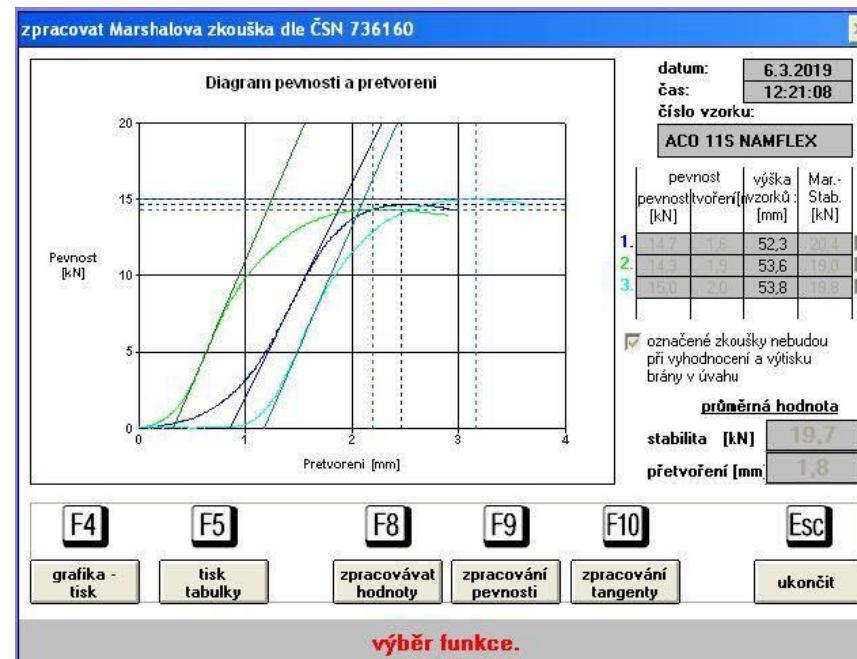


Obr. č. 43 Grafy a hodnoty naměřené při pěti zatěžovacích pulzech
- Směs ACO 11S FORTA 2x75 při 40 °C-

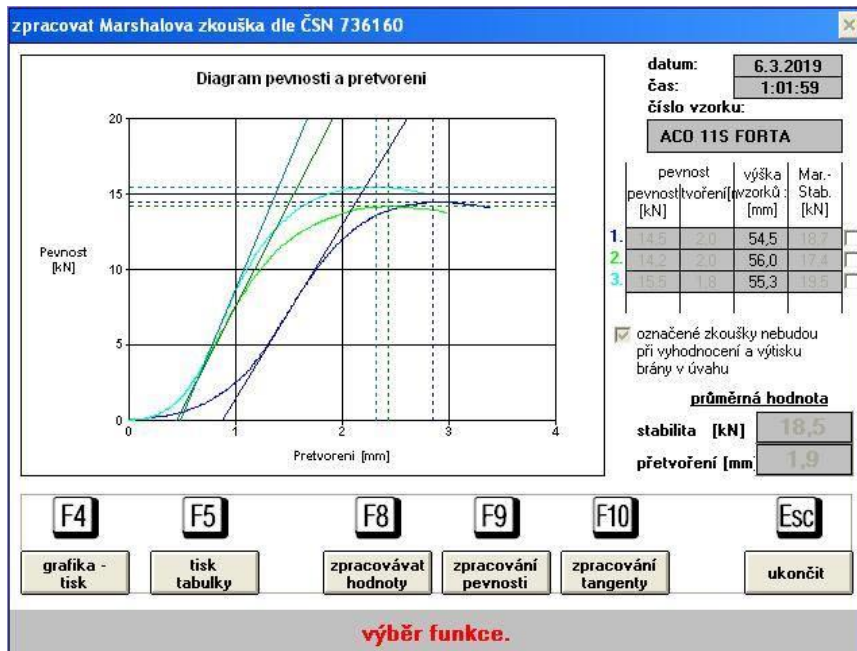
Příloha č. III: Vyhodnocení Marshallovy zkoušky



