



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV POZEMNÍCH KOMUNIKACÍ

INSTITUTE OF ROAD STRUCTURES

VYUŽITÍ TECHNOLOGIE PĚNOASFALTU

USAGE OF FOAM BITUMEN TECHNOLOGY

DIPLOMOVÁ PRÁCE

DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Ondřej Machel

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. PETR HÝZL, Ph.D.

BRNO 2019



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program	N3607 Stavební inženýrství
Typ studijního programu	Navazující magisterský studijní program s prezenční formou studia
Studijní obor	3607T009 Konstrukce a dopravní stavby
Pracoviště	Ústav pozemních komunikací

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student	Bc. Ondřej Machel
Název	Využití technologie pěnoasfaltu
Vedoucí práce	Ing. Petr Hýzl, Ph.D.
Datum zadání	31. 3. 2018
Datum odevzdání	11. 1. 2019

V Brně dne 31. 3. 2018

doc. Dr. Ing. Michal Varaus
Vedoucí ústavu

prof. Ing. Miroslav Bajer, CSc.
Děkan Fakulty stavební VUT

PODKLADY A LITERATURA

Specifikační a zkušební normy z oblasti asfaltových poživ

Normy řady ČSN EN 13108 Asfaltové směsi - Specifikace pro materiály

ČSN 73 6121 Stavba vozovek - Vrstvy z hutněných asfaltových směsí - Provádění a kontrola shody

Zkušební normy pro asfaltové směsi řady EN 12697

Firemní materiály

Internetové zdroje

ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

V diplomové práci bude věnována pozornost využití technologie pěnoasfaltu v asfaltových směsích. Budou stanovovány vybrané empirické a funkční parametry těchto typů asfaltových směsí.

STRUKTURA DIPLOMOVÉ PRÁCE

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

1. Textová část VŠKP zpracovaná podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (povinná součást VŠKP).
2. Přílohy textové části VŠKP zpracované podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (nepovinná součást VŠKP v případě, že přílohy nejsou součástí textové části VŠKP, ale textovou část doplňují).

Ing. Petr Hýzl, Ph.D.
Vedoucí diplomové práce

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá výrobou teplých asfaltových směsí s využitím technologie pěnoasfaltu. Práce je rozdělena na teoretickou a praktickou část. Teoretická část se zabývá základním dělením konstrukcí vozovek s detailnějším zaměřením na tzv. teplé asfaltové směsi. Cílem praktické části bylo zjistit, zda se při snižování pracovní teploty zachovávají funkční vlastnosti vyrobené asfaltové směsi. Byly vyrobeny dvě asfaltové směsi druhu ACO 11+ při pracovní teplotě 150 °C a snížené pracovní teplotě 130 °C. V rámci práce byly provedeny funkční zkoušky na vyrobených asfaltových směších a empirické a funkční zkoušky na extrahovaných asfaltových pojivech. V závěru práce jsou výsledky provedených zkoušek vzájemně porovnány.

KLÍČOVÁ SLOVA

Asfaltové pojivo, asfaltová směs, asfaltový beton, horká asfaltová směs, teplá asfaltová směs, organické přísady, chemické přísady, pěnoasfalt, empirické zkoušky, funkční zkoušky

ABSTRACT

The diploma thesis deals with the production of warm mix asphalts, using the foam bitumen technology. The thesis is divided into theoretical and practical part. The theoretical part is focused on the basic division of roadway constructions, particularly on warm mix asphalts. The aim of the practical part was to find out whether the produced asphalt mixture retains its functional properties when the operating temperature is reduced. For this purpose, two asphalt mixtures of the ACO 11+ type at operating temperature of 150 °C and reduced operating temperature of 130 °C were made. Functional tests and empirical and functional tests were carried out on the produced asphalt mixtures and the extracted bitumen binders respectively. In the conclusion of the thesis, the results of the tests are mutually compared.

KEYWORDS

Bitumen binder, asphalt mixtures, asphalt concrete, hot mix asphalt, warm mix asphalt, organic additives, chemical additives, foam bitumen, empirical tests, functional tests

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE VŠKP

Bc. Ondřej Machel *Využití technologie pěnoasfaltu*. Brno, 2019. 93 s., 41 s. příl.
Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav pozemních komunikací. Vedoucí práce Ing. Petr Hýzl, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ O SHODĚ LISTINNÉ A ELEKTRONICKÉ FORMY ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že elektronická forma odevzdané diplomové práce s názvem *Využití technologie pěnoasfaltu* je shodná s odevzdanou listinnou formou.

V Brně dne 11. 1. 2019

Bc. Ondřej Machel
autor práce

PROHLÁŠENÍ O PŮVODNOSTI ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci s názvem *Využití technologie pěnoasfaltu* zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 11. 1. 2019

Bc. Ondřej Machel
autor práce

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval svému vedoucímu diplomové práce Ing. Petru Hýzlovi, Ph.D. za ochotu a odborné vedení, bez které by tato práce nevznikla. Mé poděkování také patří společnosti COLAS CZ, a.s. za výrobu asfaltových směsí, které byly v rámci této práce testovány. Dále bych chtěl poděkovat Pavlovi Strakovi a Ing. Ondřeji Daškovi, Ph.D. za pomoc při provádění laboratorních zkoušek. V neposlední řadě bych chtěl poděkovat všem, kteří mě podporovali během celého mého studia.

OBSAH

1. Úvod	10
2. Teoretická část.....	11
2.1. Konstrukce vozovky.....	11
2.2. Netuhé vozovky	12
2.2.1. Asfaltová pojiva.....	12
2.2.2. Asfaltové směsi.....	13
2.3. Pracovní teploty při výrobě asfaltových směsí	15
2.3.1. Studené asfaltové směsi	16
2.3.2. Poloteplé asfaltové směsi.....	16
2.3.3. Teplé asfaltové směsi.....	16
2.3.4. Horké asfaltové směsi	20
2.4. Technologie pěnoasfaltu – přímá metoda	20
2.4.1. Zpěnění asfaltového pojiva.....	20
2.4.2. Míchání teplé asfaltové směsi.....	21
2.4.3. Vlastnosti asfaltové pěny	22
2.5. Zkušenosti s teplou asfaltovou směsí v zahraničí	25
2.5.1. Německo	26
2.5.2. Norsko.....	26
2.5.3. Francie	27
2.5.4. Dánsko	27
2.5.5. USA	28
2.5.6. Indie	29
2.5.7. Čína.....	29
2.5.8. Jihoafrická republika.....	29
2.6. Zkušenosti s teplou asfaltovou směsí v České republice	30
2.6.1. Teplé asfaltové směsi.....	30
2.6.2. Technologie pěnoasfaltu	30
2.6.3. Stavby v České republice.....	31
3. Cíl práce.....	33
4. Praktická část.....	34
4.1. Použité materiály.....	34
4.1.1. Kamenivo.....	34
4.1.2. Asfaltové pojivo.....	35
4.2. Výroba asfaltové směsi	35
4.3. Příprava zkušebních těles	39

4.3.1.	Příprava těles rázovým zhutňovačem dle ČSN EN 12697-30+A1.....	39
4.3.2.	Příprava těles zhutňovačem desek dle ČSN EN 12697-33+A1.....	41
4.4.	Extrakce asfaltového pojiva dle ČSN EN 12697-3.....	43
4.5.	Příprava vzorků pro zkoušky asfaltového pojiva	44
4.6.	Zkoušky asfaltové směsi	46
4.6.1.	Posouzení nízkoteplotních vlastností s rovnoměrným řízeným poklesem teploty – TSRST dle ČSN EN 12697-46.....	46
4.6.2.	Stanovení modulu tuhosti asfaltové směsi dle ČSN EN 12697-26	48
4.6.3.	Stanovení odolnosti proti trvalým deformacím – zkouška pojíždění kolem dle ČSN EN 12697-22+A1.....	51
4.6.4.	Stanovení odolnosti proti trvalým deformacím – cyklická zkouška v tlaku v triaxiálním přístroji dle ČSN EN 12697-25.....	52
4.7.	Zkoušky asfaltového pojiva	55
4.7.1.	Stanovení penetrace jehlou dle ČSN EN 1426	55
4.7.2.	Stanovení bodu měknutí metodou kroužek a kulička dle ČSN EN 1427. 56	
4.7.3.	Stanovení komplexního modulu ve smyku a fázového úhlu dle ČSN EN 14770	58
4.8.	Výsledky zkoušek	62
4.8.1.	Vyrobené vzorky pro provádění zkoušek	62
4.8.2.	Posouzení nízkoteplotních vlastností dle ČSN EN 12697-46	64
4.8.3.	Stanovení modulů tuhosti dle ČSN EN 12697-26.....	67
4.8.4.	Odolnost proti trvalým deformacím – zkouška pojíždění kolem dle ČSN EN 12697-22+A1	75
4.8.5.	Odolnost proti trvalým deformacím – cyklická zkouška v tlaku v triaxiálním přístroji dle ČSN EN 12697-25.....	77
4.8.6.	Stanovení penetrace jehlou dle ČSN EN 1426 a bodu měknutí asfaltového pojiva dle ČSN EN 1427	78
4.8.7.	Stanovení komplexního modulu ve smyku a fázového úhlu dle ČSN EN 14770	80
5.	Závěr.....	85
6.	Seznam použité literatury	86
7.	Seznam grafů	90
8.	Seznam obrázků.....	91
9.	Seznam tabulek.....	92
10.	Seznam rovnic	93
11.	Seznam příloh.....	93

1. ÚVOD

Silniční doprava se díky svým výhodám řadí mezi nejžádanější druhy dopravy, což vede ke stále rychlejšímu nárůstu tohoto druhu dopravy. Tento proces má za následek postupné rozšiřování silniční sítě. Na území Evropy se nachází více než 5 milionů kilometrů vozovek, z toho více než 55 tisíc kilometrů tvoří silnice a dálnice na území České republiky. [1] [2]

Většina vozovek (dle European Asphalt Pavement Association se jedná o více než 90 % [1]) je tzv. netuhých, čímž jsou myšleny vozovky s asfaltovým krytem. Asfaltové směsi využívané pro výstavbu těchto vozovek jsou vyráběny na obalovnách, přičemž je potřebné dosáhnout při výrobě vysokých teplot, aby došlo k dokonalému obalení směsi kameniva asfaltovým pojivem. Výroba při vysokých teplotách má za následek velké provozní náklady a vznik skleníkových plynů, které mají negativní vliv na životní prostředí. V dnešní době, kdy neustále rostou nároky na ochranu životního prostředí, vznikají snahy co nejvíce eliminovat vypouštění škodlivých látek do ovzduší.

Jedna z možností, jak tohoto cíle dosáhnout, je snížení pracovní teploty při výrobě asfaltové směsi. Existují různé metody, jak dosáhnout snížení pracovní teploty, a tedy vyrobit tzv. teplou asfaltovou směs, aniž by došlo ke snížení funkčních vlastností vyráběné směsi. Jedna z těchto metod je technologie pěnoasfaltu, kdy je do horkého asfaltového pojiva přidáno malé množství vody, což vede ke zpěnění pojiva a možnosti vyrábět asfaltovou směs při nižších pracovních teplotách.

V současné době není v České republice věnováno této technologii příliš mnoho pozornosti. V rámci své diplomové práce se chci zaměřit na problematiku využití této technologie při výrobě asfaltové směsi používané do obrusné vrstvy vozovek.

2. TEORETICKÁ ČÁST

Cílem teoretické části diplomové práce je seznámit čtenáře s technologiemi umožňujícími snížit pracovní teplotu a vyrobit tzv. teplé asfaltové směsi, s konkrétním zaměřením na využití technologie pěnoasfaltu. Začátek této kapitoly se zabývá základním rozdělením konstrukcí vozovek na tuhé a netuhé vozovky a dále základním popisem asfaltových pojiv a asfaltových směsí. Dále se kapitola zaměřuje na dělení asfaltových směsí podle teploty výroby a detailně rozebírá možnosti výroby teplé asfaltové směsi, přičemž hlavní pozornost je věnována výrobě s využitím technologie pěnoasfaltu. Závěr kapitoly je věnován využití této technologie v České republice a zahraničí.

2.1. Konstrukce vozovky

Aby pozemní komunikace byla funkční z hlediska únosnosti, trvanlivosti a provozní způsobilosti, je nutné při projektování věnovat dostatečnou pozornost návrhu konstrukce vozovky. Při návrhu konstrukce vozovky je nutné vycházet z dopravního zatížení a jeho nárustu, návrhové úrovně porušení, délce návrhového období, vlastností podloží a klimatických podmínek. Pro navržení správné konstrukce je vhodné postupovat dle katalogu TP 170 – Navrhování vozovek pozemních komunikací, který uvádí doporučené konstrukce dle výše uvedených kritérií. Pro snadnější návrh je také možné využít počítačový program LayEps, který provádí výpočty dle výše uvedených technických podmínek. [3]

Samotná konstrukce vozovky se skládá z jednotlivých konstrukčních vrstev, což jsou vrstvy vyrobené z jednoho druhu stavební směsi nebo z různých materiálů jedním technologickým postupem. Konstrukční vrstvy dělíme na nestmelené, které jsou soudržné díky vnitřnímu tření mezi jednotlivými zrny kameniva, a stmelené, které jsou soudržné díky použití vhodného pojiva (jedná se o pojiva na bázi asfaltu nebo hydraulická pojiva, což je například cement).

Konstrukční vrstvy řadíme do dvou skupin podle umístění v konstrukci vozovky a účelu vrstvy. Horní část konstrukce vozovky označujeme jako kryt vozovky, který je určený k přímému poježdění vozidly. Kryt vozovky se skládá z obrusné a ložní vrstvy. Spodní část konstrukce označujeme jako podkladní vrstvu, která slouží k roznášení zatížení od vozidel z krytu do podloží. Na základě typu krytu vozovky rozlišujeme dva základní typy vozovek, tedy tuhou a netuhou vozovku.

Tuhá vozovka je vozovka s cementobetonovým krytem. Jedná se o konstrukci, která dosahuje vysoké pevnosti a vysokého modulu pružnosti, používá se tedy na komunikace s vysokou intenzitou dopravy (např. dálnice). Tyto vrstvy musí být kvůli teplotním změnám opatřeny dilatačními spárami.

Netuhá vozovka je vozovka s asfaltovým, dlážděným nebo nestmeleným krytem. Na rozdíl od tuhé vozovky dosahuje relativně nízkého modulu pružnosti, nicméně určité druhy asfaltových směsí mohou být použity také na komunikace s vysokou intenzitou dopravy (směs druhu SMA). Při zatížení vozidly se tato vozovka chová pružně, ovšem při vysokých teplotách má tato vozovka schopnost se plasticky přetvářet, není tedy nutné vrstvu opatřovat dilatačními spárami.

Mezi tuhou a netuhou vozovkou můžeme rozlišovat také tzv. polotuhou vozovku, což je vozovka s asfaltovým krytem a stmelenou podkladní vrstvou. Problémem této

vozovky je možný vznik reflexních trhlin v podkladní vrstvě, které se následně mohou prokopírovat až na povrch vozovky.

2.2. Netuhé vozovky

V rámci své diplomové práce jsem se zabýval testováním asfaltové směsi pro ohrubnou vrstvu, zaměřil jsem se tedy detailněji na netuhé vozovky tvořené krytem stmeleným asfaltovým pojivem.

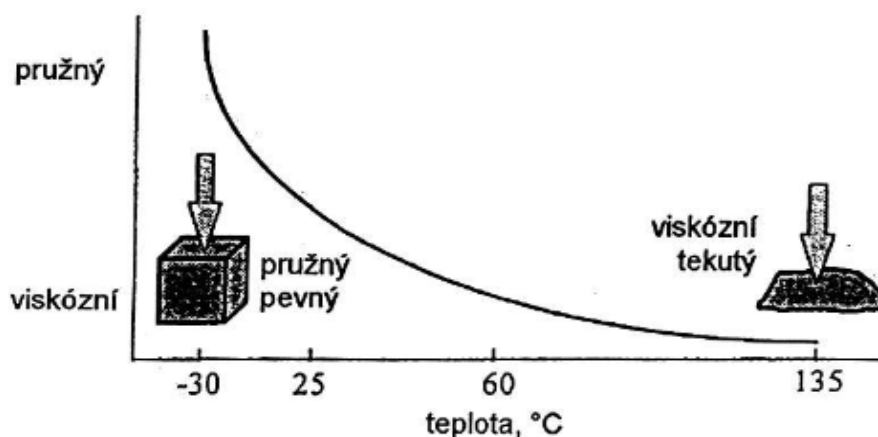


Obrázek 1: Pokládka ohrubné vrstvy netuhé vozovky [4]

2.2.1. Asfaltová pojiva

Asfaltové pojivo se řadí mezi základní typy pojiv využívané v silničním stavitelství. Využívá se při výrobě asfaltových směsí nebo například při výrobě tzv. prolévaných vrstev, kdy se položená kostra kameniva prolíje pojivem a tím se stmelí (mezi vrstvy prolévané pojivem na bázi asfaltu řadíme např. penetrační makadam). Jedná se o směs vysoce molekulárních uhlovodíků, ve které je zastoupeno vysoké množství organických sloučenin. Asfaltová pojiva se skládají z tekutých složek, tzv. malténů, a pevných složek, tzv. asfalténů. Co se týká původu, dělíme asfalty na přírodní, které se nacházejí v přírodních ložiscích, a ropné, které vznikají při destilaci surové ropy.

Mezi základní charakteristiky řadíme visko-elastické chování asfaltových pojiv, které se mění se změnou teploty. Při nízkých teplotách se pojivo chová pružně a pevně, zatímco při zvyšující se teplotě nabývají jeho viskózní vlastnosti. Z tohoto důvodu zjišťujeme u asfaltů tzv. obor použitelnosti, což je teplotní rozsah mezi teplotou bodu lámavosti a teplotou bodu měknutí, které nám vymezují použitelnost asfaltu v daných klimatických podmínkách.



Graf 1: Visko-elastické chování asfaltu [5]

Rozlišujeme různé druhy asfaltových pojiv, jako například silniční asfalty (např. gradace 50/70), asfalty modifikované polymery (jedná se o asfalty, které mají lepší přilnavost ke kamenivu, menší teplotní citlivost, větší odolnost vůči trvalým deformacím), tvrdé silniční asfalty, multigrádové asfalty apod.

Speciálním druhem je tzv. asfaltová emulze, což je disperze částic asfaltu ve vodě stabilizována vhodným emulgátorem. Emulze mají nižší viskozitu a dá se s nimi pracovat při nižších teplotách. Využívají se např. při provádění postřiků a nátěrů nebo při provádění emulzních kalových zákrytů.

Hlavní výhody asfaltových pojiv jsou snadná výroba a pokládka směsí, okamžitá použitelnost po vychladnutí, snadná údržba a možnost recyklace po opětovném zahřátí. Nevýhodou je visko-elastické chování, které způsobuje náchylnost k trvalým deformacím při vysokých teplotách a vznik trhlin za nízkých teplotách.

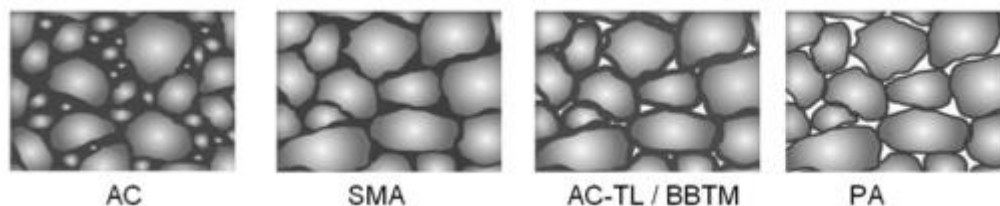
2.2.2. Asfaltové směsi

Vzhledem k výše uvedeným výhodám asfaltových pojiv jsou nejrozšířenějším typem konstrukčních vrstev, které se používají do krytu vozovky, asfaltové vrstvy tvořené zhutněnou asfaltovou směsí. Jedná se o směs tvořenou kamenivem, které je za vysoké teploty obaleno asfaltovým pojivem. Během výroby se mohou přidávat další přísady, které zlepšují vlastnosti asfaltové směsi.

Výroba probíhá v tzv. obalovnách, odkud je směs po obalení odvážena pomocí nákladních aut na stavbu, kde je pokládána a hutněna pomocí finišerů a válců. Rozlišujeme dva typy obaloven, a to šaržové, které se využívají v ČR, a kontinuální, které se využívají zejména v USA.

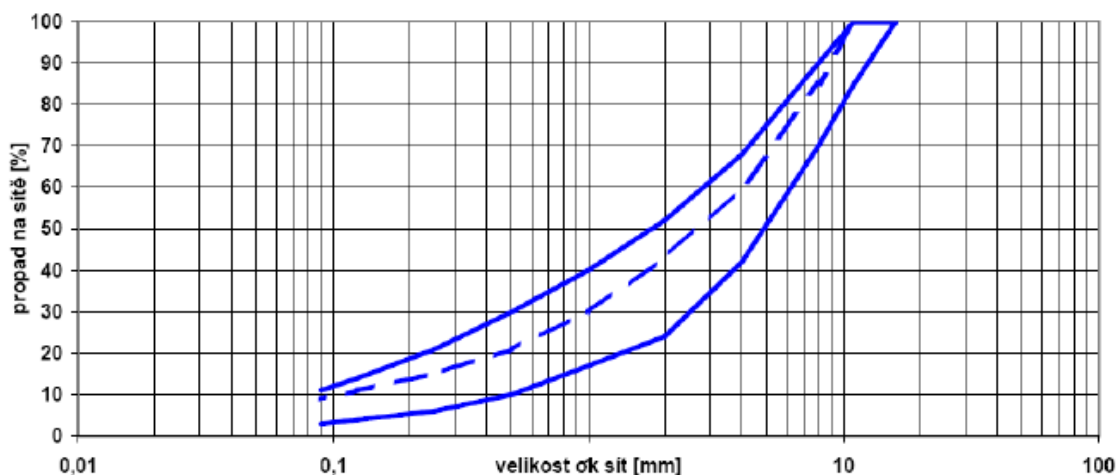
Rozlišujeme různé druhy asfaltových směsí:

- Asfaltový beton (AC),
- Asfaltový koberec mastixový (SMA),
- Asfaltový koberec drenážní (PA)
- Asfaltový beton pro velmi tenké vrstvy (BBTM)
- Lítý asfalt (MA).



Obrázek 2: Rozdíl mezi strukturami jednotlivých asfaltových směsí [1]

V rámci své diplomové práce jsem testoval asfaltovou směs druhu asfaltový beton (AC). Jedná se o nejpoužívanější asfaltovou směs, která se používá u netuhých vozovek. Základní charakteristikou této směsi je plynulá čára zrnitosti, která nám vyjadřuje rovnoměrné zastoupení všech zrn (tím se odlišuje od směsi SMA, ve které mají převažující zastoupení výhradně větší frakce kameniva, což vede k čáře zrnitosti, která je zalomená). Jako pojivo se u této směsi používá klasický silniční asfalt nebo asfalt modifikovaný polymery.



Graf 2: Čára zrnitosti směsi ACO 11 [5]

Podle použití v konkrétní konstrukční vrstvě rozlišujeme 3 druhy asfaltového betonu:

- ACO – asfaltový beton pro obrusné vrstvy,
- ACL – asfaltový beton pro ložní vrstvy,
- ACP – asfaltový beton pro podkladní vrstvy.

Asfaltový beton se vyznačuje spíše uzavřenou texturou povrchu a mezerovitostí v rozmezí 2,5 – 4,5 % u obrusných vrstev, 4 – 6 % u ložních vrstev a 5 – 7 % u podkladních vrstev. Asfaltový beton popisuje norma ČSN EN 13108-1 Asfaltové směsi – Specifikace pro materiály – Část 1: Asfaltový beton. [6]

Co se týká využití asfaltového betonu do pozemních komunikací, TP 170 navrhuje směs druhu AC do komunikací o všech dopravních zatížení. Konkrétně asfaltový beton pro obrusné vrstvy ACO je navrhován do komunikací o třídě dopravního zatížení III až

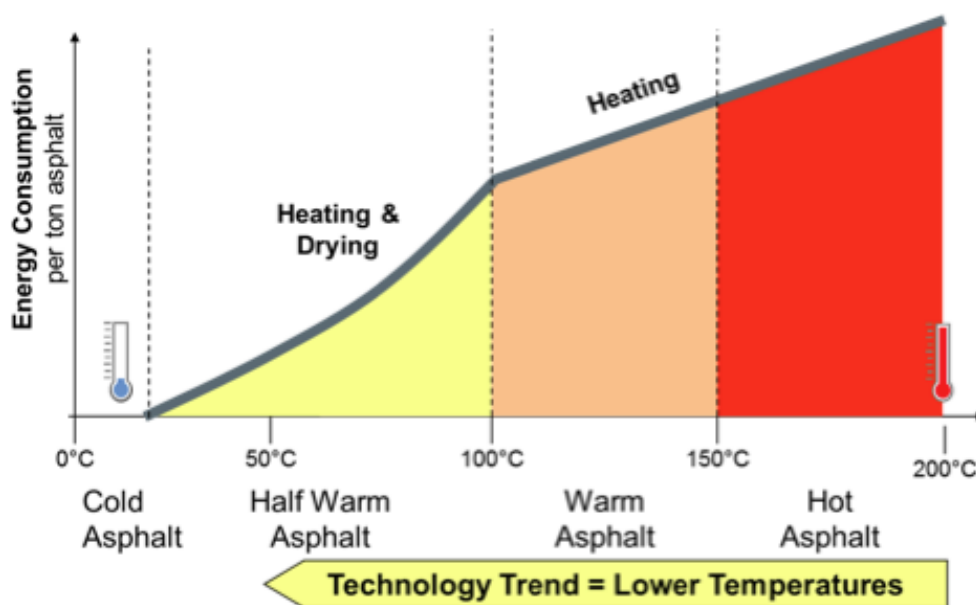
VI pro návrhovou úroveň porušení D1 a do komunikací o třídě dopravního zatížení V, VI, O a CH pro návrhovou úroveň porušení D2. [3]

Dle údajů European Asphalt Pavement Association (EAPA) z roku 2016 vyrobila Česká republika ve svých obalovnách 6,7 miliónů tun horkých a teplých asfaltových směsí. Z tohoto množství tvoří asfaltový beton pro obrusné vrstvy ACO 48,6 % (pro srovnání: směs druhu SMA tvoří 6,2 % a směs druhu BBTM pouze 0,4 %). [1]

2.3. Pracovní teploty při výrobě asfaltových směsí

Kromě výše uvedených dělení můžeme asfaltové směsi také rozdělit na základě pracovní teploty, při které jsou tyto směsi míchány. V silničním stavitelství je velká snaha pracovní teplotu snižovat, a to jak z důvodů ekonomických, tak z důvodů ekologických (při menších pracovních teplotách dochází k menší produkci CO₂).

Jako ekonomický důvod se má na mysli spotřeba energie. Při vyšších teplotách dochází k větší spotřebě energie, a tím i větší finanční náročnosti výroby dané směsi. Proto existuje snaha dosáhnout různými technologickými postupy nižší pracovní teploty. Z následujícího grafu je patrné, jak s rostoucí teplotou narůstá i spotřeba energie.



Graf 3: Závislost pracovní teploty na energetickou náročnost asfaltových směsí [1]

Při snižování pracovních teplot však musí být neustále zajištěno dostatečné ztekucení asfaltového pojiva, aby došlo k dostatečnému obalení kameniva výsledné asfaltové směsí, a zároveň aby při pokládce byla směs dostatečně zhutnitelná. Další podmínkou je zachování požadovaných funkčních vlastností směsi vyráběné za nižších pracovních teplot.

Asfaltové směsi můžeme dle použité pracovní teploty rozdělit do následujících kategorií [1]:

- Studená asfaltová směs – Cold Mixes,
- Poloteplá asfaltová směs – Half Warm Asphalt,

- Teplá asfaltová směs – Warm Mix Asphalt,
- Horká asfaltová směs – Hot Mix Asphalt.

2.3.1. Studené asfaltové směsi

Studené asfaltové směsi jsou vyráběny za běžných klimatických teplot (15 – 25 °C). Aby bylo možné asfaltovou směs vyrábět při těchto nízkých teplotách, jsou tyto směsi nejčastěji vyráběny na bázi asfaltové emulze. Mezi studené asfaltové směsi se také řadí studené pěnoasfaltové směsi, kdy dochází k míchání kameniva, asfaltové pěny, přísad a vody pro dosažení míchací vlhkosti. [7] V České republice jsou studené asfaltové směsi využívány jako tzv. vysrávkové směsi. [8]

2.3.2. Poloteplé asfaltové směsi

Poloteplé asfaltové směsi jsou vyráběny při teplotách 70 – 100 °C. Mezi tyto směsi můžeme řadit nízkoteplotní asfaltovou směs EBT, která byla vyvinuta ve Francii a která je vyráběna při teplotě cca 90 °C. [8]

2.3.3. Teplé asfaltové směsi

S rostoucí snahou snížit ekonomické a ekologické dopady při výrobě asfaltových směsí se stále větší pozornost věnuje tzv. teplým asfaltovým směsím, v zahraniční literatuře označované jako „Warm Mix Asphalt“ (WMA). Jedná se o směsi, které jsou vyráběny při teplotách 100 – 150 °C, tedy o 20 – 40 °C nižších než u klasických asfaltových směsí, tedy u horkých asfaltových směsí (Hot Mix Asphalt – HMA). [1]

V rámci této diplomové práce jsem se zabýval technologií umožňující vyrobit teplou asfaltovou směs. Z toho důvodu jsem se na WMA směs detailněji zaměřil.

2.3.3.1. Výhody WMA směsi

Kromě menšího množství vypuštěného CO₂ a menší spotřeby energie se mezi výhody teplé směsi řadí zlepšené pracovní podmínky, nižší stárnutí asfaltového pojiva, a díky menším výrobním a hutnicím teplotám také prodloužení doby přepravy. Díky nižší pracovní teplotě dojde také k rychlejšímu ochlazení položené směsi, a tím k rychlejšímu otevření uzavřeného úseku.

Ačkoliv oproti horkým asfaltovým směsím dochází ke snížení pracovní teploty o pouhých 20 – 40 °C, má toto snížení obrovský vliv na snížení emisí. Následující tabulka ukazuje, o kolik procent se sníží produkce látek znečišťujících životní prostředí při využití teplé směsi oproti klasické směsi horké [9]:

Znečišťující látky	Redukce množství v porovnání s horkou směsí
CO ₂	15-40 %
SO ₂	18-35 %
NO _x	18-70 %
CO	10-30 %
Prach	25-55 %

Tabulka 1: Redukce znečišťujících látek při použití teplé směsi [9]

Bylo prokázáno, že teplé asfaltové směsi rovněž dosahují stejných funkčních vlastností jako horké asfaltové směsi, je tedy možné je tímto typem směsí nahrazovat. V rámci své diplomové práce jsem se snažil pracovní teplotu teplé asfaltové směsi dále snižovat a následně jsem sledoval, zda funkční vlastnosti stále dosahují požadovaných hodnot.

2.3.3.2. Nevýhody WMA směsi

Jako jiné vyráběné směsi mají samozřejmě i teplé asfaltové směsi své nevýhody. V současnosti se jako hlavní nevýhoda jeví otázka dlouhodobé výkonosti těchto směsí. Jedná se totiž o relativně nový typ asfaltových směsí a z toho důvodu neexistují žádné dlouhodobé výsledky chování takto vyrobených směsí. Teplé asfaltové směsi popisují spíše prediktivní modely, které ovšem nemusí být zcela přesné. [10]

Za další problém je možné považovat přítomnost vody během míchání směsi (technologie pěnoasfaltu). Při obalování může nastat neúplné odpaření vody dávkované při míchání, což vede k ukládání zbytkové vody, která může mít negativní vliv na výslednou směs. [11] Nicméně v rámci testování technologie pěnoasfaltu bylo zjištěno, že tato technologie negativně neovlivnila funkční vlastnosti vyrobené směsi (zachování funkčních vlastností jsem zmínil v podkapitole Výhody WMA směsi). Diplomová práce tuto technologii dále zkoumá. [12]

2.3.3.3. Základní dělení

Snížení pracovní teploty, a tedy vytvoření teplé asfaltové směsi lze dosáhnout několika technologickými postupy [1]:

- použití organických přísad,
- použití chemických přísad,
- použití pěnících přísad.

2.3.3.3.1. Organické přísady

Jako první technologický postup, který umožňuje snížit pracovní teplotu a tím vytvořit teplou asfaltovou směs, je přidání organických přísad.

Organické přísady snižují viskozitu asfaltového pojiva a tím umožňují snížení teploty o 20 – 30 °C. Tyto přísady zároveň zvyšují deformační odolnost takto upravených směsí. [1]

Organickými přísadami dávkovanými do asfaltových směsí se v České republice zabývají technické podmínky TP 238 – Nízkoteplotní asfaltové směsi. Dle těchto TP rozlišujeme dva typy dávkování organických přísad. První je dávkování organického pojiva během míchání asfaltové směsi na obalovně a druhá je použití tzv. nízkoviskózního asfaltového pojiva, které již obsahuje některou z organických přísad a je na obalovnu dodáváno jako konečný výrobek. Ačkoliv je použito nízkoviskózní asfaltové pojivo, není tím vyloučeno přidání dalších přísad během výroby asfaltové směsi. Pro výrobu těchto pojiv se používají standardní silniční asfalty, polymerem modifikované asfalty, multigrádová asfaltová pojiva nebo tvrdé silniční asfalty. [13]

Dle původu rozdělujeme organické přísady na přísady na bázi syntetických vosků (mezi které řadíme montánní vosky a Fischer-Tropschovy parafíny), na bázi amidů mastných kyselin a na tenzidy (povrchově aktivní látky) na bázi aminů. Následující tabulka popisuje technické charakteristiky organických přísad. [13]

Přísada	Jednotka	Amidy mastných kyselin	Fischer-Tropschův parafin	Montánní vosky (+ deriváty)
Vlastnost				
Vlastnosti přísad (údaje výrobce)				
Vzhled	---	bílý prášek nebo granulát	bílý prášek, granulát nebo tekutina	šedý prášek nebo pastilky
Bod tání/ skápnutí	(°C)	140 až 145	114 až 120	110 až 120
Bod tuhnutí	(°C)	135 až 142	100 až 105	95 až 105
Dynamická viskozita	mPa.s @130°C	neměřitelný	11 až 15	20 až 80
	mPa.s @140°C	13 až 17	9 až 13	15 až 40
	mPa.s @150°C	9 až 13	8 až 12	10 až 20
Vlastnosti jsou stanoveny s využitím běžných evropských norem. Hodnoty vycházejí z ověřených poznatků výrobců daných přísad. V případě montánního vosku se jedná o aplikace pro asfaltové směsi hutněných asfaltových vrstev.				

Tabulka 2: Technické charakteristiky organických přísad [13]

Přísady na bázi amidů, montánních vosků a Fischer-Tropschových parafínů přidáváme v množství 2 – 3 % hmotnosti asfaltového pojiva. Organické tenzidy na bázi aminů se přidávají v menším množství 0,3 – 1,0 % hmotnosti asfaltového pojiva. [13]

2.3.3.3.2. Chemické přísady

Druhý technologický postup pro snížení pracovní teploty je přidání chemických přísad. Ty na rozdíl od organických přísad nesnižují viskozitu asfaltového pojiva, ale upravují povrchové vlastnosti kameniva v mikroskopickém měřítku. Tyto přísady regulují míru vnitřního tření v rozmezí teplot 85-140 °C, což umožňuje míchání a hutnění směsi při nižších teplotách. Přidání chemických přísad snižuje pracovní teplotu o 20 – 40 °C. [1]

Mezi chemické přísady řadíme [14]:

- Evotherm Emulsion Technology (ET) – emulzivní technologie; dává se 0,5 % z hmotnosti emulze,
- Evotherm Dispersed Asphalt Technology (DAT) – přísada stejného chemického složení jako Evotherm ET, která je dávkována přímo do asfaltové směsi; dává se v množství 5 % z hmotnosti asfaltového pojiva,
- Evotherm 3G – přísada, která neobsahuje vodu; dává se v množství 0,25 – 0,75 % hmotnosti asfaltového pojiva,
- Rediset WMX – přísada v pevném skupenství ve formě granulí; touto přísadou se může upravovat asfaltové pojivo nebo se může dávkovat při míchání asfaltové směsi; dává se v množství 1,5 – 3,0 % z hmotnosti asfaltového pojiva,
- Zycotherm – chemicky reaktivní nanotechnologie, která reaguje s kamenivem a vytváří na něm hydrofobní povrch, což zvyšuje odolnost proti vlhkosti a vede ke kompletnímu obalení kameniva; dává se v množství 0,1 – 0,15 % z hmotnosti asfaltového pojiva,
- a další.



Obrázek 3: Chemická přísada Rediset WMX [15]

2.3.3.3. Pěnicí přísady

Třetí postup, jak vyrobit teplou asfaltovou směs, je použití pěnicích přísad. Tento postup vede ke zpěnění asfaltového pojiva a následné možnosti využít pojivo k výrobě směsi za nižších teplot.

Ke zpěnění asfaltového pojiva můžeme použít dvě pěnové technologie [1]:

- přímá metoda,
- nepřímá metoda.

U přímé metody dochází k injektování malého množství vody do horkého asfaltu (1 – 3 % z celkového objemu [16]) pomocí pěnových trysek. Díky tomuto kroku dojde k dočasnému zvýšení objemu pojiva, což umožňuje obalování kameniva při nižších teplotách. V pojivu poté zůstává zbytková vlhkost, která umožňuje snadnější zhutnění výsledné asfaltové směsi. Tato metoda umožňuje snížení pracovní teploty o 20 až 40 °C. [1]

Co se týká nepřímé metody, rozlišujeme 2 typy nepřímé metody. První typ spočívá ve využití minerálu jako zdroje vody. Mezi tyto minerály se řadí například zeolity, což jsou krystalické hydratované silikáty alkalických zemin. Zeolity obsahují až 20 % krystalické vody, která se při zahřátí nad 100 °C začne uvolňovat. Uvolněná voda způsobí zpěnění asfaltového pojiva a tím lepší zpracovatelnost po dobu 6 až 7 hodin nebo po dobu, dokud nedojde ke snížení teploty pod 100 °C. Tento typ nepřímé metody umožňuje snížit pracovní teplotu o 30 °C. [1] [17]

Druhým typem nepřímé metody je využití vlhkosti písku nebo R-materiálu. Jedná se o sekvenční metodu. Hrubé kamenivo tvořící cca 80 % asfaltové směsi se vysuší při teplotě 130 až 160 °C. Následně se kamenivo obalí asfaltovým pojivem, který vytvoří hrubý spojovací film na kamenivu. Následně se přidá studená nebo mokrá frakce kameniva. Vlhkost v této frakci začne reagovat s horkým asfaltem, který začne pěnit.

Tento způsob umožňuje snadno obalit studený a mokrý R-materiál nebo jemné frakce kameniva. Tento typ nepřímé metody umožňuje snížit pracovní teplotu o 20 až 40 °C. [1]

2.3.4. Horké asfaltové směsi

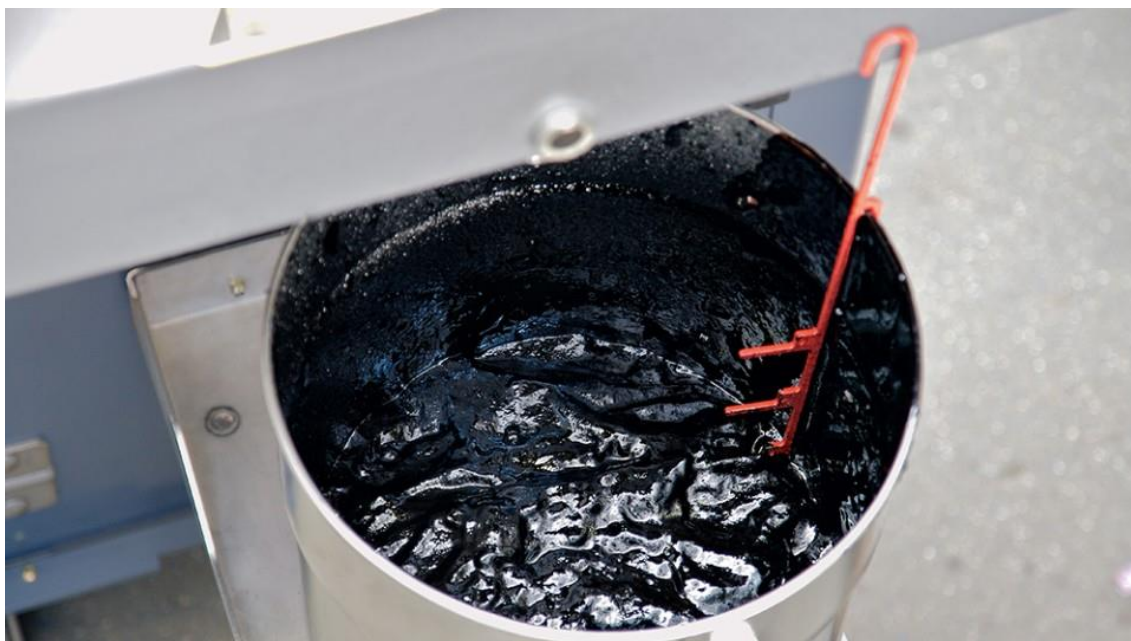
Poslední skupinou, u kterých se během výroby dosahuje nevyšších pracovních teplot, jsou horké asfaltové směsi („Hot mix asphalt“ – HMA). Horké asfaltové směsi jsou vyráběny při teplotách 120 – 190 °C. Jedná se o standardní asfaltové směsi, které jsou uvedeny v kapitole 2.2.2. U těchto směsí jsou nejčastěji použity standardní asfaltová pojiva typu silniční asfalt nebo polymery modifikovaný asfalt. Pracovní teplota se u těchto směsí mění podle typu použitého asfaltového pojiva.

2.4. Technologie pěnoasfaltu – přímá metoda

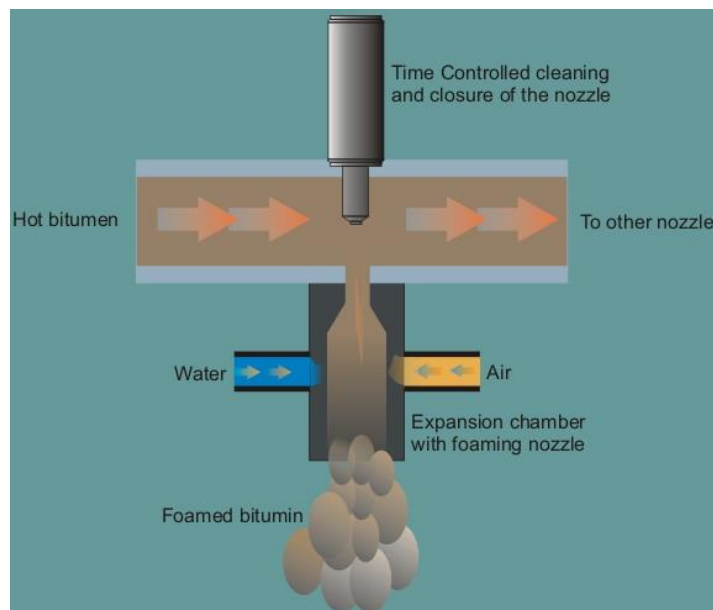
V rámci této diplomové práce jsem se zabýval testováním dvou asfaltových směsí typu asfaltový beton do obrusných vrstev ACO s využitím technologie zpěněného asfaltového pojiva. Ke zpěnění asfaltového pojiva došlo díky dávkování malého množství vody do horkého asfaltu. Z tohoto důvodu jsem zaměřil svou pozornost na popis tzv. přímé metody zpěnění asfaltového pojiva.

2.4.1. Zpěnění asfaltového pojiva

Pro zpěnění asfaltového pojivo pomocí přímé metody se využívá tzv. zpěňovací zařízení. Na začátku zpěňování se do expanzní komory zařízení načerpá horké asfaltové pojivo o standardní teplotě 170 °C až 190 °C (standardní silniční asfalt nebo polymerem modifikované asfaltové pojivo). Následně zpěňovací zařízení dávkuje rovněž do expanzní komory pod vysokým tlakem předepsané množství studené vody (1-3 %) o teplotě 15 °C až 25 °C bez chemických přísad. Díky vysoké teplotě načerpaného asfaltového pojiva se nadávkováná voda přemění z kapalného skupenství na plynné (vodní pára). Díky tomu začne asfaltové pojivo pění, což vede ke zvětšení objemu a dočasnému snížení viskozity. Tímto způsobem vzniklá asfaltová pěna je následně ze zpěňovacího zařízení dopravována do míchačky obalovny. [18]



Obrázek 4: Asfaltová pěna [20]



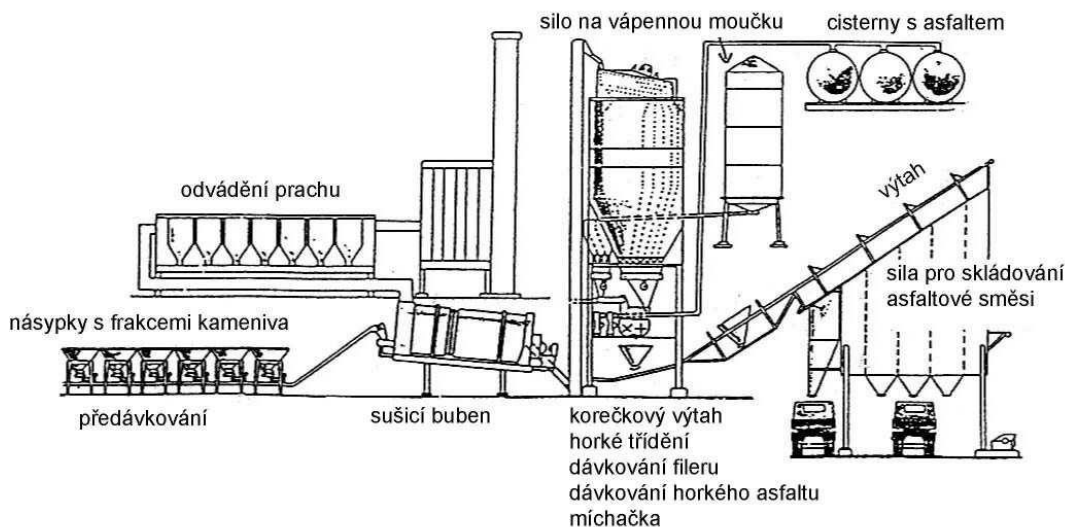
Obrázek 5: Výroba asfaltové pěny ve zpěňovacím zařízení [19]

Legenda k obrázku číslo 5:

- Hot bitumen – horké asfaltové pojivo
- Water – voda
- Air – vzduch
- Expansion chamber with foaming nozzle – expanzní komora s pěnicí tryskou
- Foamed bitumen – zpěněný asfalt

2.4.2. Míchání teplé asfaltové směsi

Po zpěnění asfaltu ve zpěňovacím zařízení dochází k samotnému míchání asfaltové směsi. Teplá asfaltová směs se míchá na obalovnách stejným způsobem jako horká asfaltová směs. Rozlišujeme 2 základní typy obaloven, a to šaržové a kontinuální obalovny. V České republice jsou standartně využívány šaržové obalovny.