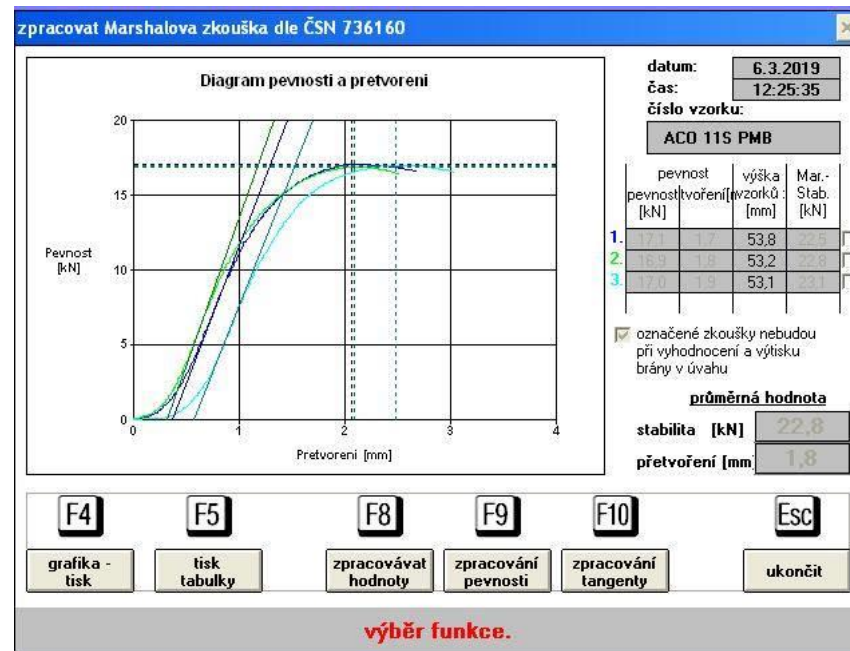
Obr. č. 44 Graf Marshallova zkouška
-Směs ACO 11S-