Obrázek 6: Schéma šaržové obalovny [21]

Hlavní částí šaržové obalovny je tzv. míchačka, kde dochází k míchání nahřátého kameniva s asfaltovým pojivem a s dalšími přísadami. Nejprve je přesně nadávkované kamenivo dopravováno z násypku do sušícího bubnu, kde je kamenivo sušeno při teplotě 160 °C až 200 °C po dobu 4 až 6 minut. Po vysušení je kamenivo pomocí korečkového výtahu převezeno nad míchačku, kde dochází k opětovnému rozsítování (tzv. horkému třídění). Kamenivo je poté dávkováno společně s vápencovou moučkou do míchačky, kde probíhá míchání „nasucho“ po dobu 5 až 6 sekund. Následně je do míchačky dávkováno asfaltové pojivo přes průtokoměr. Míchání jedné šarže trvá 50 až 60 sekund. Na závěr je vyrobená směs pomocí výtahu dávkována do sil pro skladování směsi, odkud je následně přesypávána do nákladních automobilů a odvážena na stavbu. [21]

Rozdíl mezi výrobou horké asfaltové směsi a teplé asfaltové směsi je v dávkování asfaltového pojiva. U výroby teplé směsi je potřeba před míchačku instalovat zpěňovací zařízení, které z klasického pojiva vyrobí asfaltovou pěnu. Do míchačky je tedy místo asfaltového pojiva dávkována asfaltová pěna, což umožňuje provádět míchání za nižších teplot. Výslednou směsí je teplá asfaltová směs. [18]

2.4.3. Vlastnosti asfaltové pěny

Abychom zjistili kvalitu vyrobené asfaltové pěny, je potřeba stanovit její základní charakteristiky. Zpěněné asfaltové pojivo je charakterizováno pomocí dvou základních parametrů: [22] [23]

Expanzní poměr (Expansion ratio)

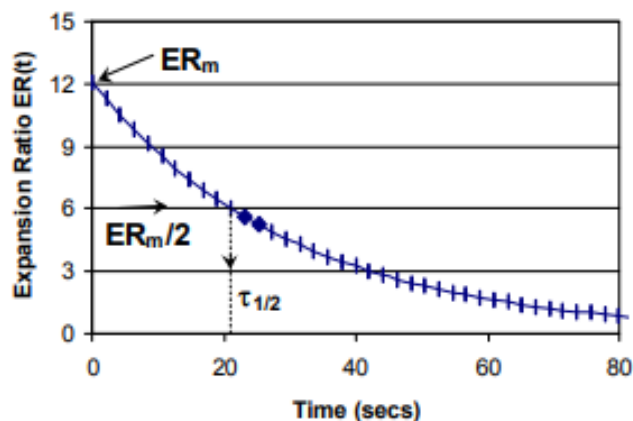
Jedná se o poměr objemu zpěněného asfaltového pojiva ku objemu asfaltového pojiva před zpěněním. Expanzní poměr je nepřímým měřítkem viskozity zpěněného asfaltového pojiva a udává, jak dobře se pojivo rozptýlí v kamenivu. V anglicky psané literatuře se označuje zkratkou ER.

Po dávkování z pěnicího zařízení dosahuje expanzní poměr maximální hodnoty. Jedná se tedy o poměr maximálního objemu zpěněného asfaltového pojiva ku objemu asfaltového pojiva před zpěněním. Tuto hodnotu označujeme jako maximální expanzní poměr a značíme ji zkratkou ER_m.

Poločas (Half-life)

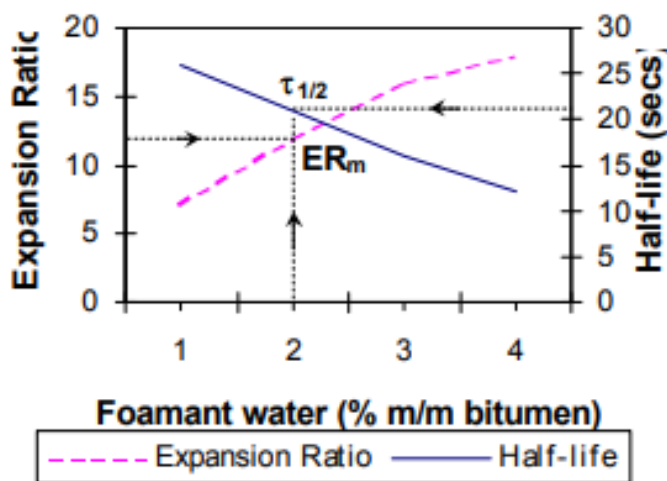
Jedná se o čas vyjádřený v sekundách, který udává, za jak dlouhou dobu se maximální objem zpěněného asfaltového pojiva sníží na polovinu. Poločas je měřítkem stability zpěněného asfaltového pojiva a poskytuje nám informaci o rychlosti ztráty objemu pojiva. Poločas se označuje zkratkou $\tau_{1/2}$, případně HL.

Následující graf ukazuje pokles Expanzního poměru ER v čase a stanovení poločasu $\tau_{1/2}$.



Graf 4: Pokles expanzního poměru s časem [22]

Expanzní poměr a poločas závisí na množství dávkované vody, přičemž vztah mezi těmito dvěma parametry je inverzní. Při zvětšování množství vody roste expanzní poměr a klesá poločas. Při návrhu množství dávkované vody je snaha dosáhnout kompromisu mezi těmito dvěma parametry.



Graf 5: Vztah mezi maximálním expanzním poměrem a poločasem [22]

Aby byla výsledná asfaltová pěna kvalitní, musí dosahovat určitých minimálních hodnot maximálního expanzního poměru ER_m a poločasu $\tau_{1/2}$. Problematikou se zabývalo více společností a vědeckých laboratoří. V následující tabulce jsou uvedeny stanovené minimální hodnoty charakteristických parametrů. [24]

Method	Minimum ER _m	Minimum HL
CSIR (Muthen, 1999)	10	12 seconds
TRL Report 386 (Milton & Earland, 1999)	10	10 seconds
Wirtgen (2005)	8	6 seconds
Chiu and Huang (2002)	8	8 seconds

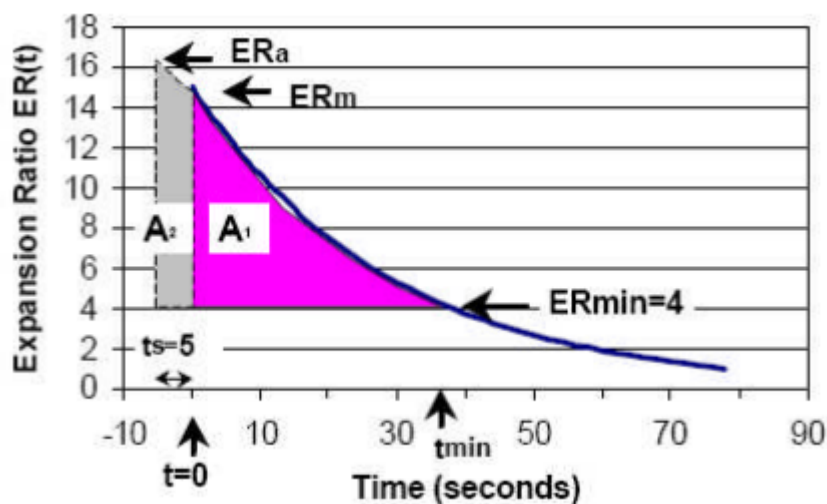
Tabulka 3: Minimální stanovené hodnoty ER_m a HL [24]

Co se týká maximálních hodnot, tak expanzní poměr by měl dosahovat hodnoty 15.

Na základě testování se doporučuje dávkovat studenou vodu ve množství 1 až 3 % z celkové hmotnosti asfaltového pojiva, ideálně kolem 2 %.

Jako další parametr, podle kterého lze určit vhodné množství dávkované vody, lze zmínit tzv. „Foam index“ (FI), představený doktorem Jenkinsem zabývajícím se problematikou zpěněného asfaltu. Jedná se o funkci maximálního expanzního poměru ER_m a poločasu $\tau_{1/2}$, přičemž čím je větší ER_m a delší $\tau_{1/2}$, tím je hodnota FI větší. Z toho vyplývá, že čím je hodnota FI větší, tím má vyrobený zpěněný asfalt lepší vlastnosti. [24]

Parametr FI je dán součtem ploch A_1 a A_2 , uvedených v následujícím grafu.



Graf 6: Zjištění parametru FI [24]

Pro přesné stanovení parametru FI je možné provést výpočet dle následující rovnice:

$$FI = A_1 + A_2$$

$$= \frac{HL}{\ln 2} \left(4 - ER_m - 4 \ln \left(\frac{4}{ER_m} \right) \right) + \left(\frac{1+c}{2c} \right) * ER_m * t_s$$

Rovnice 1: Výpočet parametru FI [24]

FI – foam index,

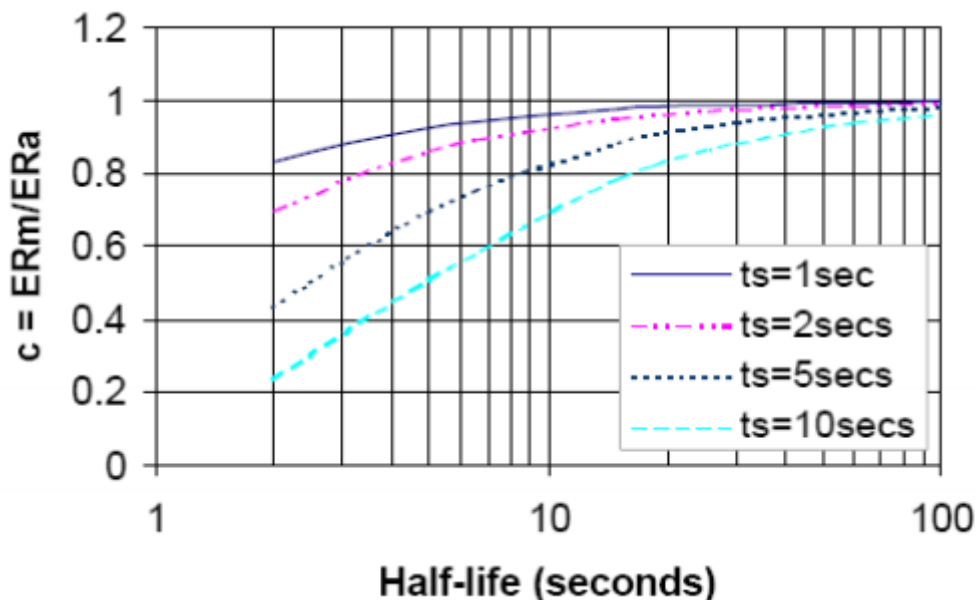
HL – poločas $\tau_{1/2}$,

ER_m – maximální expanzní poměr,

c – korekční faktor,

t_s – doba dávkování zpěněného asfaltu.

Korekční faktor c závisí na délce poločasu $\tau_{1/2}$ a době dávkování zpěněného asfaltu t_s . Lze ho stanovit dle následujícího grafu:



Graf 7: Stanovení korekčního faktoru c [24]

2.5. Zkušenosti s teplou asfaltovou směsí v zahraničí

Po vydání tzv. Kjótského protokolu v roce 1997, začala růst snaha o snížení emisí při výrobě asfaltových směsí. Tato snaha vedla ke vzniku teplé asfaltové směsi (WMA). Poprvé byla tato směs představena v Evropě v roce 1997 a následně v USA v roce 2002. K prvnímu využití v praxi došlo v roce 1999 v Evropě (konkrétně v Německu, kde byl použit pro zpěnění asfaltového pojiva syntetický zeolit Aspha-min [25]), v roce 2004 v USA a například v roce 2009 v Indii. Od této doby došlo k velkému rozvoji technologie teplé asfaltové směsi. V následující tabulce jsou uvedeny příklady prvního použití teplé asfaltové směsi v praxi v některých státech. [26]

1 ST TRIAL(Year)	COUNTRY	LENGTH(Km)	WMA(Additive)
1999	Germany	*	Aspha-min ^R
1999	Norway	*	*
2000	France	*	*
2004	U.S.A	*	*
2005	Canada	*	*
2007	China	1.00	Evotherm
2008	Korea	0.24	LEADCAP WMA
2008	South Africa	*	WMA-T
2009	India	0.50	Thiopave
2010	Brazil	0.40	Gemul XT14

Tabulka 4: První využití teplé asfaltové směsi v praxi [26]

2.5.1. Německo

První stát, kde byla v praxi použita teplá asfaltová směs bylo Německo. Co se týká výzkumu vlastností této směsi, institut BAST (German Federal Highway Research Institute) monitoroval sedm testovacích úseků. Na základě laboratorních zkoušek a měření v terénu bylo zjištěno, že úseky s teplou asfaltovou směsí dosahovaly stejných nebo lepších vlastností než horké asfaltové směsi. Pro změnu viskozity byly v Německu používány organické přísady, konkrétně montánní vosky, Fischer-Tropschovy parafíny a amidy mastných kyselin. V současné době se v Německu pracuje s technologií zpěňování asfaltového pojiva pomocí zeolitů nebo s technologií WAM-Foam, což je typ přímé metody, který je patentován firmou Shell Bitumen. [26]

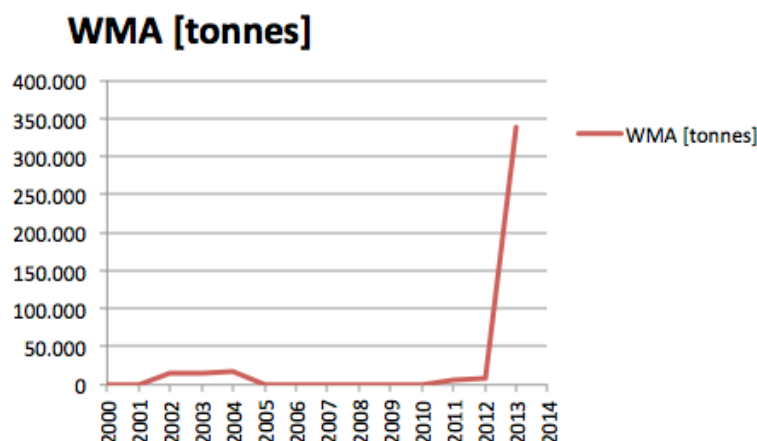
2.5.2. Norsko

Ve stejném roce, kdy byla poprvé vyžita technologie teplé asfaltové směsi v Německu, došlo k první pokládce také v Norsku. Na základě testování bylo i zde zjištěno, že vozovky z teplé asfaltové směsi dosahují podobných výkonů jako horké asfaltové směsi.

V roce 2007 navštívil Norsko tým materiálových odborníků z USA, který zjistil, že u teplých asfaltových směsích se oproti horkým asfaltovým směsím snížily emise v řádu desítek procent. [26]

V roce 2010 asociace FAV (Asphalt Producer Association in Norway) iniciovala projekt s názvem „LTA-2011“, která měla za cíl testovat směsi z hlediska kvality a důsledků pro zdraví. Testování probíhalo na 11 zkušebních úsecích, přičemž pracovní teplota byla snížena o 30 °C. Výsledkem tohoto projektu bylo zjištění, že u teplých asfaltových směsích došlo k poklesu emisí kouře o cca 50 %, nebyly zjištěny výrazné rozdíly v zatížení pracovníků a nebyly zjištěny žádné rozdíly v kvalitě v porovnání s horkou asfaltovou směsí. [1]

V roce 2012 začalo Norsko usilovat o zvýšení produkce teplých asfaltových směsích. Díky tomu se začaly asfaltové směsi o pracovní teplotě snížené o 25 °C se zachovanou kvalitou finančně zvýhodňovat bonusem 4 € za tunu. Díky tomuto zvýhodnění došlo k rapidnímu zvýšení produkce teplých asfaltových směsích, což je zřejmé z následujícího grafu. [1]



Graf 8: Produkce teplé asfaltové směsi v Norsku [1]

2.5.3. Francie

Dalším evropským státem, která použila teplou asfaltovou směs, byla Francie v roce 2000. Asfaltová směs je zde známá pod zkratkou LEA (Low Energy Asphalt). I zde, stejně jako v Norsku, došlo v roce 2007 k návštěvě materiálových inženýrů z USA, kteří i zde zjistil pokles emisí o desítky procent. [26]

V současné době dochází ve Francii k velkému rozvoji tohoto typu směsi. Vliv na to má i doporučení asociace USIRF, která doporučila systematické použití teplé asfaltové směsi. V rámci testování bylo provedeno mnoho studií, které ukazují, že je možné použít různé techniky ke snížení teploty, protože bez ohledu na použitý postup bylo u všech dosaženo požadovaných vlastností. [1]

Do směsi LEA je stále častěji využíván R-materiál, což vede k dalšímu zvýšení ochrany životního prostředí. [1]

2.5.4. Dánsko

Roku 2012 došlo k první pokládce teplé asfaltové směsi také v Dánsku. Jednalo se o zkoušku, kterou provedla firma NCC ve spolupráci s „Danish Road Directorate“ na silnici 321 v Ulladulla. [1]

Pro pokládku byla použita směs druhu SMA 11 s polymerem modifikovaným asfaltovým pojivem. Pro snížení teploty zde byla použita technologie zpěněného asfaltu, který umožnil snížit pracovní teplotu o 20 °C. Zpěněný asfalt byl vyroben v patentovaném vyvíječi pěny. Aplikace pomocí finišerů byla totožná s horkou asfaltovou směsí a teplá asfaltová směs také dosahovala stejných objemových hodnot. Co se týká přilnavosti asfaltového pojiva, tak zpěněný asfalt dosahoval stejné přilnavosti jako standardní asfalt. Po těchto zjištění byl zbytek komunikace zkonstruován za pomoci směsi typu WMA.



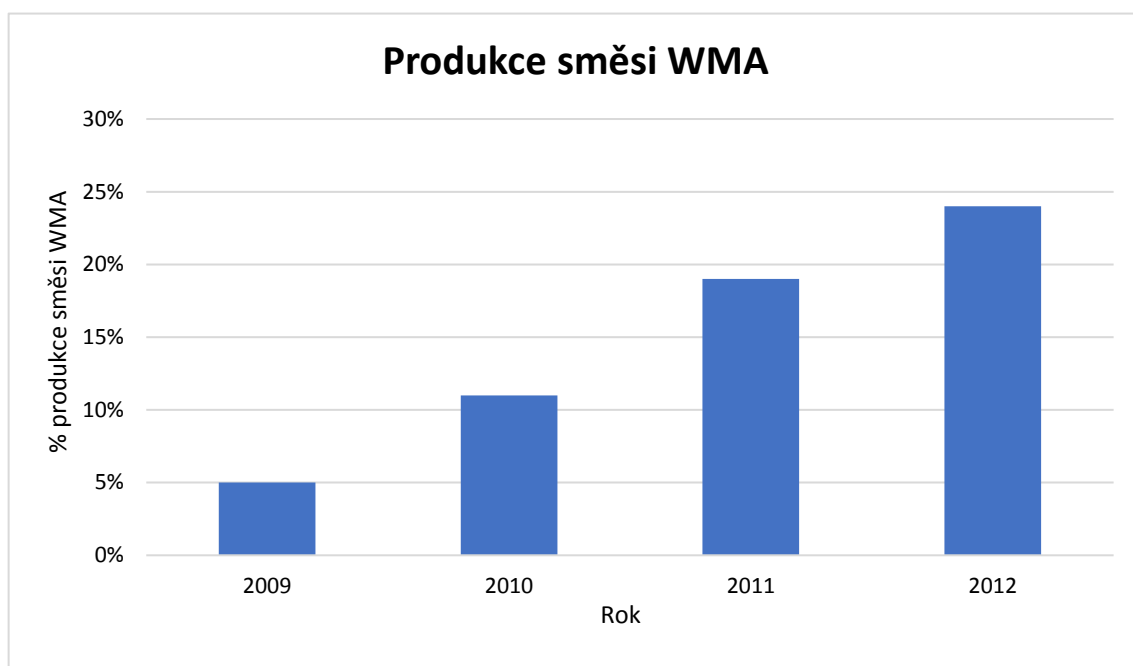
Obrázek 7: Teplá asfaltová směs v Dánsku [1]

2.5.5. USA

Po úspěšných testech v Evropě se typem asfaltových směsí začala zabývat také USA. K první pokládce došlo v roce 2004. Od té doby produkce směsí v USA předběhla produkci v Evropě. Následující tabulka a graf zobrazuje nárůst produkce směsí WMA v období mezi lety 2009 až 2012. [1] [26]

Year	Million tonnes of WMA	Total asphalt production [Million tonnes]	% of WMA
2009	15,2	325	5%
2010	37,3	326	11%
2011	62,3	332	19%
2012	77,1	323,5	24%

Tabulka 5: Produkce teplé asfaltové směsí v USA [1]



Graf 9: Produkce teplé asfaltové směsí v USA [1]

Stejně jako v Evropě, tak i v USA bylo financováno mnoho projektů, které zkoumaly teplé asfaltové směsí. V následující tabulce jsou uvedeny projekty, které vznikly v letech 2007 až 2012. [26]

Project Number	Report Number	Effective Date	Completion Date
NCHRP 9-43	NCHRP-691 NCHRP- 714	3/22/2007	1/31/2011
NCHRP 9-47	*	3/31/2008	1/8/2009
NCHRP 9-47A	NCHRP-779	7/13/2009	3/10/2014
NCHRP 9- 49	NCHRP- 763	7/26/2010	9/30/2013
NCHRP 9-49A	*	4/29/2011	7/28/2016
NCHRP 9- 52	*	6/1/2012	2/28/2015
NCHRP 9-53	*	6/1/2012	10/31/2014

Note- "*" Information is not available

Tabulka 6: Projekty zkoumající teplou asfaltovou směs v USA [26]

2.5.6. Indie

V roce 2009 byla poprvé použita teplá asfaltová směs v Indii. Jednalo se o 500metrový úsek v průmyslovém areálu Bawana vlastněném společností DSIDC (Delhi State Infrastructure Development Corporation). Jako další projekt, kde byla použita směs WMA, byla pokládka obrusné vrstvy na dálnici SH-5. Zde se již jednalo o úsek dlouhý 1 km. Mezi větší projekty můžeme zařadit úsek dlouhý 210 km na dálnici NH-3. [26]

V Indii probíhá snížení viskozity pomocí chemických přísad. Na základě výzkumných projektů, které v Indii proběhly, IRC (Indian Roads Congress) dala akreditaci dvěma chemickým přísadám, a to: [26]

- Evotherm od firmy MeadWestvaco (MWV),
- Thiopave od firmy Shell.



Obrázek 8: Chemická přísada Thiopave od firmy Shell [27]

2.5.7. Čína

Se snižováním viskozity, a tím i pracovní teploty pomocí chemických přísad se začalo také v Číně. K první pokládce došlo v roce 2007. Jednalo se u zkušební komunikaci AC-13 o délce 1 km. Pro snížení viskozity zde jako chemická přísada byla použita přísada Evotherm. [26]

Směs typu WMA byla použita také na nejvýše umístěné dálnici G219, která se nachází mezi čínskou provincií Sin-t'iang a Tibetem. [26]

2.5.8. Jihoafrická republika

Od roku 2008, kdy byla poprvé využita technologie teplé asfaltové směsi v Jihoafrické republice, do roku 2010 došlo k velkému pokroku, které vedly k tomu, že se zde směs typu WMA stala běžnou asfaltovou směsí. V průběhu tohoto období došlo k testování této směsi, které přinesly mnoho zkušeností a znalostí ohledně směsi WMA. Výsledkem bylo vydání dokumentu „WMA guideline document“ a specifikací „National WMA specification“. [26]

2.6. Zkušenosti s teplou asfaltovou směsí v České republice

2.6.1. Teplé asfaltové směsi

Po zkušenostech s teplou asfaltovou směsí v zahraničí se tímto typem asfaltových směsí začala zabývat i Česká republika. V roce 2012 byly vydány předběžné technické podmínky TP 238 – Nízkoteplotní asfaltové směsi (NTAS). TP vydalo České vysoké učení technické v Praze (ČVUT) ve spolupráci s Vysokým učením technickým v Brně (VUT). [13]

TP 238 rozebírá technologie, kterými lze snížit pracovní teplotu při výrobě asfaltové směsi a možnosti aplikace nízkoteplotních asfaltových směsí.

Technické podmínky rozebírají 3 způsoby, kterými lze snížit viskozitu. Prvním způsobem je využití průmyslově vyrobeného nízkoviskózního asfaltového pojiva při míchání asfaltové směsi. Jedná se o asfaltové pojivo, které bylo upraveno pomocí tzv. organických přísad (organické přísady jsou detailně rozepsány v kapitole 2.4.1.). Druhým způsobem je dávkování organické přísady během výroby asfaltové směsi (je možné i v případě, že bylo použito nízkoviskózní asfaltové pojivo). Třetím způsobem je přidání minerálních přísad. Mezi minerální směsi se řadí např. zeolity, které během výroby částečně nahrazují filer, který se běžně dávkuje do asfaltové směsi. Zeolity obsahují chemicky vázanou vodu, která se při zahřátí uvolňuje, a umožňuje snížit pracovní teplotu při výrobě asfaltové směsi.

Co se týká využití, tak TP 238 umožňuje nízkoteplotní asfaltové směsi využít do obrusné, ložní i podkladní vrstvy vozovek, přičemž vyrobená směs se vždy řídí podmínkami zvoleného výchozího typu asfaltové směsi.

Díky snížení pracovní teploty a snížení emisí technické podmínky doporučují směsi NTAS využít při pokládce ve vnitřních prostorách a tunelech, pro zpevnění ploch s požadavkem na urychlené uvedení do provozu, pro dopravní a průmyslové plochy s extrémním zatížením a pokud jsou stavební práce prováděny při zhoršených povětrnostních podmínkách.

Ačkoliv TP 238 popisuje více způsobů, jak snížit pracovní teplotu, není zde rozpracována technologie zpěnění asfaltového pojiva pomocí dávkování studené vody ve zpěňujícím zařízení (je zde sice zmíněna jako další v zásadě vhodná možnost, ale více jí TP nezpracovává).

Z tohoto důvodu vznikla snaha dokázat, že i technologie pěnoasfaltu umožní snížit pracovní teplotu a zachovat funkční vlastnosti směsi stejně jako výše uvedené přísady.

2.6.2. Technologie pěnoasfaltu

Technologie pěnoasfaltu ovšem není v České republice neznámá. V roce 2007 byly společností IMOS Brno, a. s. zpracovány technické podmínky TP 112 – Studené pěnoasfaltové vrstvy, které tuto technologii blíže popisují. [7]

Základem této vrstvy je zpěněné asfaltové pojivo (silniční asfalt 70/100, 100/150, 160/220), které je při teplotě 160 – 170 °C dávkováno do pěnicího zařízení. Následně je do zařízení dávkována studená voda v množství 1 – 5 %. Výsledkem je tzv. asfaltová

pěna, kterou je možné obalovat vlhké kamenivo. V níže uvedené tabulce jsou uvedeny požadované vlastnosti asfaltové pěny.

Vlastnosti asfaltové pěny

Parametr	Rozměr	Požadavek
Poloviční pokles (PP)	sec	12 – 20
Poměr napětí (PN)	ml / g	15 - 22

Tabulka 7: Požadované vlastnosti asfaltové pěny [7]

Asfaltová pěna je následně dávkována do míchačky, kde je míchána se stavební směsí (kamenivo, druhotné a jiné sytké stavební materiály), vodou a dalšími přísadami. Během návrhu směsi je nutné brát v potaz, zda se jedná o přerušovaný nebo nepřerušovaný cyklus výroby. Výsledkem je pěnoasfaltová směs (PAS), která se odváží po výrobě odváží pomocí nákladních aut na stavbu. Vrstva, která je tvořena pěnoasfaltovou směsí je označována jako studená pěnoasfaltová vrstva (VPAS).

Jelikož se jedná o studenou asfaltovou směs, nemůže díky svým funkčním vlastnostem nahradit horké asfaltové směsi. Následující tabulka ukazuje využití VPAS podle třídy dopravního zatížení.

Užití VPAS ve vozovce PK podle třídy dopravního zatížení

Třída dopravního zatížení (TDZ)			
Obrusná vrstva	Ložní vrstva	Podkladní vrstva	
		horní	spodní
VI ^{1) 2) 3) 4)}	V ^{3) 4) 5) 6) 7)}	IV ^{4) 5)}	III
¹⁾ Povrch VPAS silnic a místních komunikací je nutno opatřit nátěrem podle ČSN 73 6129 nebo emulzní kalovou vrstvou podle ČSN 73 6130. U vozovek účelových komunikací, lesních a polních cest, konstrukcí DJP, NK, ZK a dočasných tras PK se postupuje dle dohody objednatele se zhotovitelem, neboť se předpokládá, že povrch VPAS nebude nutno vždy v těchto případech nátěrem nebo kalovou vrstvou opatřovat, ²⁾ mezerovitost dle tabulky 2 těchto TP nepřekročí u M 7 %, u M 6 %, ³⁾ při použití silničního asfaltu 70/100 a za předpokladu že na zkušebních tělesech vytemperovaných na teplotu (60±1)°C bude prokázána hodnota SM _{1a} = min. 5 kN a PM _{1a} v intervalu 20-45 mm.10 ⁻¹ (viz tab.2 a příloha A těchto TP), ⁴⁾ pro návrhovou úroveň porušení vozovky novostavebního charakteru D2 (TP 170, čl. 4.1.1, tab. 1), resp. návrhovou úroveň porušení úprav prováděných v rámci údržby a oprav stávajících vozovek D3 (TP 87, čl. 4.1, tab.1, čl. 4.3, tab. 4 a příměření čl. 5.4, tab.6), ⁵⁾ mezerovitost dle tabulky 2 těchto TP nepřekročí u M 10 %, u M 9 %, ⁶⁾ obrusnou vrstvu tvoří AB podle ČSN 73 6121, příp. LA podle ČSN 73 6122. ⁷⁾ je-li to odborně zdůvodněno, lze u vozovek novostavebního charakteru se souhlasem projektanta a objednatele použít ložní vrstvu pro TDZ VI a horní podkladní vrstvu pro TDZ V i pro návrhovou úroveň porušení D1, resp. D2 u úprav stávajících vozovek dle TP 87.			

Tabulka 8: Využití VPAS podle třídy dopravního zatížení [7]

Toto jsou jediné technické podmínky, které se technologií pěnoasfaltu v České republice zabývají. V současné době neexistují technické podmínky, které by rozpracovávaly využití této technologie u teplých asfaltových směsí, které mohou nahradit tradiční horké asfaltové směsi.

2.6.3. Stavby v České republice

Ačkoliv neexistují předpisy popisující využití technologie pěnoasfaltů do teplých asfaltových směsí, je již tato technologie i u nás testována.

Zpěněný asfalt byl využit v roce 2017 při pokládce asfaltového krytu na komunikaci II/212 Horní Pochlovice – Kaceřov km 26,113 – 27,713 v Karlovarském kraji. Stavbu realizovala firma Froněk, spol. s r.o. Jednalo se o pokládku dvou konstrukčních vrstev, a to podkladní vrstvy ACL 16+ o tloušťce 50 mm a obrusné vrstvy

ACO 11+ o tloušťce 40 mm. Jako pojivo byl použit silniční asfalt gradace 50/70 a ke spojení vrstev byl použit spojovací postřik z modifikované asfaltové emulze. [28]

Stavba byla rozdělena na 5 úseků, z čehož byl 1 úsek referenční a ostatní 4 tvořeny nízkoteplotní směsí. V rámci stavby byla sledována teplota během výroby, dopravy a pokládky a účinnost hutnění pomocí radiometrické sondy.

Ke zpěnění asfaltu bylo použito zpěňující zařízení.

V rámci stavby byly využity i vysoký podíl R-materiálu (v ložní vrstvě 60 % a v obrusné vrstvě 50 %). R-materiál byl přehříván v paralelním bubnu a následně dávkován do míchačky obalovny.



Obrázek 9: II/212 Horní Pochlovice – Kaceřov km 26,113 – 27,713 [28]

Mezi budoucí stavby s využitou technologií pěnoasfaltu lze zařadit stavbu II/330 Budiměřice – Průtah, km 21,372 – 21,882, II/330 Rašovice – Průtah. Zhotovitelem této stavby je firma COLAS CZ, a.s. Asfaltové pojivo je zde zpěněno pomocí zpěňujícího zařízení. Technologie pěnoasfaltu je zde použita na základě Stavebně technického osvědčení (STO). [29]

3. CÍL PRÁCE

Cílem této diplomové práce je zpracování problematiky technologie pěnoasfaltu a ověření funkčních vlastností teplé asfaltové směsi, u které bylo dosaženo snížení výrobní a hutnicí teploty právě touto technologií.

Praktická část má za cíl posoudit, zda je možné pracovní teplotu, která se u této technologie využívá, snížit o 20 °C, aniž by došlo k negativnímu ovlivnění funkčních vlastností takto vyrobené a ztuhlé směsi.

Konkrétně se jedná o testování dvou asfaltových směsí druhu ACO 11+, přičemž u jedné byla použita pracovní teplota 150 °C a u druhé byla použita snížená pracovní teplota 130 °C. U obou směsí jsou provedeny funkční zkoušky na asfaltové směsi a na extrahovaném asfaltovém pojivu dle platných norem ČSN.

První část testování je tvořena provedením funkčních zkoušek asfaltové směsi:

- Stanovení nízkoteplotních vlastností dle normy ČSN EN 12697-46
- Stanovení modulu tuhosti dle normy ČSN EN 12697-26
- Zkouška pojíždění kolem – stanovení odolnosti proti trvalým deformacím dle normy ČSN EN 12697-22+A1
- Cyklická zkouška v tlaku v triaxiálním přístroji – stanovení odolnosti proti trvalým deformacím dle normy ČSN EN 12697-25

Druhá část testování je tvořena provedením empirických a funkčních zkoušek na extrahovaném asfaltovém pojivu:

- Stanovení penetrace jehlou dle normy ČSN EN 1426
- Stanovení bodu měknutí metodou kroužek a kulička dle normy ČSN EN 1427
- Stanovení komplexního modulu ve smyku a fázového úhlu dle normy ČSN EN 14770

Výsledky všech zkoušek jsou zpracovány, vzájemně porovnány a shrnuty v závěru diplomové práce.

Diplomová práce je provedena v rámci projektu VUT s označením TH03020283 „*Využití technologie pěnoasfaltu v asfaltových směsích*“, který zkoumá tuto technologii s cílem snížení energetické náročnosti a snížení emisí při výrobě asfaltových směsí. Hlavním řešitelem projektu je Ing. Petr Hýzl Ph.D. [30]

Praktická část navazuje na diplomovou práci Ing. Michaely Venclíkové „*Využití pěnoasfaltu v asfaltových směsích*“, která dokázala, že využití technologie zpěněného asfaltu v obrusné vrstvě negativně neovlivní vlastnosti asfaltové směsi a doporučila otestovat chování směsi při snížení pracovní teploty. [12]

4. PRAKTICKÁ ČÁST

Praktická část diplomové práce se zabývá prověřením možnosti snížení pracovní teploty při výrobě a hutnění teplé asfaltové směsi s využitím technologie pěnoasfaltu. Byly vyrobeny dvě asfaltové směsi ACO 11+ s použitou technologií pěnoasfaltu při pracovní teplotě 150 °C a při snížené teplotě 130 °C. Na vyrobených asfaltových směsích a extrahovaném asfaltovém pojivu byly provedeny empirické a funkční zkoušky dle platných norem ČSN, které měly za cíl posoudit, zda je možné snížit pracovní teplotu o 20 °C, aniž by došlo ke zhoršení funkčních vlastností vyrobené směsi.

4.1. Použité materiály

Asfaltová směs se skládá z kameniva různých frakcí, asfaltového pojiva a dalších přísad, které zlepšují vlastnosti výsledné asfaltové směsi.

4.1.1. Kamenivo

Pro výrobu asfaltových směsí byly použity 4 frakce kameniva a filer z různých zdrojů. Společně s vyrobenou asfaltovou směsí byla firmou COLAS CZ dodána zkouška typu popisující jednotlivé frakce kameniva a jejich síťový rozbor. [31]

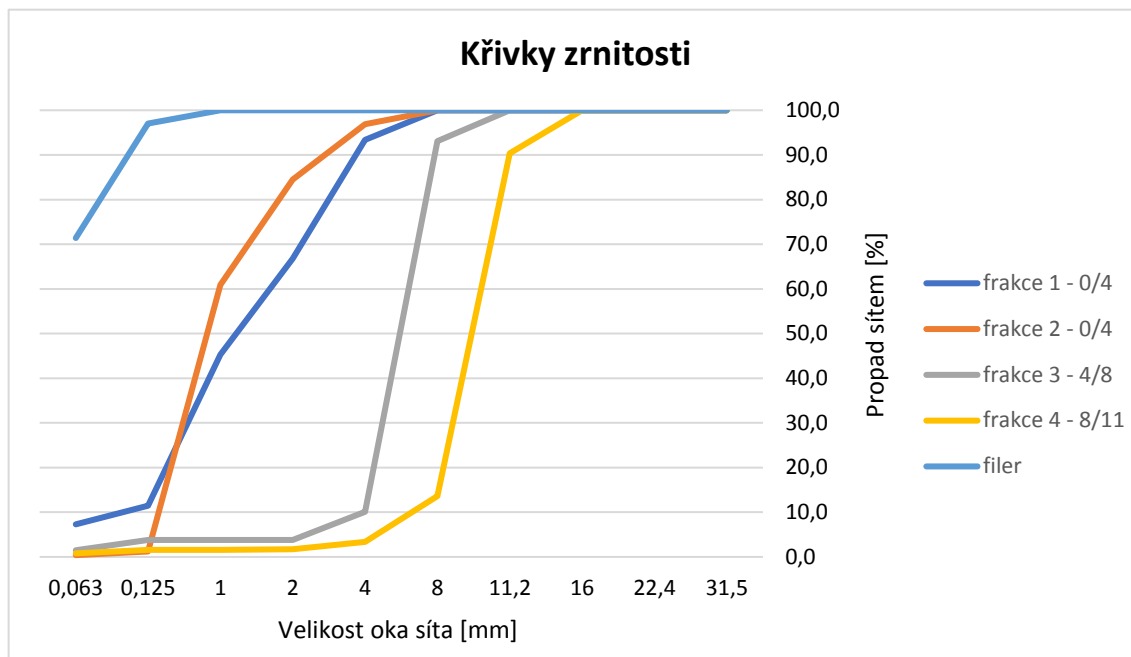
Použité kamenivo:

Označení	frakce	Zdroj
frakce 1	0/4	Rančířov
frakce 2	0/4	Ledce
frakce 3	4/8	Bory
frakce 4	8/11	Bory
vápenec	filer	Mokrá

Propad sítím [%]		Frakce kameniva				
		0/4	0/4	4/8	8/11	filer
Velikost oka síta [mm]	31,5	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
	22,4	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
	16	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
	11,2	100,0	100,0	100,0	90,4	100,0
	8	100,0	100,0	93,1	13,6	100,0
	4	93,4	96,9	10,1	3,4	100,0
	2	66,8	84,5	3,8	1,7	100,0
	1	45,3	60,9	3,8	1,6	100,0
	0,125	11,5	1,2	3,8	1,6	97,0
	0,063	7,3	0,4	1,5	0,8	71,4

Tabulka 9: Síťový rozbor jednotlivých frakcí kameniva [31]

Zjištěné síťové rozbory byly následně vyneseny do grafu, a tím byly vytvořeny křivky zrnitosti.



Graf 10: Křivky zrnitosti jednotlivých frakcí kameniva [31]

4.1.2. Asfaltové pojivo

Jako pojivo pro zkoušené asfaltové směsi by použit silniční asfalt gradace 50/70. Jedná se o standardní nemodifikované asfaltové pojivo používané na pozemních komunikacích v České republice do směsi druhu AC.

Obor použitelnosti použitého pojiva je v teplotním rozmezí daném bodem lámavosti dle Frasse, který nabývá hodnot ≤ -8 °C a bodem měknutí, který nabývá hodnot v rozmezí 46 – 54 °C. [32]

Na použitém asfaltovém pojivu bylo provedeno stanovení penetrace a stanovení bodu měknutí. V následující tabulce jsou uvedeny naměřené hodnoty a požadovaný rozsah výsledků zkoušek. [31]

Silniční asfalt 50/70	Minimální hodnota	Maximální hodnota	Zkušební vzorek
Penetrace [p.j.]	50	70	64
Bod měknutí [°C]	46	54	47,8

Tabulka 10: Vlastnosti silničního asfaltu 50/70 [31]

Asfaltové pojivo bylo zpěněno vodou v množství 1,5 % z hmotnosti asfaltu pomocí zpěňujícího zařízení. [31]

4.2. Výroba asfaltové směsi

Výroba testovaných asfaltových směsí proběhla na obalovně firmy COLAS CZ v Bystřici nad Pernštejnem. Jedná se o standardní šaržovou obalovnu vybavenou zařízením na výrobu pěnoasfaltu. [33]

V rámci diplomové práce byly vyrobeny 2 asfaltové směsi. Jedná se o asfaltový beton pro obrusné vrstvy (maximální velikost zrna 11 mm) s využitím technologie zpěněného asfaltového pojiva typu silniční asfalt 50/70, přičemž první pracovní teplota byla 150 °C a druhá byla snížena o 20 °C, tedy 130 °C. Vyrobené asfaltové směsi jsou označeny jako ACO 11+ F – 150 °C a ACO 11+ F – 130 °C.

Při výrobě asfaltové směsi bylo do míchačky dávkováno adhezivo Addibit L300 v množství 0,2 % z hmotnosti asfaltu. [31]

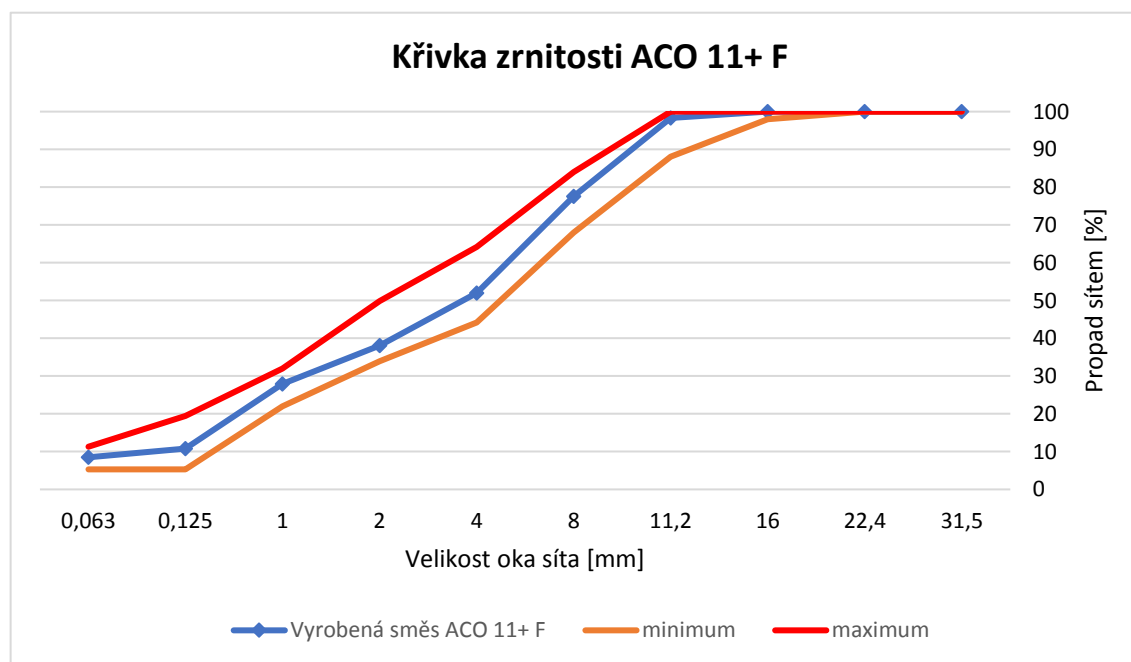
Společně s vyrobeným materiálem byl firmou COLAS kromě protokolu o zkoušce typu také dodán protokol stanovující vlastnosti směsí, které jsou v následujících odstavcích, tabulkách a grafech rozepsány. [31] [34]

Jelikož se jedná o stejné asfaltové směsi (rozdílná je pouze pracovní teplota), platí veškeré uvedené hodnoty pro obě vyrobené asfaltové směsi.

Následující tabulka a graf popisují zrnitost vyrobených asfaltových směsí. [34]

ACO 11+ F - Zrnitost			
Síto [mm]	Vyrobené směsi [%]	Přípustný rozptyl [%]	
31,5	100	100	100
22,4	100	100	-
16	100	98	100
11,2	98,3	88,1	100
8	77,6	-	-
4	52	44,2	64,2
2	38,1	33,9	49,9
1	27,9	-	-
0,125	10,8	5,3	19,4
0,063	8,5	5,3	11,3

Tabulka 11: Zrnitost směsi ACO 11+ F [34]



Graf 11: Křivka zrnitosti ACO 11+ F [34]

Po provedení kontrolní zkoušky bylo potvrzeno, že zrnitost vyrobených asfaltových směsí je v rozmezí přípustného rozptylu. Zrnitost je tedy ve shodě s normou ČSN 73 6121.

Směs byla dále testována na množství obsahu asfaltového pojiva. Firma COLAS CZ na základě zkoušek stanovila obsah pojiva 5,9 %, což je v přípustném rozmezí 5,4 – 6,4 %. I obsah pojiva je tedy ve shodě s normou ČSN 73 6121.

Firmou COLAS CZ byla také zjištěna objemová hmotnost a maximální objemová hmotnost. Tyto hodnoty jsem použil pro výpočet mezerovitosti směsi, pro stanovení navážky pro výrobu zkušebních desek, a nakonec pro kontrolu hodnot s naměřenými hodnotami u vyrobených Marshallových těles.

Mezerovitost jsem vypočítal dle následujícího vzorce:

$$M = \left(1 - \frac{\rho_{bssd}}{\rho_{mv}}\right) * 100$$

Rovnice 2: Stanovení mezerovitosti směsi

M je mezerovitost směsi v %

ρ_{bssd} je objemová hmotnost zkoušeného tělesa, v kg/m³,

ρ_{mv} je maximální objemová hmotnost asfaltové směsi, v kg/m³.

V následující tabulce jsou popsány získané hodnoty objemových hmotností a vypočítaná mezerovitost.

Výpočet mezerovitosti směsi ACO 11+ F		
Objemová hmotnost	2400	kg/m ³
Maximální objemová hmotnost	2457	kg/m ³
Mezerovitost	2,3	%

Tabulka 12: Výpočet mezerovitosti směsi ACO 11+ F

Norma ČSN EN 13108-1 udává pro kontrolní zkoušky směsí ACO 11+ požadovanou mezerovitost v rozmezí 2,0 – 6,0 %. Dle TKP 7 se mezi kontrolní zkoušky řadí také stanovení mezerovitosti asfaltových směsí. Zjištěná mezerovitost testovaných asfaltových směsí se nachází v požadovaném rozmezí, je tedy ve shodě s požadavkem normy ČSN EN 13108-1. [6] [35]

Při výrobě zkušebních desek jsem vycházel z dodané objemové hmotnosti 2400 kg/m³ a maximální objemové hmotnosti 2457 kg/m³. Na základě těchto hodnot jsem kontroloval míru zhutnění všech vyrobených zkušebních těles a zároveň jejich mezerovitost. U mezerovitosti jsem však již vycházel z klasického rozmezí, tedy 2,5 – 4,5 %. Dále jsem kontroloval mezerovitost také u poté vyrobených tzv. Marshallových těles.