Obr. č. 45 Graf Marshallova zkouška
-Směs ACO 11S NAMFLEX-

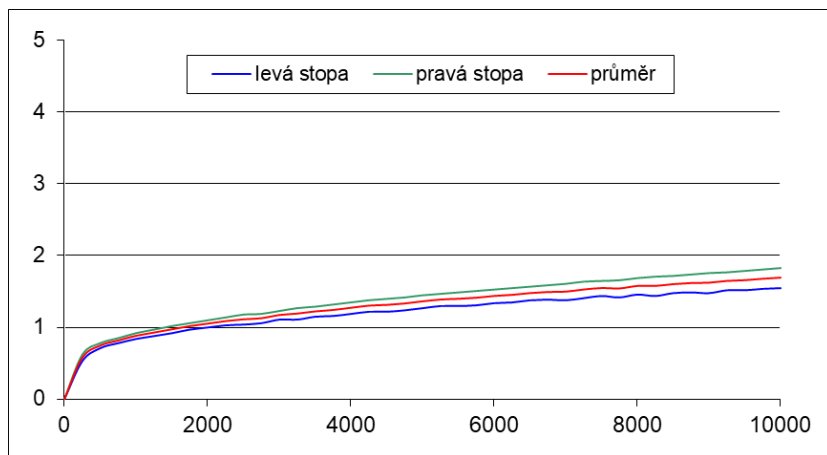


Obr. č. 46 Graf Marshallova zkouška
-Směs ACO 11S FORTA-

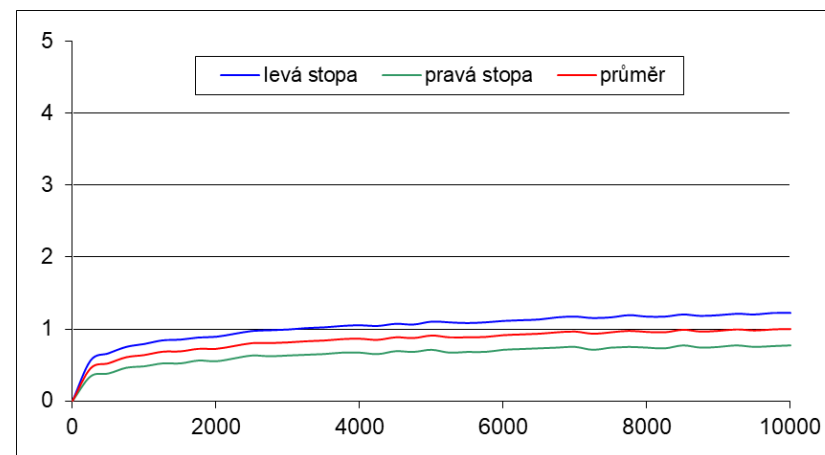


Obr. č. 47 Graf Marshallova zkouška
-Směs ACO 11S PMB-

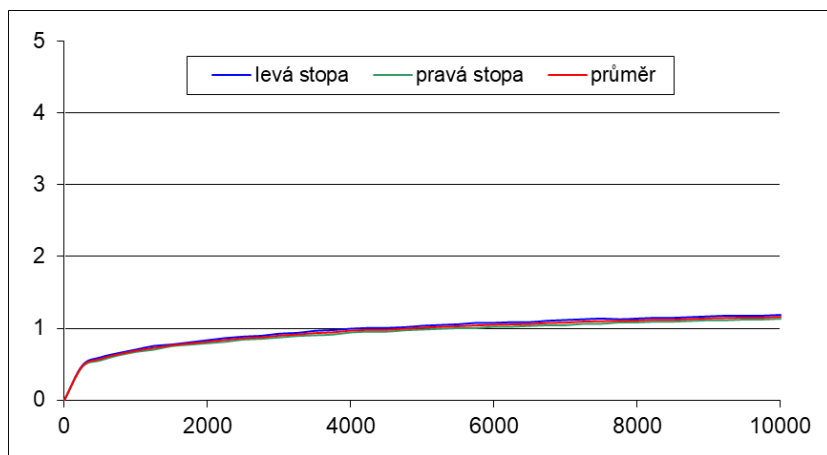
Příloha č. IV: Vyhodnocení zkoušky odolnosti vůči tvorbě trvalých deformací



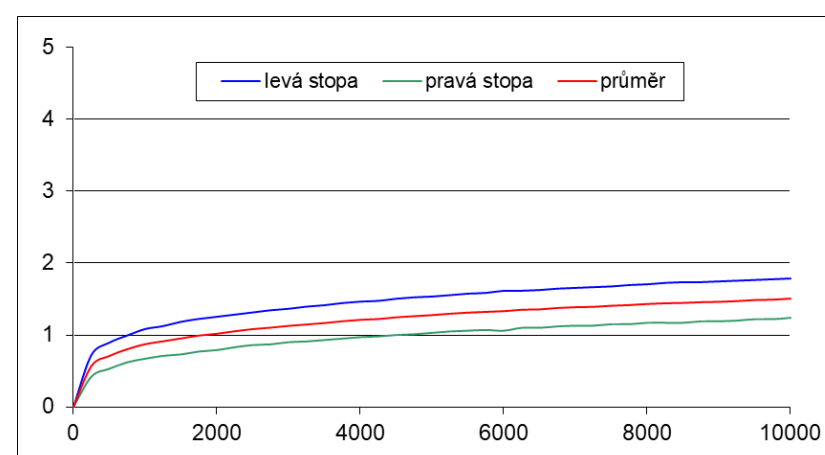
Obr. č. 48 Zkouška opakovaného poježdění kolem při teplotě 60 °C
-Směs ACO 11S-



Obr. č. 49 Zkouška opakovaného poježdění kolem při teplotě 60 °C
-Směs ACO 11S PMB-



Obr. č. 50 Zkouška opakovaného poježdění kolem při teplotě 60 °C
-Směs ACO 11S NAMFLEX-



Zkouška opakovaného poježdění kolem při teplotě 60 °C
-Směs ACO 11S FORTA-