Obrázek 10: Šaržová obalovna v Bystřici nad Pernštejnem firmy COLAS CZ



Obrázek 11: Vyrobená asfaltová směs

4.3. Příprava zkušebních těles

Tato kapitola pojednává o výrobě zkušebních těles, který jsem použil pro provedení funkčních zkoušek asfaltové směsi.

4.3.1. Příprava těles rázovým zhutňovačem dle ČSN EN 12697-30+A1

Při přípravě těles rázovým zhutňovačem jsem vycházel z normy ČSN EN 12697-30+A1: Asfaltové směsi – Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka – Část 30: Příprava zkušebních těles rázovým zhutňovačem. Tzv. Marshallova tělesa vyrobená tímto způsobem se používají pro stanovení objemové hmotnosti a po porovnání s maximální objemovou hmotností pro stanovení mezerovitosti. [36]

V rámci této práce jsem vyrobená tělesa použil pro stanovení odolnosti proti trvalým deformacím pomocí cyklické zkoušky v tlaku v triaxiální komoře dle normy ČSN EN 12697-25. [37]

Pomůcky a zařízení

K výrobě Marshallových těles jsem použil rázový zhutňovač s ocelovým dolním podstavcem. Materiál byl sypán do formy na hutnění, která se skládá z nástavce, válcové formy a podložky. Mezi další pomůcky se řadí výtlačné zařízení a sušárna na ohřev asfaltové směsi.

Postup výroby

Nejprve jsem vložil pytel se směsí, dovezený z obalovny, do sušárny a nechal ho ohřát, abych mohl se směsí dále pracovat. Současně s materiálem jsem si nahřál také formu pro hutnění. Po dostatečném změknutí směsi jsem si navážil potřebné množství navážky pro výrobu jednotlivých zkušebních těles. Nachystané navážky jsem opět vložil do sušárny a nechal temperovat na požadovanou teplotu hutnění, tedy 150 °C a 130 °C.

Po vyjmutí formy ze sušárny jsem položil na nahřátou podložku kolečko separačního papíru, aby nedošlo k přilepení teplé asfaltové směsi k hutnícímu zařízení. Následně jsem ve třech vrstvách nasypal asfaltovou směs. Během sypání jsem dbal na to, aby nedocházelo k segregaci zrn, z toho důvodu jsem každou vrstvu důkladně urovnal. Po urovnání poslední vrstvy jsem na nasypanou směs položil druhé kolečko separačního papíru.



Obrázek 12: Rázový zhutňovač

Ihned po nasypání směsi do formy jsem začal se zhutňováním. Nachystanou formu jsem uložil do rázového zhutňovače a zařízení spustil. Směs byla hutněna 50 údery. Poté jsem formu obrátil a nechal opět hutnit 50 údery. Po dokončení hutnění jsem zhutněnou směs vyjmul ze zařízení, odlepil separační papíry od teplé směsi a nechal chladnout na teplotu cca 40 °C. Na závěr jsem zchladlou směs vložil do výtlačného zařízení a vytlačil ji z formy. Vyrobená Marshallova tělesa jsem poté nechal dále chladnout na laboratorní teplotu.

Vyrobená tělesa musela mít tvar válce o průměru $D = (101,6 \pm 0,1)$ mm a výšku $h = (63,5 \pm 2,5)$ mm. Celkově jsem vyrobil po 3 tělesech u obou teplot hutnění, dohromady tedy 6 zkušebních těles.



Obrázek 13: Výtlačné zařízení



Obrázek 14: Marshallova tělesa směsi 150 °C

4.3.2. Příprava těles zhutňovačem desek dle ČSN EN 12697-33+A1

Dalšími tělesy, které jsem si vyrobil pro provedení zkoušek, byly zhutněné desky. Při výrobě jsem postupoval dle normy ČSN EN 12697-33+A1 Asfaltové směsi – Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka – Část 33: Příprava zkušebních těles zhutňovačem desek. V této normě jsou popsány 3 metody zhutňování desek: Metoda užívající kolo s pneumatikou, metoda využívající hladký ocelový válec a metoda užívající lamely zatlačované válcem. [38]

Pro výrobu jsem použil lamelový zhutňovač nacházející se v laboratoři VUT FAST PKO, postupoval jsem tedy dle metody užívající lamely zatlačované válcem.

Pomůcky a zařízení

K výrobě zhutněných desek jsem použil lamelový zhutňovač. Toto zařízení se skládá ze stolu, připevněné formy, která má stanovené vnitřní rozměry $L = 320 \text{ mm}$, $l = 260 \text{ mm}$ s tolerancí, distančních rámečků, díky kterým je možné u zhutňovače nastavit tloušťku hutněné desky, ocelových lamel, které jsou vertikálně uloženy na hutněné směsi, a ocelového válce, který se pohybuje po lamelách a vyvozuje konstantní svislé zatížení. Mezi další pomůcky se řadí separační plech o rozměrech totožných s vnitřními rozměry formy, který se vkládá mezi hutněnou směs a ocelové lamely a sušárna na ohřev asfaltové směsi.

Postup výroby

Nejprve jsem si zjistil hmotnost navážky potřebné k výrobě jedné desky. Tu jsem si vypočítal z rozměrů formy, z tloušťky separačního plechu, potřebné tloušťky zkušební vzorku a objemové hmotnosti, jejíž hodnota mi byla dodána obalovnou firmy COLAS CZ společně s testovaným materiálem. Hmotnost jsem si vypočítal pro oba typy desek, tedy pro desky o tloušťce 4 cm a 5 cm.

Pytel se směsí, dovezený z obalovny, jsem si nejprve v sušárně nechal ohřát, aby bylo možné s materiálem dále pracovat. Poté, co směs dostatečně změkla, jsem si navážil potřebné množství navážky pro výrobu jedné desky. Navážka během tohoto procesu mírně zchladla, proto jsem ji vložil do sušárny a nechal temperovat na požadovanou hutnící teplotu, tedy 150 °C a 130 °C.



Obrázek 15: Lamelový zhutňovač



Obrázek 16: Navážka asfaltové směsi

Během temperování jsem si nachystal hutnící zařízení. Po správném naskládání distančních rámečků, abych zhutnil desku o správné tloušťce, jsem formu, podkladní desku a separační plech natřel separačním prostředkem, aby nedošlo k přilepení směsi k formě nebo plechu. Jak byla směs dostatečně vytemperovaná, vyjmul jsem ji ze sušárny a vysypal do formy. Pomocí špachtle jsem směs rovnoměrně rozložil a upěchoval. Na povrch směsi jsem položil separační plech a na něj postupně vertikálně naskládal všechny ocelové lamely. Následně jsem uvedl stroj do chodu. Ocelový válec začal postupně sjíždět dolů a zatěžovat ocelové lamely, které postupným zatlačováním hutnily asfaltovou směs. Tento proces trval do dosednutí válce na formu. Na závěr hutnění jsem těleso vyjmul z formy a nechal vychladnout na laboratorní teplotu.



Obrázek 17: Zkušební desky směsi 150 °C



Obrázek 18: Zkušební desky směsi 130 °C

4.4. Extrakce asfaltového pojiva dle ČSN EN 12697-3

Pro provedení zkoušek na asfaltovém pojivu bylo potřeba zpětně získat pojivo z asfaltové směsi. Postupoval jsem dle normy ČSN EN 12697-3 Asfaltové směsi – Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka – Část 3: Znovuzískání extrahovaného pojiva – Rotační vakuové destilační zařízení. [39]

Pomůcky a zařízení

Pro extrakci pojiva jsem využil tetrachlorethylen, který slouží k oddělení asfaltu od kameniva. Dále jsem použil odstředivací zařízení k zachycení jemných částic a destilační zařízení pro oddělení asfaltu od tetrachlorethylenu. Jako další pomůcky byly použity sušárna, sada sít pro zachycení odděleného kameniva a glycerin.

Postup výroby

Nejprve jsem asfaltovou směs určenou k extrakci vložil do sušárny a nechal temperovat na teplotu cca 90 °C pro snadnější manipulaci a rychlejší oddělení asfaltového pojiva. Následně jsem směs nasypal do plechovky a celou zalil tetrachlorethylenem. Směs jsem poté průběžně promíchal. Po dostatečném odležení jsem směs dávkoval přes sadu sít (dolní síto 0,063 mm) do odstředivacího zařízení, ve kterém se zachytávaly zbylé jemné částice. Zbylé kamenivo v plechovce jsem opět zalil tetrachlorethylenem a postup opakoval tolikrát, dokud nebylo kamenivo kompletně oddělené od asfaltového pojiva. Při posledním dávkování jsem vysypal na sadu sít celý obsah plechovky, přičemž čisté kamenivo se na těchto sítích zachytilo a zředěný asfalt přetekl do odstředivky. Výsledkem byla směs asfaltového pojiva s tetrachlorethylenem.



Obrázek 19: Otevřené odstředivací zařízení

Poté bylo potřeba oddestilovat tetrachlorethylen a získat tím čisté asfaltové pojivo. Pro tento krok jsem využil destilační zařízení. Směs asfaltového pojiva s tetrachlorethylenem jsem postupně dávkoval do skleněné baňky, která byla ponořena do glycerinu, který byl nahřátý na teplotu 110 °C. Baňka se otáčela rychlostí 75 ot/min a tlak byl v uzavřené aparatuře snížen na 40 kPa. Díky vysoké teplotě a sníženému tlaku

se začal tetrachlorethylen odpařovat a proudit do chladicího válce se spirálou s protékající studenou vodou. V chladicím válci tetrachlorethylen kondenzoval a byl odváděn do skleněné baňky. Během destilace se postupně dávkovala celá směs a zachycený tetrachlorethylen se přelával do nádoby na další použití. Po nadávkování veškeré směsi se teplota glycerinu zvýšila na 160 °C a následně na 180 °C a tlak se snížil na 2,0 kPa. Tím došlo k odpařování zbylého tetrachlorethylenu.

Výsledkem tohoto procesu byl čistý vyextrahovaný asfalt ve skleněné baňce, který byl nachystaný na přípravu vzorků.



Obrázek 20: Destilační zařízení

4.5. Příprava vzorků pro zkoušky asfaltového pojiva

Po provedení extrakce pojiva byly přímo z baňky odlity vzorky pro zkoušku penetrace jehlou dle normy ČSN EN 1426 a stanovení bodu měknutí metodou kroužek a kulička dle normy ČSN EN 1427. [40] [41]

Pro provedení zkoušky penetrace jehlou jsem si odlil asfaltové pojivo do předem připravené nádoby. Jednalo se o kovovou nádobu s vnitřním průměrem 55 mm. Následně jsem nechal asfaltové pojivo vychladnout na laboratorní teplotu.

Abych mohl stanovit bod měknutí, odlil jsem si asfaltové pojivo do dvou mosazných kroužků, které jsem si předem připravil na odlévací destičku, aby nedošlo k přilepení asfaltu, a tím ke znehodnocení vzorku. Stejně jako v předešlém případě jsem nechal vzorky vychladnout na laboratorní teplotu.

Jakmile jsem si nachystal výše uvedené vzorky, naplnil jsem baňku tetrachlorethylenem, který uvolnil zbylé asfaltové pojivo, které následně z baňky zteklo do připravené nádoby. Na závěr jsem vnější i vnitřní část baňky znovu opláchnul tetrachlorethylenem, aby bylo možné baňku použít pro další extrakci.

Po provedení empirických zkoušek asfaltových pojiv jsem znovu zahřál pojivo použité při zkoušce penetrace jehlou a odlil si vzorky pro zkoušky v dynamickém smykovém reometru (DSR), tedy pro stanovení komplexního modulu ve smyku a fázového úhlu dle normy ČSN EN 14770. Abych odlil vzorky o správných rozměrech, použil jsem při odlívání podložku pro provedení vzorků na zkoušky v DSR. [42]

Aby byly co nejlépe vystihnuty vlastnosti asfaltového pojiva v celém měřeném rozsahu teplot, byly pro jednotlivé rozsahy teplot připraveny následující vzorky:

První vzorek:

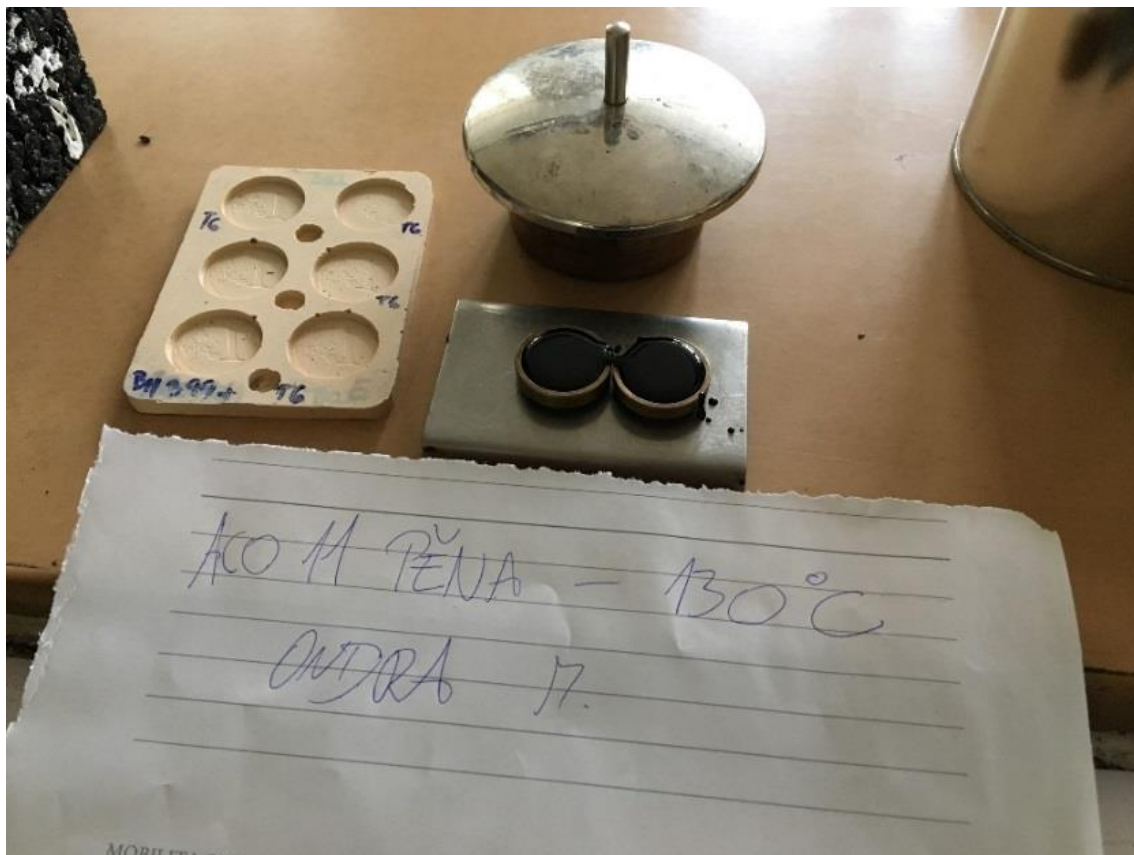
- geometrie: 8 mm,
- velikost mezery během provádění testu: 2 mm.

Druhý vzorek:

- geometrie: 25 mm,
- velikost mezery během provádění testu: 1 mm.

Nádoby pro provedení zkoušky penetrace jehlou, kroužky a kuličky byly po provedení zkoušek očištěny pomocí tetrachlorethylenu, aby mohly být připraveny pro další použití.

Po provedení zkoušky v DSR byl přebytečný asfalt z použité podložky vyloupnut a podložka tím byla nachystána pro další použití.



Obrázek 21: Extrahované pojivo ze směsi ACO 11+ F – 130 °C + podložka pro vzorky do DSR

4.6. Zkoušky asfaltové směsi

4.6.1. Posouzení nízkoteplotních vlastností s rovnoměrným řízeným poklesem teploty – TSRST dle ČSN EN 12697-46

První provedenou zkouškou u asfaltové směsi bylo stanovení nízkoteplotních vlastností. Postupoval jsem dle normy ČSN EN 12697-46 Asfaltové směsi – Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka – Část 46: Nízkoteplotní vlastnosti a tvorba trhlin pomocí jednoosé zkoušky tahem. Norma popisuje několik zkoušek pro zjištění odolnosti asfaltové směsi vůči tvorbě trhlin za nízkých teplot. V rámci diplomové práce jsem využil zkoušku nízkoteplotních vlastností s rovnoměrným řízeným poklesem teploty – TSRST. [43]

Podstatou zkoušky TSRST je stanovení minimální teploty, kterou je asfaltová směs schopná snést, aniž by došlo k porušení vzorku. Zkušební těleso se zajištěnou konstantní délkou je během zkoušky ochlazováno konstantní rychlostí. Z důvodu zamezení teplotního smršťování díky uchycení vzorku do čelistí dochází ke vzniku tzv. kryogenního napětí uvnitř vzorku. Toto napětí se vzorkem šíří a po dosažení tzv. napětí při porušení dochází k porušení vzorku.

Definice

Kryogenní napětí σ_{cry}

Tahové napětí vyvolané zamezovaným tepelným smrštěním při teplotě T .

Napětí při porušení $\sigma_{cry, failure}$

Kryogenní napětí, které způsobí porušení zkušebního tělesa při zkoušce TSRST.

Teplota při porušení $T_{failure}$

Teplota, při které kryogenní napětí vyvolá porušení zkušebního tělesa při zkoušce TSRST.

Pomůcky a zařízení

Pro provedení zkoušky TSRST jsem využil zkušební zařízení pro stanovení nízkoteplotních vlastností CYKLON – 40, jehož součástí je také temperovací komora pro postupné snižování teploty. Dalšími pomůckami byly čelisti pro uchycení vzorku a snímačů posunu, lepidlo a centrovací rám.



Příprava zkušebních těles

Obrázek 22: Zařízení CYKLON-40

Před samotnou zkouškou TSRST bylo potřeba nachystat si zkušební tělesa (tzv. trámečky). Pro přípravu jsem vzal jednu zkušební desku od každé směsi (viz. kapitola 4.3.2. Příprava těles zhutňovačem desek) a nařezal ji pomocí diamantové pily na 4 zkušební tělesa, na kterých jsem provedl zkoušku. Zbytek obou zkušebních desek jsem si nechal jako rezervu pro případné nařezání náhradních těles. Zkušební těleso

má standardní rozměry 50 mm x 50 mm x 200 mm, kde se délka volí jako čtyřnásobek velikosti šířky/výšky tělesa.

Nařezané vzorky jsem připevnil do čelistí pomocí lepidla z epoxidové pryskyřice a tvrdidla. Následně jsem vzorky umístil do centrovacího rámu, abych zajistil správné vycentrování vzorků. Takto usazené vzorky jsem ponechal v klidu 24 hodin, aby došlo k zatvrdnutí aplikovaného lepidla.



Obrázek 23: Zkušební vzorek v centrovacím rámu

Postup zkoušky

Po zatvrdnutí lepidla jsem zkušební těleso upevnil do zkušebního zařízení CYKLON – 40. Následně jsem k čelistem přilepených ke vzorku připevnil snímače posunu. Po nachystání tělesa jsem pomocí počítačového programu určenému ke zkoušce TSRST zadal rozměry tělesa a nastavil nulovou polohu upevněných snímačů.

Následně jsem mohl začít se samotným zkoušením. Nejprve jsem nechal těleso tzv. kondicionovat při počáteční teplotě T_0 , a to po dobu 15 minut, aby došlo k vyrovnání teplené deformace. Poté jsem začal konstantně snižovat teplotu rychlostí 10 °C/hod, a to do doby, dokud nedošlo díky znemožnění smršťování a následného šíření kryogenního napětí k porušení vzorku. Po porušení jsem zkoušku ukončil a porušený vzorek vyjmul ze zkušebního zařízení.

Výsledkem této zkoušky je protokol se zaznamenanou teplotou při porušení $T_{failure}$ v °C, napětím při porušení $\sigma_{cry,failure}$ v MPa, silou při porušení $F_{cry,failure}$ v kN, počáteční teplotou T_0 v °C a rychlostí řízení teploty dT . Součástí protokolu je také graf znázorňující závislost síly k teplotě. Pro vyhodnocení zkoušky se dělá průměr z výsledků všech zkoušených těles.

4.6.2. Stanovení modulu tuhosti asfaltové směsi dle ČSN EN 12697-26

Jako další zkoušku jsem provedl stanovení modulů tuhosti asfaltových směsí, přičemž jsem postupoval dle normy ČSN EN 12697-26 Asfaltové směsi – zkušební metody pro asfaltové směsi za horka – Část 26: Tuhost. Tato norma popisuje několik zkušebních postupů na různých typech zkušebních těles pro zjištění charakteristik asfaltových směsí. V rámci této práce jsem využil metodu zkoušky ohybem na vetknutém komolém klínu (2PB-TR) dle přílohy A této normy. Mezi další metody patří zkouška tříbodovým nebo čtyřbodovým ohybem, zkouška v příčném tahu, zkouška jednoosým tahem a tlakem a zkouška v přímém tahu. [44]

Podstatou této zkoušky je deformování vzorku definovaného tvaru (u mnou využitě metody se jedná o komolý klín neboli trapezoid) v rozsahu lineárního přetvoření, a to buď při vyvozování stejného zatěžování nebo při zatěžování konstantním přetvořením. Během zkoušky je měřena amplituda napětí a poměrného přetvoření spolu s fázovým úhlem mezi napětím a poměrným přetvořením.

Definice

Komplexní modul E^*

Vztah mezi napětím a přetvořením pro lineárně visko-elastický materiál vystavený vynucenému ustálenému harmonickému zatížení v čase t , s použitím napětí, jehož výsledkem je poměrné přetvoření, které má posun o fázový úhel v porovnání s průběhem napětí.

Komplexní modul se skládá ze dvou složek, a to reálné složky E_1 , která charakterizuje pružné vlastnosti asfaltové směsi, a imaginární složky E_2 , která charakterizuje viskózní vlastnosti asfaltové směsi. Komplexní modul a jeho jednotlivé složky jde vyjádřit dle následujících vzorců:

$$E^* = |E^*| \times (\cos(\Phi) + i \times (\sin(\Phi))) = E_1 + iE_2$$

Rovnice 3: Výpočet komplexního modulu

$$E_1 = |E^*| \times \cos(\Phi) = \gamma * \left(\frac{F}{z} \cos(\Phi) + \frac{\mu}{10^3} * \omega^2 \right)$$

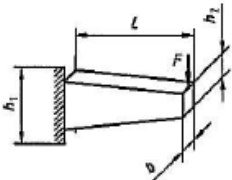
Rovnice 4: Výpočet reálné složky komplexního modulu

$$E_2 = |E^*| \times \sin(\Phi) = \gamma * \left(\frac{F}{z} \sin(\Phi) \right)$$

Rovnice 5: Výpočet imaginární složky komplexního modulu

E^*	je komplexní modul, v MPa,
E_1	je reálná složka komplexního modulu, v MPa,
E_2	je imaginární složka komplexního modulu, v MPa,
Φ	je fázový úhel, ve °,
F	je vyvozená síla, v N,
γ	je faktor tvaru jako funkce velikosti a tvaru zkušebního tělesa
μ	je faktor hmotnosti, který je funkcí hmotnosti zkušebního tělesa

Hodnoty γ a μ jsou dány tvarem zkušební tělesa a způsobem upevnění. Norma uvádí způsob výpočtu těchto hodnot pro mnou využitá zkušební tělesa (2PB-TR), viz následující tabulka:

Druh zatěžování		Faktor tvaru, γ L^{-1}	Faktor hmotnosti, μ
2PB-TR		$\frac{12L^3}{b(h_1 - h_2)^3} \left[\left(2 - \frac{h_2}{2h_1}\right) \frac{h_2}{h_1} - \frac{3}{2} - \ln \frac{h_2}{h_1} \right]$	$0,135 M + m^{a)}$

Tabulka 13: Výpočet tvaru a hmotnosti [44]

Modul tuhosti S

Jedná se o absolutní hodnotu komplexního modulu. Je vyjádřen vzorcem:

$$S = |E^*| = \sqrt{E_1^2 + E_2^2}$$

Rovnice 6: Výpočet modulu tuhosti S

Pomůcky a zařízení

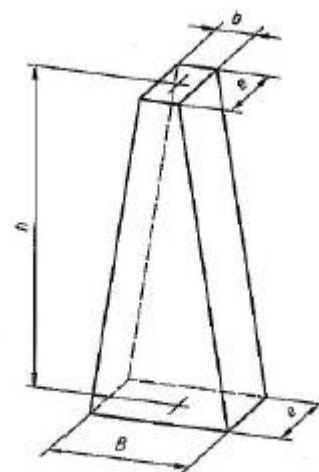
Pro provedení zkoušky jsem použil zkušební zařízení, které umožňuje vyvinout sinusový dynamický průhyb na vrcholu zkušební tělesa. Mezi další zařízení patřila termostatická odvětrávací komora, která umožňovala ustálit okolní teplotu na předepsanou hodnotu po celou dobu zkoušky. Součástí měřicího zařízení byly snímače pro měření dynamické síly, průhybu a fázového úhlu. Jako další pomůcky jsem použil kovové podkladní destičky, háček, lepidlo, váhu s přesností 0,1 g a posuvné měřítko.

Příprava zkušebních těles

Před provedením zkoušky jsem si nachystal zkušební tělesa, tzv. trapezoidy. Vzal jsem tedy 3 zkušební desky od každé směsi (viz. kapitola 4.3.2. Příprava těles zhutňovačem desek) a pomocí diamantové pily nařezal na základě předepsaných rozměrů. Z každé desky jsem nařezal 5 zkušebních vzorků, dohromady tedy 15 vzorků od každé směsi.

Rozměr	[mm]
h	250
b	25
B	70
e	50

Tabulka 14: Rozměry těles pro stanovení modulů tuhosti



Obrázek 24: Rozměry těles pro stanovení modulů tuhosti

Po nařezání bylo potřeba stanovit přesné rozměry a hmotnost všech zkušebních těles. Rozměry jsem stanovil pomocí posuvného měřítka a hmotnost pomocí vázy. Veškeré rozměry a hmotnosti jsem zapsal a jsou uvedeny v Příloze D. Následně jsem tělesa přilepil na kovovou podložku pomocí lepidla z epoxidové pryskyřice a tvrdidla. Stejným způsobem jsem přilepil háček pro uchycení tělesa do měřícího zařízení. Následně jsem nechal lepidlo zatvrdnout po dobu 48 hodin.

Postup zkoušky

Před samotným měřením bylo potřeba vytemperovat zkušební komoru a tělesa na teplotu, při které jsem prováděl zkoušku. V rámci své práce jsem moduly tuhosti měřil při teplotách $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$, $+10\text{ }^{\circ}\text{C}$, $+15\text{ }^{\circ}\text{C}$, $+25\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$, abych mohl pozorovat změny tuhosti visko-elastické asfaltové směsi při jednotlivých teplotách. Po temperování jsem upevnil těleso do zkušebního zařízení. Aby došlo ke správnému provedení zkoušky, bylo potřeba zajistit vetknutí spodní části tělesa do podkladu, čehož bylo dosaženo pomocí kovových destiček, podkladní desky a šroubů. Horní háček jsem upevnil ke zkušebnímu zařízení. Po upevnění tělesa jsem zadal přesné rozměry a hmotnost tělesa do počítačového programu a spustil měření.

Během měření jsem postupně měnil frekvenci zatěžování harmonickou silou, a to 5 Hz, 10 Hz, 15 Hz, 20 Hz, 25 Hz a na závěr opět 5 Hz pro ověření správnosti měření. Po celou dobu měření bylo potřeba kontrolovat teplotu ve zkušební komoře.

Jedná se o nedestruktivní zkoušku, což znamená, že během zkoušení nesmělo dojít k porušení tělesa nebo k jeho vytržení z lepidla.



Obrázek 25: Zařízení pro měření modulů tuhosti

4.6.3. Stanovení odolnosti proti trvalým deformacím – zkouška pojíždění kolem dle ČSN EN 12697-22+A1

Po zjištění nízkoteplotních vlastností a stanovení modulů tuhosti u obou testovaných směsí jsem jako další funkční vlastnost testoval odolnost proti trvalým deformacím. Tuto vlastnost jsem testoval pomocí dvou funkčních zkoušek. U první použité zkoušky, jinak známé jako zkoušky pojíždění kolem, jsem postupoval dle normy ČSN EN 12697-22+A1 Asfaltové směsi – Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka – Část 22: Zkouška pojíždění kolem. Norma popisuje zkušební postupy pro stanovení náchylnosti asfaltových směsí k trvalé deformaci, přičemž je lze použít pro směsi s velikostí zrna ≤ 32 mm. [45]

Podstatou zkoušky je pojíždění zkušebního tělesa kolem zařízení celkem v 10 000 cyklech. Z naměřených hodnot hloubky vyjeté koleje v jednotlivých cyklech se následně vypočítá hodnota přírůstku hloubky vyjeté koleje WTS_{AIR} a poměrná hloubka vyjeté koleje PRD_{AIR} .

Definice

Přírůstek hloubky vyjeté koleje WTS_{AIR}

Jedná se o průměrnou hodnotu, o kterou narůstá hloubka koleje opakovanými pojezdy zatěžovacího kola malého zkušebního zařízení na vzduchu. Lze jej vypočítat následujícím vzorcem:

$$WTS_{AIR} = \frac{d_{10\,000} - d_{5\,000}}{5}$$

Rovnice 7: Výpočet přírůstku hloubky vyjeté koleje WTS_{AIR}

WTS_{AIR} je přírůstek hloubky vyjeté koleje, v mm/10³,

$d_{10\,000}$ je průměrná hloubka vyjeté koleje po 10 000 cyklech, v mm,

$d_{5\,000}$ je průměrná hloubka vyjeté koleje po 5 000 cyklech, v mm.

Poměrná hloubka vyjeté koleje PRD_{AIR}

Jedná se o poměrnou hloubku vyjeté koleje zkoušené asfaltové směsi po N zatěžovacích cyklech malého zkušebního zařízení na vzduchu. Lze jej vypočítat následujícím vzorcem:

$$PRD_{AIR} = \frac{Y_{s,10\,000}}{t} \times 100$$

Rovnice 8: Výpočet poměrné hloubky vyjeté koleje PRD_{AIR}

PRD_{AIR} je poměrná hloubka vyjeté koleje asfaltové směsi na vzduchu po 10 000 cyklech, v %,

$Y_{s,10\,000}$ je hloubka koleje po 10 000 cyklech, v mm,

t je tloušťka zkušebního tělesa, v mm.

Pomůcky a zařízení

Pro provedení zkoušky jsem použil tzv. malé zkušební zařízení, které simuluje pojíždění kolem. Zařízení je tvořeno zatíženým kolem, které pojíždí po zkušební desce,

závažím, stolem pod kolem a dvěma formami o rozměrech 260 x 320 mm. Jako další pomůcky jsem použil sušárnu a podkladní desku.

Příprava zkušebních těles

Pro testování jsem použil jednu zkušební desku od každé směsi o rozměrech 260 x 320 x 40 mm. Výroba zkušebních desek je detailně popsána v kapitole 4.3.2. Příprava těles zhuťovačem desek.

Postup zkoušky

Napřed jsem umístil zkušební těleso do formy tak, aby vrchní strana lícovala s okrajem formy. Poté jsem vložil formu s tělesem vložil do sušárny, kde jsem těleso temperoval na požadovanou teplotu 50 °C, což je teplota stanovená normou ČSN EN 13108-1 Asfaltové směsi – Specifikace pro materiály – Část 1: Asfaltový beton. Temperování probíhá několik hodin, nejméně však 4 hodiny, maximálně 24 hodin. Po vytemperování jsem těleso upevnil do zkušebního zařízení, které jsem také nechal temperovat na teplotu 50 °C. Poté jsem zařízení spustil. Těleso bylo pojížděno kolem zařízení celkem v 10 000 cyklem, tedy dohromady 20 000 pojezdy. Po uběhnutí všech cyklů zkouška byla ukončena. [6]



Obrázek 26: Malé zkušební zařízení

Výsledkem zkoušky byly údaje o hloubce vyjeté koleje a aktuální teploty zařízení v každém cyklu, které jsem využil k výpočtu WTS_{AIR} a PRD_{AIR} , které jsem následně porovnal s požadovanými hodnotami, které jsou dány normou ČSN uvedenou v předchozím odstavci.

4.6.4. Stanovení odolnosti proti trvalým deformacím – cyklická zkouška v tlaku v triaxiálním přístroji dle ČSN EN 12697-25

Po provedení zkoušky pojíždění kolem jsem provedl druhou zkoušku pro stanovení odolnosti proti trvalým deformacím. U této zkoušky jsem postupoval dle normy ČSN EN 12697-25 Asfaltové směsi – Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka – Část 25: Cyklická zkouška v tlaku. Tato norma popisuje dvě metody zkoušení, a to zkoušku v tlaku v jednoosém přístroji s omezením a zkoušku v tlaku v triaxiálním přístroji. V rámci své diplomové práce jsem postupoval dle metody B, tedy provedl jsem zkoušku v tlaku v triaxiálním přístroji. [37]

Podstatou této zkoušky je zjištění odolnosti vůči trvalé deformaci válcového zkušebního tělesa cyklickým zatěžováním (v rámci testování jsem použil tzv. Marshallova tělesa). Temperované zkušební těleso je vystaveno působení komorového tlaku σ_c , kterému předchází cyklický axiální tlak σ_a .

Definice

Cyklický axiální tlak $\sigma_a(t)$

Jedná se o zatížení ve směru osy zkušebního tělesa, které je vyvozeno zkušebním zařízením.

Komorový tlak σ_c

Jedná se o tlak vyvíjený vodou ve zkušebním zařízení na zkušební těleso.

Celkový tlak $\sigma_A(t)$

Kombinace cyklického axiálního a komorového tlaku. Silniční laboratoř VUT v Brně disponuje zkušebním zařízením vyvolující cyklické zatížení pulzy s časovou prodlevou $\sigma_a(t)$, s velikostí σ_B , celkový tlak $\sigma_A(t)$ je tedy definován vzorcem:

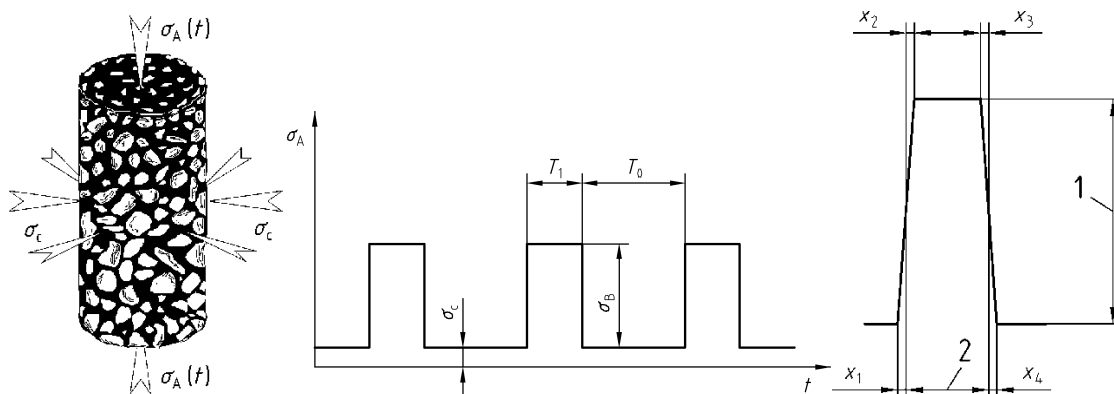
$$\sigma_A = \sigma_a(t) + \sigma_c$$

Rovnice 9: Výpočet celkového tlaku $\sigma_A(t)$

σ_c komorový tlak, v kPa,

$\sigma_a(t)$ - σ_B během doby cyklu s časovou prodlevou T_1 , v kPa,
- 0 během doby prodlevy T_0 , v kPa,

σ_B výška pulzu s časovou prodlevou, v kPa.



Obrázek 27: Znázornění tlaků působících na zkušební těleso v případě použití cyklického zatížení pulzy s časovou prodlevou [37]

Legenda:

σ_A celkový axiální tlak $\sigma_A(t)$,
 t čas,
 T_1 doba trvání pulzu,

T_0 doba prodlevy,
1 zatížení,
2 doba trvání pulzu.

Kumulativní přetvoření ε_n

Přetvoření zkušebního tělesa v procentech pro každé měřené použití zatížení. Je definováno rovnicí:

$$\varepsilon_n = 100 \times (h_0 - h_n)/h_0$$

Rovnice 10: Výpočet kumulativního přetvoření ε_n

- ε_n kumulativní axiální přetvoření zkušební tělesa po n zatíženích, v %,
 h_0 průměrná výška po předběžném zatížení zkušební tělesa, v mm,
 h_n průměrná výška po n zatíženích, v mm.

Křivka dotvarování

Křivka, která udává hodnotu kumulativního axiálního přetvoření zkušební tělesa v procentech. Jedná se o funkci počtu zatěžovacích cyklů.

Pomůcky a zařízení

Pro provedení zkoušky jsem použil zkušební zařízení vyvolující cyklické zatížení pulzy, které se skládá ze dvou ocelových zatěžovacích desek, tlakové komory, snímačů posunu, kompresoru a řídicího systému, který řídí komorové a cyklické axiální namáhání. Dále jsem použil membránu, která bránila vniku vody z tlakové komory do zkušební tělesa.

Příprava zkušebních těles

Pro provedení cyklické zkoušky v tlaku jsem využil tzv. Marshallova tělesa. Použil jsem od každé směsi 3 tělesa, dohromady tedy 6 zkušebních těles. Výroba zkušebních těles je popsána v kapitole 4.3.1. Příprava těles rázovým zhutňovačem.

Postup zkoušky

Nejprve jsem si nachystal zkušební Marshallova tělesa. Těleso jsem uložil do zkušebního zařízení a na něj nasadil membránu, která bránila vniku vody z tlakové komory do zkušební tělesa. Následně jsem na těleso umístil ocelovou zatěžovací desku, přes kterou byl na těleso vyvíjen axiální tlak. Po přetáhnutí membrány i přes ocelovou desku jsem membránu zatěsnil pomocí pružných kroužků. Po uložení vzorku jsem umístil snímače posunu, složil dohromady zbytek přístroje a tlakovou komoru naplnil vodou tak, aby bylo celé těleso pod vodou. Komoru jsem poté natlakoval a začal temperovat na požadovanou teplotu zkoušení 50 °C. Během ohřívání vody se mi postupně temperovalo také těleso.

Po vytemperování komory a vzorku jsem začal se samotným zkoušením. Zkušební zařízení postupně zatěžovalo a odtěžovalo zkušební těleso, což vytvořilo jeden zkušební cyklus. Celkově zkouška trvala 10 000 cyklů, přičemž při každém cyklu byly snímány a zaznamenávány deformace tělesa.

Po ukončení zkoušky jsem odčerpával vodu, zařízení rozložil a zkontroloval, zda nedošlo k porušení membrány a ke vzorku se nedostala voda. Když bylo těleso bez kontaktu s vodou, byla zkouška úspěšně provedena a já vyhodnotil naměřené výsledky.



Obrázek 28: Triaxiální přístroj

4.7. Zkoušky asfaltového pojiva

4.7.1. Stanovení penetrace jehlou dle ČSN EN 1426

Jako první empirickou zkoušku na asfaltovém pojivu jsem provedl stanovení penetrace jehlou. Během zkoušení jsem postupoval dle normy ČSN EN 1426 Asfalty a asfaltová pojiva – Stanovení penetrace jehlou. [40]

Podstatou zkoušky je vyjádření konzistence vzorku materiálu jako hloubka v desetinách milimetru, do které svisle vnikne normalizovaná jehla za stanovených podmínek teploty. Jedná se o základní parametr hodnocení jakosti asfaltů.

Definice

Penetrační jednotka

Jedná se o základní jednotku pro stanovení hodnoty penetrace. Penetrační jednotka je rovna jedné desetině milimetru.

$$1 \text{ p.j.} = 0,1 \text{ mm}$$

Rovnice 11: Vyjádření penetrační jednotky

Pomůcky a zařízení

Pro stanovení penetrace jehlou jsem použil penetrometr s normalizovanou jehlou o průměru 1 mm, která má zkosený hrot ve tvaru kužele s průměrem 0,14 až 0,16 mm, a zařízením pro odečtení hloubky vpichu. Jako další pomůcky jsem použil kovovou nádobu, do které jsem si odlil asfaltové pojivo pro provedení vzorku a vodní lázeň, kde jsem pojivo temperoval.

Příprava zkušebních vzorků

Pro provedení stanovení penetrace jehlou jsem si odlil asfaltové pojivo do nádoby z baňky destilačního zařízení během extrakce pojiva. Extrakce pojiva je detailně popsána v kapitole 4.4. Extrakce asfaltového pojiva a nachystání vzorků je dále popsáno v kapitole 4.5. Nachystání vzorků pro zkoušky asfaltového pojiva.



Obrázek 29: Nádoba s asfaltovým pojivem

Postup zkoušky

Nejprve jsem zkušební vzorek, který byl zchlazený na laboratorní teplotu, nechal temperovat ve vodní lázni na teplotu $25\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0,15\text{ }^{\circ}\text{C}$ po dobu cca 2 hodin. Během temperování musel být vzorek zcela ponořen ve vodě. Po temperování jsem vzorek vyjmul a ve větší nádobě přenesl k penetrometru (vzorek musí být stále zcela ponořen ve vodě). Po usazení do zařízení jsem k povrchu hladiny vzorku přiblížil očištěnou penetrační jehlu. Po uvolnění jehly, která vyvozuje na zkušební vzorek zatížení $100\text{ g} \pm 0,1\text{ g}$, byl hrot jehly zatlačován do zkušebního vzorku po dobu 5 sekund. Po uplynutí této doby byla odečtena hodnota penetrace.

Penetrace musí být v rámci zkoušení na zkušebním vzorku provedena třikrát. Místa penetrování musí být minimálně 10 mm od okraje nádoby se vzorkem a minimálně 10 mm od sebe.



Obrázek 30: Penetrometr

Výsledkem zkoušky jsou 3 zjištěné hodnoty penetrace jehlou. Z těchto hodnot se vypočte aritmetický průměr, který se zaokrouhlí na nejbližší celou penetrační jednotku (0,1 mm).

4.7.2. Stanovení bodu měknutí metodou kroužek a kulička dle ČSN EN 1427

Druhá empirická zkouška, kterou jsem provedl, bylo stanovení bodu měknutí. Postupoval jsem dle normy ČSN EN 1427 Asfalty a asfaltová pojiva – Stanovení bodu měknutí – Metoda kroužek a kulička. [41]

Podstatou zkoušky je stanovení bodu měknutí, tedy teploty, při které se vrstva asfaltového pojiva o tl. 6,4 mm, která vyplňuje kroužek pod vlivem zatížení kuličkou protáhne na délku 25 mm. Metoda se dá použít pro pojiva o bodu měknutí od $28\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $150\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Definice

Bod měknutí

Jedná se o teplotu, za kterou přechází asfaltové pojivo do tekutého stavu. Bod měknutí nám určuje horní mez oboru použitelnosti asfaltových pojiv (visko-elastické vlastnosti asfaltu jsou popsány v kapitole 2.2.1. Asfaltová pojiva).

Kapalinová lázeň

Tekutina, do které jsou ponořené zkušební vzorky při provádění testu kroužek – kulička. V následující tabulce je uvedené, jaký typ kapaliny volit, při konkrétním bodu měknutí.

Bod měknutí	Kapalinová lázeň	Počáteční teplota lázně
$\leq 80\text{ }^{\circ}\text{C}$	vodní lázeň	$(5 \pm 1)\text{ }^{\circ}\text{C}$
$> 80\text{ }^{\circ}\text{C}$	glycerin	$(30 \pm 1)\text{ }^{\circ}\text{C}$

Tabulka 15: Kapalinová lázeň pro stanovení bodu měknutí [41]

Pomůcky a zařízení

Pro provedení zkoušky jsem použil automatické zařízení opatřené topnou deskou, které postupně zahřívalo zkušební vzorek a snímalo teplotu a propad asfaltového pojiva. Dále jsem použil odlévací destičku, dva mosazné kroužky a dvě kuličky z korozivzdorné oceli, které byly umístěny do středících prstenců. Mezi další pomůcky patří kádinka s tekutinou a míchadlo, které bylo během provádění testu umístěno do kádinky.

Příprava zkušebních vzorků

Pro stanovení bodu měknutí jsem si odlil asfaltové pojivo do dvou mosazných kroužků z baňky destilačního zařízení během extrakce pojiva. Před zahájením zkoušky jsem odstranil přebytečný asfalt pomocí špachtle tak, aby byl povrch vzorku zarovnan s kroužkem. Extrakce pojiva je detailně popsána v kapitole 4.4. Extrakce asfaltového pojiva a nachystání vzorků je dále popsáno v kapitole 4.5. Nachystání vzorků pro zkoušky asfaltového pojiva.

Postup zkoušky

Mosazné kroužky s asfaltovým pojivem jsem vložil do otvorů nerezového stojanu a opatřil je středícími prstenci. Následně jsem celou soustavu vložil do kádinky s vodní lázní (u testovaného silničního asfaltu 50/70 bod měknutí dosahuje nižších hodnot, než $80\text{ }^{\circ}\text{C}$) a nechal ji zchladit na teplotu $5\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ po dobu 15 minut. Po zchlazení jsem umístil do středících prstenců kuličky a celou soustavu vložil do zkušebního zařízení.

Následně jsem začal s testováním. Během provádění zkoušky se rovnoměrně zvyšuje teplota rychlostí $5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$. Aby bylo zajištěno rovnoměrné zahřívání celé kádinky, je v kádince umístěno magnetické míchadlo. Se zvyšující se teplotou se začaly projevovat viskoelastické vlastnosti asfaltového pojiva a pod tíhou ocelové kuličky se pojivo začalo protahovat. Po protáhnutí pojiva



Obrázek 31: Zařízení pro stanovení bodu měknutí metodou kroužek a kulička

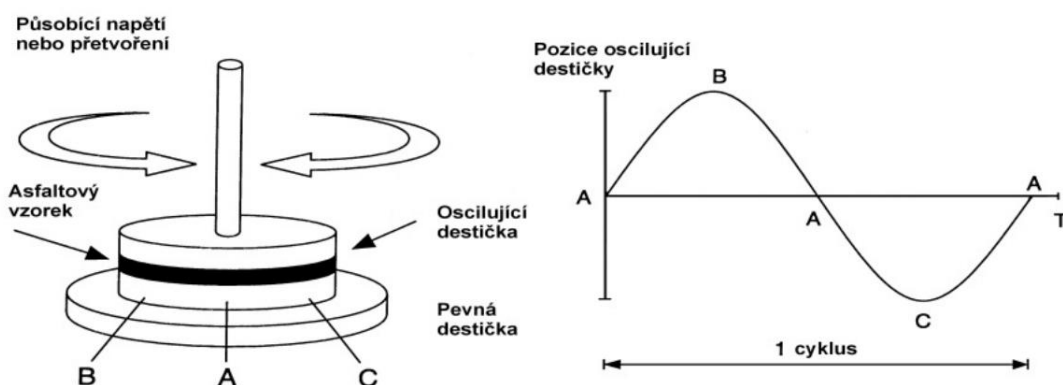
na délku $25 \text{ mm} \pm 4 \text{ mm}$ je zkouška ukončena. Zařízení pomocí světelného paprsku zaznamená danou délku a zároveň zaznamená teplotu.

Výsledkem zkoušky jsou dvě zaznamenané teploty, při kterých došlo k protáhnutí dvou testovaných vzorků na délku $25 \text{ mm} \pm 4 \text{ mm}$. Z těchto dvou teplot je vypočítán aritmetický průměr, který nám dává bod měknutí testovaného pojiva.

4.7.3. Stanovení komplexního modulu ve smyku a fázového úhlu dle ČSN EN 14770

Jako funkční zkoušku jsem na asfaltovém pojivu provedl stanovení komplexního modulu ve smyku a fázového úhlu. Během měření jsem postupoval dle normy ČSN EN 14770 Asfalty a asfaltová pojiva – Stanovení komplexního modulu ve smyku a fázového úhlu – Dynamický smykový reometr. [42]

Podstatou zkoušky, jak je patrné z názvu normy, je zjištění komplexního modulu ve smyku G^* a fázového úhlu δ . Asfaltové pojivo je umístěno mezi pevnou a oscilující destičkou. Při provádění zkoušky vzniká točivý moment, který namáhá zkušební vzorek sinusovým zatížením (oscilací), které odpovídá zatěžování vozovky. Měří se odezva deformace pojiva na působící napětí. Pro měření byly použity dvě geometrie asfaltového pojiva o průměru 8 mm a 25 mm. Měření bylo provedeno na dynamickém smykovém reometru (DSR).



Obrázek 32: Podstata fungování DSR [46]

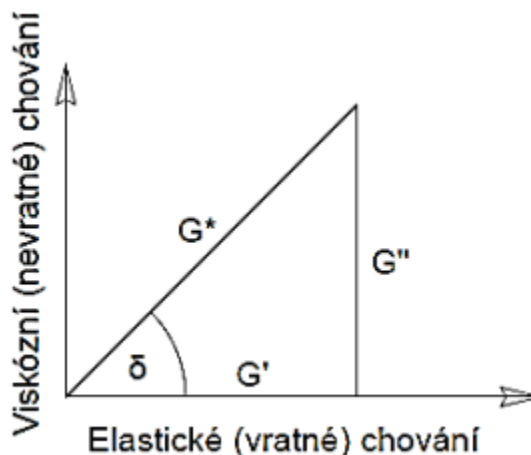
Definice

Komplexní smykový modul G^*

Komplexní smykový modul nám vyjadřuje celkový odpor asfaltového pojiva, který je vystaven opakujícímu se smykovému napětí. Skládá se ze dvou složek, a to z reálné složky G' , která nám definuje elastické chování pojiva, a z imaginární složky G'' , která definuje viskózní chování pojiva. Vzájemný poměr těchto dvou složek určuje fázový úhel δ . Vztah mezi jednotlivými složkami je dán následujícím vzorcem a grafem:

$$G^* = \sqrt{G'^2 + G''^2}$$

Rovnice 12: Výpočet komplexního smykového modulu G^*



Graf 12: Složky komplexního smykového modulu [47]

- G^* komplexní smykový modul, v kPa,
- G' reálná složka komplexního smykového modulu, v kPa,
- G'' imaginární složka komplexního smykového modulu, v kPa,
- δ fázový úhel, ve $^\circ$.

Hodnoty smykového modulu vyjadřují visko-elastické chování asfaltového pojiva. Čím vyšší je teplota zkoušeného vzorku, tím se stává pojivo viskóznější a smykový modul nabývá nižších hodnot. Hodnota modulu také závisí na frekvenci zatížení, přičemž při nižších frekvencích nabývá modul nižších hodnot a při vyšších frekvencích vyšších hodnot.

Komplexní smykový modul se dá také vyjádřit jako poměr maximálního napětí k maximální deformaci, dá se tedy vyjádřit vzorcem:

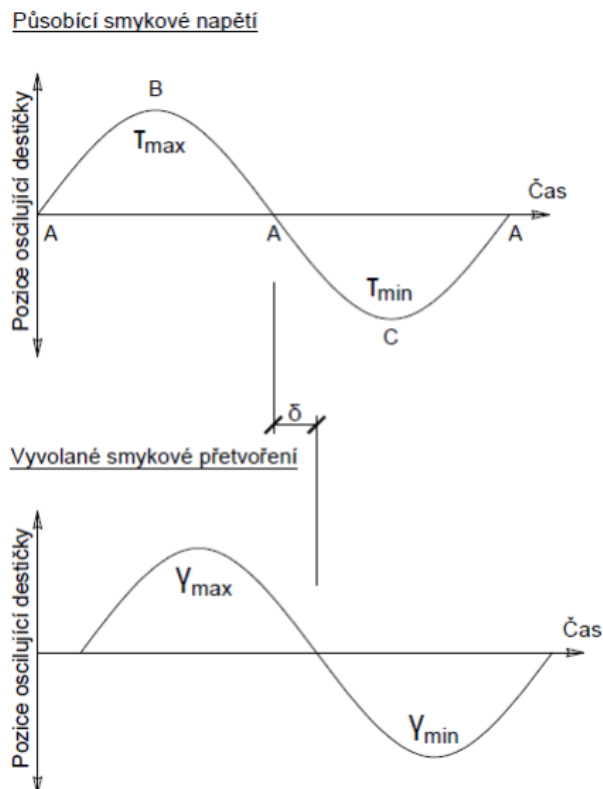
$$G^* = \frac{\tau_{max}}{\gamma_{max}}$$

Rovnice 13: Poměr maximálního napětí k maximální deformaci

- τ_{max} maximální smykové napětí, v kPa,
- γ_{max} maximální smyková deformace.

Fázový úhel δ

Jedná se o fázový rozdíl mezi napětím a deformací během oscilace. Jelikož asfaltové pojivo není dokonale pružný materiál, dochází během zatěžování k časovému posunu mezi smykovým napětím a smykovou deformací. Tento časový posun je vyjádřen fázovým úhlem, což je znázorněno v následujícím grafu:



Graf 13: Rozdíl mezi smykovým napětím a smykovým přetvořením [47]

Jak je uvedeno u komplexního smykového modulu, fázový úhel nám definuje poměr mezi reálnou a imaginární složkou smykového modulu. Pokud se pohybujeme v nízkých teplotách, asfaltové pojivo je pružné (dominantní složkou smykového modulu je jeho reálná složka G') a fázový úhel se blíží 0° . Pokud pojivo zahřejeme na vysokou teplotu, stává se pojivo viskózním (dominantní složkou se stává imaginární složka G'') a fázový úhel se blíží k 90° .

Pomůcky a zařízení

Pro provedení zkoušky jsem použil dynamický smykový reometr (DSR) Kinexus, jehož součástí byla pevná a oscilující destička vyvíjející sinusové zatížení. Jako další pomůcky jsem použil podložku na odlití zkušebních vzorků a špachtli na odřezání přebytečného asfaltu vloženého do DSR.

Příprava zkušebních vzorků

Nejprve jsem si nadehřál nádobu s extrahovaným asfaltovým pojivem, které jsem použil při stanovení penetrace jednou (tato zkouška je popsána v kapitole 4.7.1.). Z rozehrátého asfaltu jsem si následně odlil vzorky pro provedení zkoušky. Pro provedení vzorků o správných rozměrech jsem použil podložku určenou pro přípravu vzorků na zkoušky v DSR. Extrakce pojiva je detailně popsána v kapitole 4.4. Extrakce asfaltového pojiva a nachystání vzorků je dále popsáno v kapitole 4.5. Nachystání vzorků pro zkoušky asfaltového pojiva.

Postup zkoušky

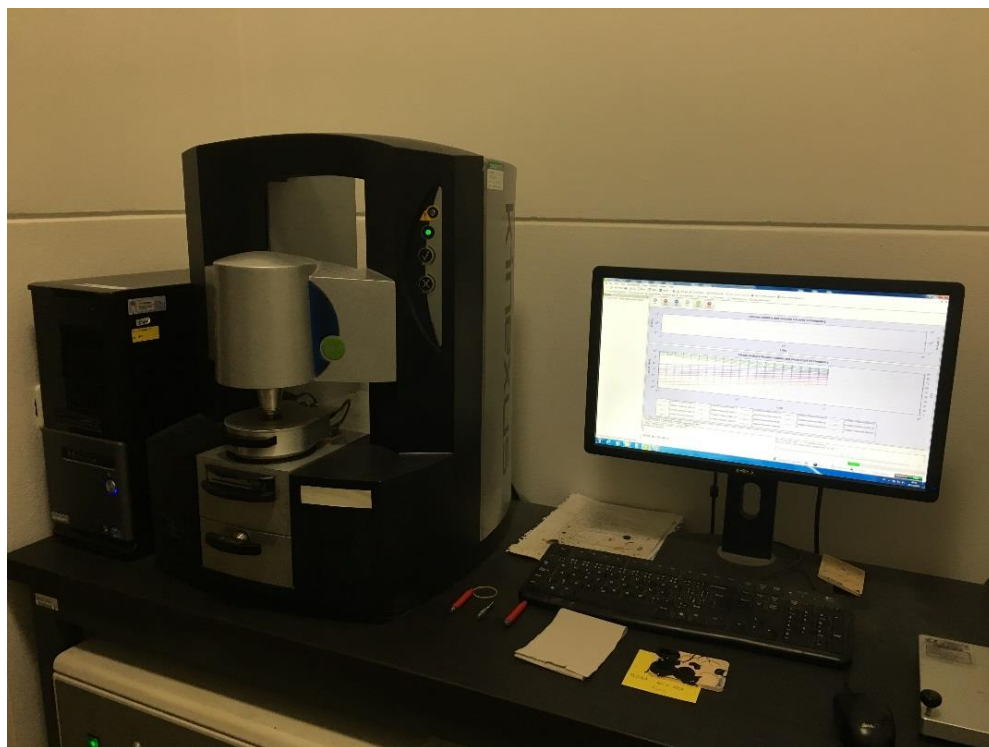
Aby byly dobře vystihnuty vlastnosti asfaltového pojiva, byla zkouška rozdělena na dvě části. Pro první část byla použita geometrie 25 mm a velikost mezery 1 mm. V této části byla provedena zkouška při teplotách 40 °C, 45 °C, 50 °C, 55 °C, 60 °C, 65 °C a 70 °C. Pro druhou část byla použita geometrie 8 mm a velikost mezery 2 mm. Menší geometrie byla použita pro provedení zkoušky při teplotách 10 °C, 15 °C, 20 °C, 25 °C, 30 °C, 35 °C a 40 °C.

Před samotným měřením byla provedena temperace geometrie na teplotu cca o 5 stupňů vyšší, než byla počáteční teplota zkoušení (jelikož jsem začínal geometrií 25 mm, byla počáteční teplota zkoušení 70 °C). Temperování na vyšší teplotu, než byla zkušební teplota, bylo provedeno z důvodu ochlazení geometrie během vkládání zkušební vzorku.

Po vytemperování jsem mezi destičky reometru umístil zkušební vzorek. Vzorek byl reometrem stlačen na požadovanou tloušťku, přičemž přebytečný asfalt jsem odstranil pomocí nahřáté špachtle. Po ustálení zkušební teploty se spustilo samotné zkoušení pojiva. Měření probíhalo sestupně při frekvencích od 10 Hz do 0,1 Hz. Následně se teplota snížila o 5 °C a proběhlo měření o stejném frekvenčním rozsahu. Stejným způsobem zkouška probíhala, dokud teplota nedosáhla nejnižší zkušební teploty (u geometrie 25 mm 40 °C). Po ukončení zkoušky se geometrie natemperovala na teplotu cca 130 °C, aby bylo možné obě destičky vyčistit od asfaltového pojiva.

Po provedení zkoušky na geometrii 25 mm jsem provedl zkoušku na geometrii 8 mm. Zkouška proběhla stejným způsobem, rozdílná byla pouze šířka mezery a teploty zkoušení.

Výsledkem zkoušky byla tabulka s vypočítanými hodnotami komplexních smykových modulů a jejich reálných a imaginárních částí a s hodnotami fázových úhlů.



Obrázek 33: Dynamický smykový reometr (DSR)

4.8. Výsledky zkoušek

4.8.1. Vyrobené vzorky pro provádění zkoušek

4.8.1.1. Vzorky vyrobené rázovým zhutňovačem dle ČSN EN 12697-30+A1

Před samotným prováděním zkoušek bylo potřeba vyrobit zkušební vzorky. Pro posouzení tvorby trvalých deformací pomocí cyklické zkoušky v tlaku v triaxiálním přístroji jsem vyrobil tzv. Marshallova tělesa pomocí rázového zhutňovače. Postup výroby je popsán v kapitole 4.3.1.

Po výrobě jsem u všech těles změřil objemovou hmotnost a s pomocí získané maximální objemové hmotnosti jsem vypočítal mezerovitost vyrobených těles. Zjištěné objemové hmotnosti a mezerovitosti jsou uvedeny v následující tabulce:

-	Objemová hmotnost [kg/m ³]	Mezerovitost [%]
150 °C	2408,6	2,0
130 °C	2404,3	2,1

Tabulka 16: Stanovení objemové hmotnosti a mezerovitosti Marshallových těles

Mezerovitosti Marshallových těles vyšly v rozmezí daném normou ČSN EN 13108-1 pro kontrolní zkoušky, tedy 2,0 – 6,0 %.

Tabulka uvádí aritmetické průměry objemových hmotností zhotovených těles. Naměřené hodnoty pro všechna vyrobená tělesa jsou uvedeny v Příloze A.



Obrázek 34: Marshallova tělesa směsi ACO 11+ F – 130 °C



Obrázek 35: Vzorek uložený v triaxiálním přístroji

4.8.1.2. Vzorky vyrobené zhutňovačem desek dle ČSN EN 12697-33+A1

Pro stanovení nízkoteplotních vlastností, modulů tuhosti a odolnosti proti trvalým deformacím zkouškou pojíždění kolem bylo potřeba vyrobit zkušební desky pomocí zhutňovače desek. Výroba zkušebních desek je popsána v kapitole 4.3.2. Pro stanovení nízkoteplotních vlastností a modulů tuhosti bylo potřeba tyto desky nařezat pomocí diamantové pily na určené zkušební vzorky. Tvary zkušebních vzorků jsou popsány v příslušných kapitolách popisující jednotlivé postupy zkoušek.

Byly vyrobeny zkušební desky o tloušťce 40 mm a 50 mm. Po výrobě jsem u každé desky zjišťoval objemovou hmotnost, kterou jsem porovnával s objemovou hmotností získanou od firmy COLAS CZ. Výsledkem byla zjištěná míra zhutnění, která musela být v rozmezí 99–101 %. Dále jsem zjištěnou objemovou hmotnost porovnával s maximální objemovou hmotností, rovněž získanou od firmy COLAS CZ, abych stanovil mezerovitost všech vyrobených desek, která musela být v rozmezí 2,5–4,5 %.

Následující tabulka udává základní informace o všech vyrobených zkušebních deskách.

ACO 11+ F - zkušební desky					
Deska	Tloušťka	Míra zhutnění	Mezerovitost	Obj. hmotnost	Prováděná zkouška
-	[mm]	[%]	[%]	[kg/m ³]	-
150 °C					
150.1	50,2	99,8%	2,5	2396,4	Modul tuhosti
150.2	50,3	99,2%	3,1	2380,3	Modul tuhosti
150.3	50,2	99,5%	2,8	2388,5	Nízkoteplotní vlastnosti
150.4	50,2	98,5%	3,7	2365,1	-
150.5	50,1	99,1%	3,2	2379,3	Modul tuhosti
150.6	40,1	99,7%	2,6	2392,6	Trvalé deformace
130 °C					
130.1	50,1	99,8%	2,5	2395,0	Modul tuhosti
130.2	50,1	99,8%	2,5	2396,4	Modul tuhosti
130.3	50,3	99,4%	2,9	2385,3	Modul tuhosti
130.4	50,1	99,5%	2,8	2387,7	Nízkoteplotní vlastnosti
130.5	40,1	98,8%	3,5	2370,2	-
130.6	40,1	99,7%	2,6	2392,1	Trvalé deformace

Tabulka 17: Vyrobené zkušební desky

Desky 150.4 a 130.5 jsem vyřadil a místo nich vyrobil nové zkušební desky. Ačkoliv mezerovitost u těchto desek je v požadovaném rozmezí, nevychází zde při porovnání se získanou objemovou hmotností z obalovny míra zhutnění. Tento fakt znamená, že vyšší mezerovitost je způsobena nedostatečným zhutněním, což by mohlo negativně ovlivnit prováděné zkoušky. Z tohoto důvodu jsem desky ke zkoušení nepoužil.

V tabulce jsou zaznamenány pouze základní informace použité pro posuzování. Kompletní informace o všech vyrobených tělesech jsou uvedeny v Příloze B.

4.8.2. Posouzení nízkoteplotních vlastností dle ČSN EN 12697-46

Jako první zkoušku na asfaltové směsi jsem provedl zkoušku nízkoteplotních vlastností. Postup zkoušky je detailně popsán v kapitole 4.6.1. Zkouška nízkoteplotních vlastností s rovnoměrným řízeným poklesem teploty – TSRST.

Zkoušku jsem prováděl u obou testovaných směsí, tedy u směsi míchané a hutněné při teplotě 150 °C a 130 °C. Od každé směsi jsem testoval 4 zkušební vzorky o rozměrech 50 x 50 x 200 mm získané ze ztuhlé zkušební desky. Postup přípravy zkušebního tělesa je rovněž popsán v kapitole 4.6.1.

Během testování jsem u každého vzorku zjišťoval napětí při porušení, sílu při porušení, teplotu ve zkušebním zařízení a teplotu vzorku při porušení. Po ukončení měření jsem zprůměroval získané hodnoty od každé směsi a výsledky vynesl do grafu a vzájemně porovnal.

Následující tabulky uvádějí naměřené hodnoty od obou testovaných směsí:

ACO 11+ F - 150 °C					
Charakteristika	Jednotky	Číslo vzorku			
		150.3.1	150.3.2	150.3.3	150.3.4
Síla při porušení	[kN]	8,09	8,11	8,33	9,00
Napětí při porušení	[Mpa]	3,24	3,25	3,33	3,60
Teplota vzorku při porušení	[°C]	-15,8	-16,0	-16,9	-17,4
Teplota v komoře při porušení	[°C]	-18,9	-19,0	-20,0	-20,3

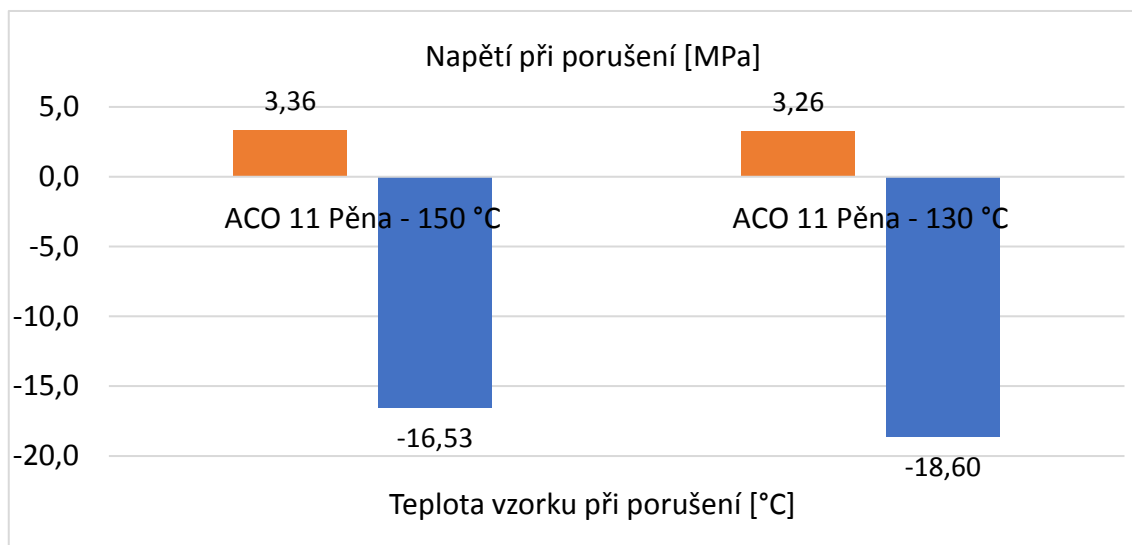
Tabulka 18: Výsledky zkoušky nízkoteplotních vlastností u směsi 150 °C

ACO 11+ F - 130 °C					
Charakteristika	Jednotky	Číslo vzorku			
		130.4.1	130.4.2	130.4.3	130.4.4
Síla při porušení	[kN]	8,05	8,50	10,10	7,89
Napětí při porušení	[Mpa]	3,22	3,40	4,04	3,16
Teplota vzorku při porušení	[°C]	-18,1	-18,8	-19,9	-18,9
Teplota v komoře při porušení	[°C]	-21,4	-22,3	-23,3	-21,9

Tabulka 19: Výsledky zkoušky nízkoteplotních vlastností u směsi 130 °C

Z tabulky 19 je patrné, že jsem vzorek 130.4.3 vyřadil z výsledného vyhodnocení zkoušky. Na první pohled jde vidět, že tento vzorek svými výsledky síly a napětí při porušení vybočuje v porovnání s ostatními vzorky směsi 130 °C. Norma ČSN EN 12697-46 udává, že měřené vzorky se nesmí od sebe lišit o více než 2 °C, co se týká teploty při porušení, a o více než 0,5 MPa, co se týká napětí při porušení. Vzorek 130.4.3. nevyhovuje na podmínku shodnosti napětí při porušení, proto jsem vzorek vyřadil. [43]

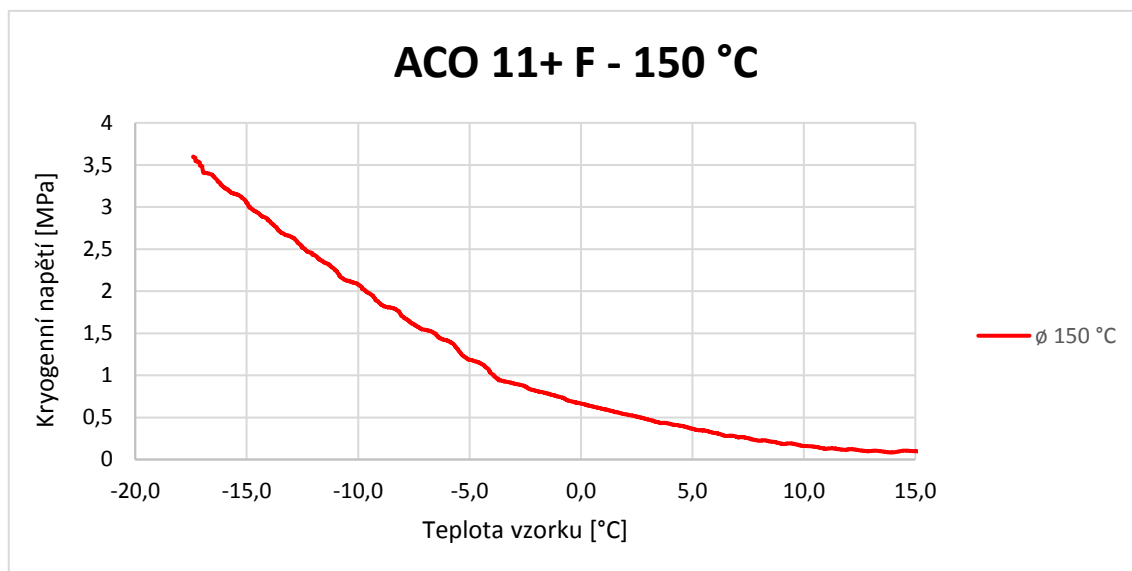
Po ověření jednotlivých vzorků v rámci jedné směsi jsem výsledky zprůměroval a navzájem porovnal. V následujícím grafu jsou porovnány teploty při porušení a napětí při porušení obou testovaných směsí.



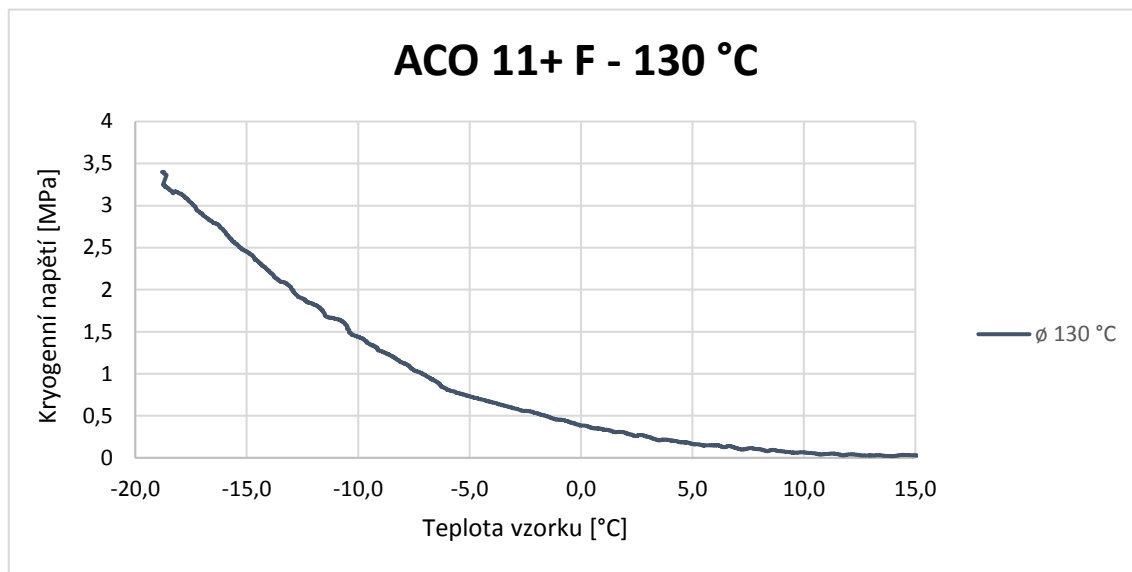
Graf 14: Porovnání výsledků zkoušky nízkoteplotních vlastností

Z grafu je patrné, že rozdíl v napětí při porušení je 0,1 MPa a rozdíl v teplotě při porušení jsou cca 2 °C. Jde vidět, že směs míchaná a hutněná při teplotě 130 °C byla porušena při nižší teplotě, než směs míchaná a hutněná při teplotě 150 °C. Tyto výsledky mohly být způsobeny tím, že u směsi 130 °C došlo díky nižší pracovní teplotě k menšímu zestárnutí asfaltového pojiva, než u směsi 150 °C (tuto teorii jsem následně ověřoval během testování asfaltového pojiva). Můžeme tedy konstatovat, že nižší pracovní teplota negativně neovlivnila nízkoteplotní vlastnosti směsi.

Následující grafy znázorňují průběh kryogenního napětí obou testovaných směsí. Jedná se o zprůměrované hodnoty. Protokoly k jednotlivým zkoušeným vzorkům jsou uvedeny v Příloze C.



Graf 15: Průběh kryogenního napětí směsi 150 °C



Graf 16: Průběh kryogenního napětí směsi 130 °C



Obrázek 36: Porušený vzorek po stanovení nízkoteplotních vlastností

4.8.3. Stanovení modulů tuhosti dle ČSN EN 12697-26

Po měření nízkoteplotních vlastností jsem jako druhou funkční zkoušku provedl stanovení modulů tuhosti. Postup zkoušky je detailně popsán v kapitole 4.6.2. Zkoušku jsem provedl na 15 zkušebních tělesech od každé směsi, dohromady tedy na 30 zkušebních tělesech. Zkušební tělesa byla nařazena pomocí diamantové pily ze zkušebních desek vyrobených lamelovým zhutňovačem.

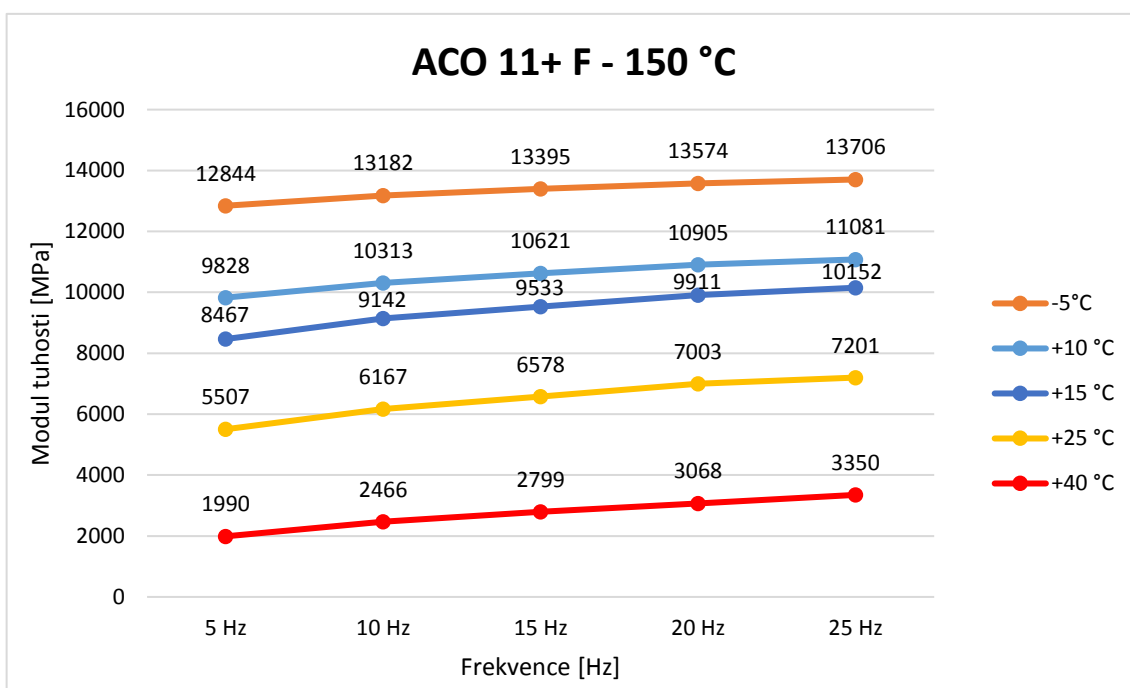
Naměřené výsledky

Měření bylo provedeno na obou zkoušených směsích, tedy směsích ACO 11+ F míchaných a hutněných při teplotách 150 °C a 130 °C. Vzorky byly zkoušeny při frekvencích 5 Hz, 10 Hz, 15 Hz, 20 Hz a 25 Hz při teplotách -5 °C, 10 °C, 15 °C, 25 °C a 40 °C.

Naměřené moduly tuhosti u směsi ACO 11+ F – 150 °C:

Hodnoty modulů tuhosti [MPa]						
ACO 11+ F - 150 °C		Frekvence [Hz]				
		5	10	15	20	25
Teplota [°C]	-5	12844	13182	13395	13574	13706
	10	9828	10313	10621	10905	11081
	15	8467	9142	9533	9911	10152
	25	5507	6167	6578	7003	7201
	40	1990	2466	2799	3068	3350

Tabulka 20: Hodnoty modulů tuhosti u směsi 150 °C

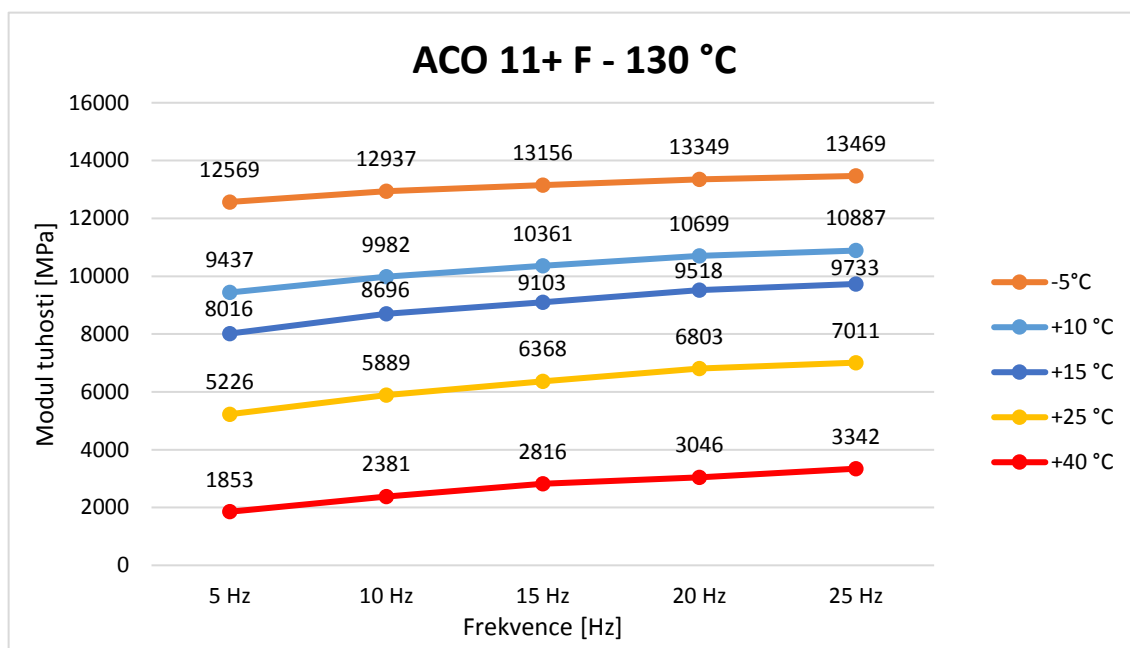


Graf 17: Hodnoty modulů tuhosti u směsi 150 °C

Naměřené moduly tuhosti u směsi ACO 11+ F – 130 °C:

Hodnoty modulu tuhosti [MPa]						
ACO 11+ F - 130 °C		Frekvence [Hz]				
		5	10	15	20	25
Teplota [°C]	-5	12569	12937	13156	13349	13469
	10	9437	9982	10361	10699	10887
	15	8016	8696	9103	9518	9733
	25	5226	5889	6368	6803	7011
	40	1853	2381	2816	3046	3342

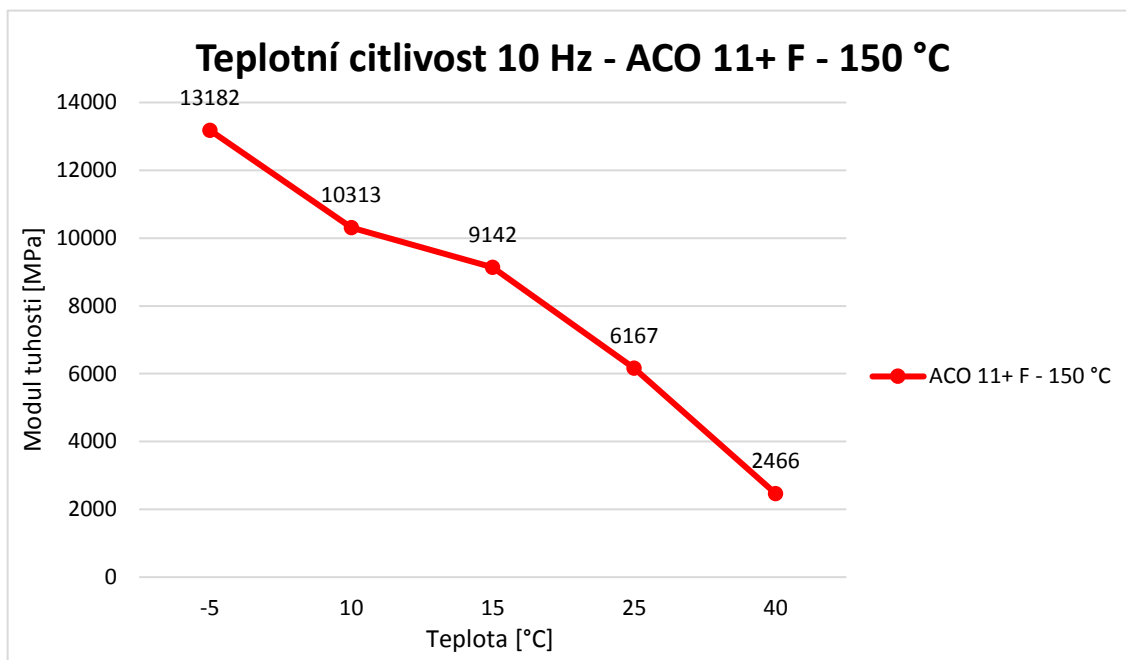
Tabulka 21: Hodnoty modulů tuhosti u směsi 130 °C



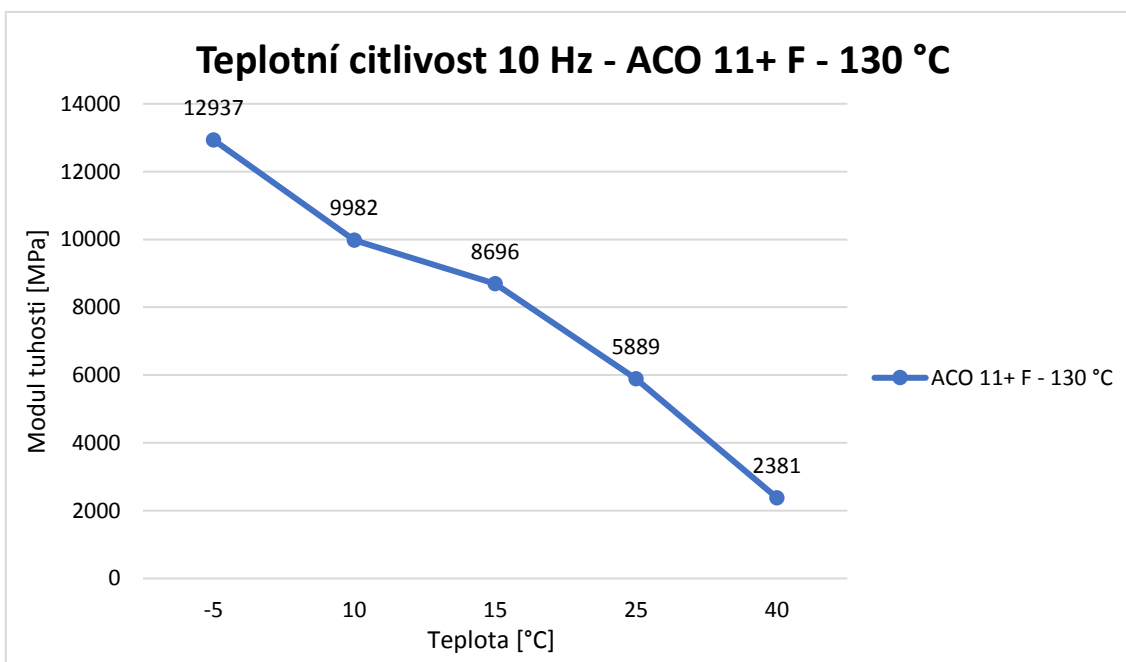
Graf 18: Hodnoty modulů tuhosti u směsi 130 °C

Z výše uvedených grafů a tabulek je patrné, že při zvyšování zatěžovací frekvence rostly moduly tuhosti asfaltových směsí při všech zkušebních teplotách. Dále je patrné, že moduly tuhosti klesaly s rostoucí teplotou. Toto chování je dáno visko-elastickými vlastnostmi pojiva, kdy se při vyšších teplotách stává pojivo viskóznějším a díky tomu asfaltová směs měkne a je méně odolná vůči deformacím (visko-elastické chování je popsáno v kapitole 2.2.1. Asfaltová pojiva).

Následující grafy ukazují výše zmíněnou teplotní citlivost na naměřených modulech tuhosti při frekvenci 10 Hz.



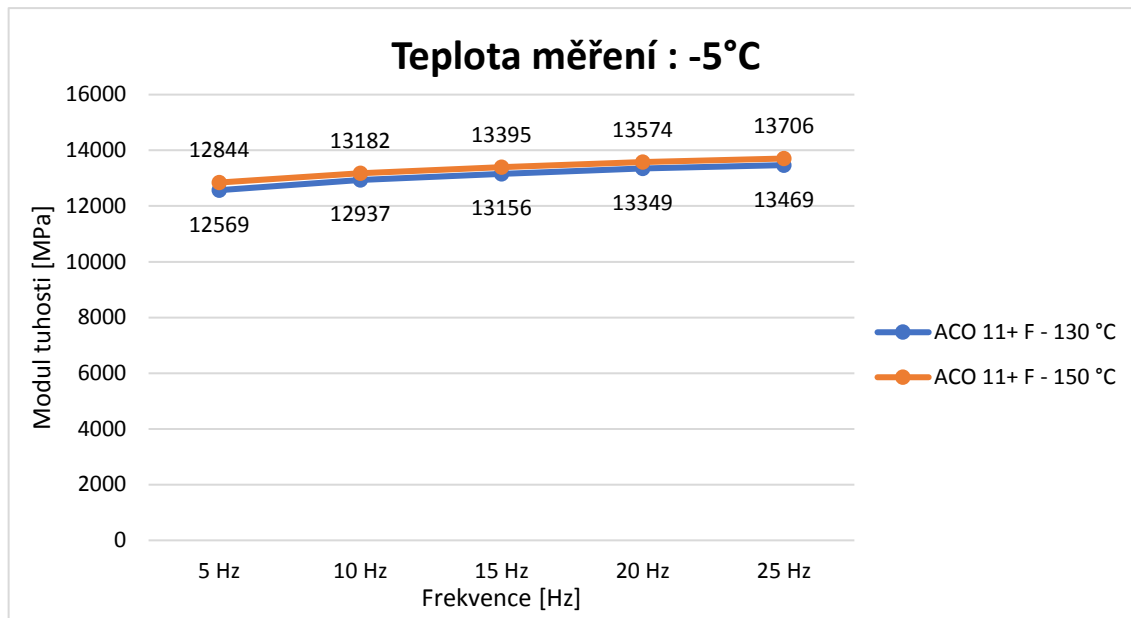
Graf 19: Teplotní citlivost u směsi 150 °C



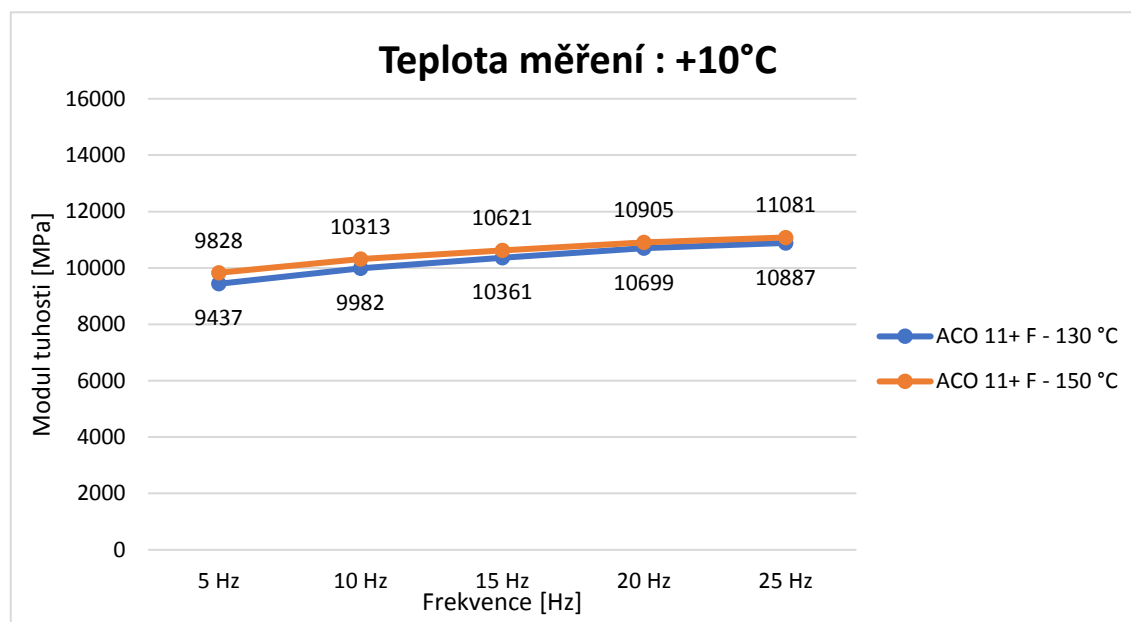
Graf 20: Teplotní citlivost u směsi 130 °C

Porovnání zkoušených směsí

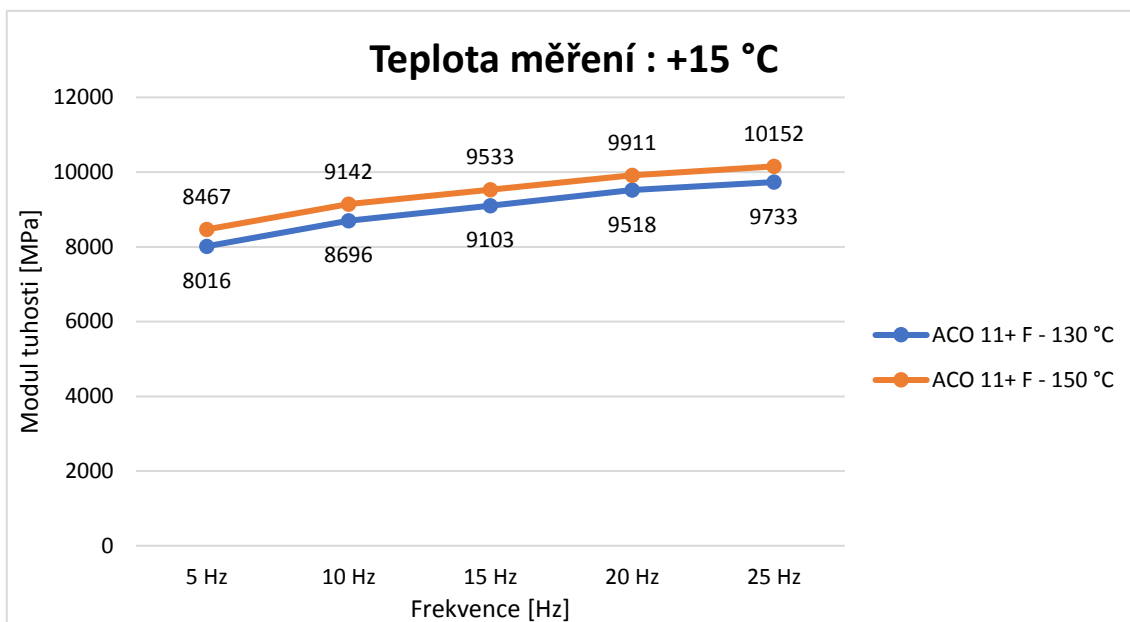
Po zpracování veškerých naměřených hodnot jsem obě zkoušené směsi porovnal a zjišťoval vliv snížené pracovní teploty na hodnoty modulů tuhosti. Porovnání jsou znázorněna v následujících grafech:



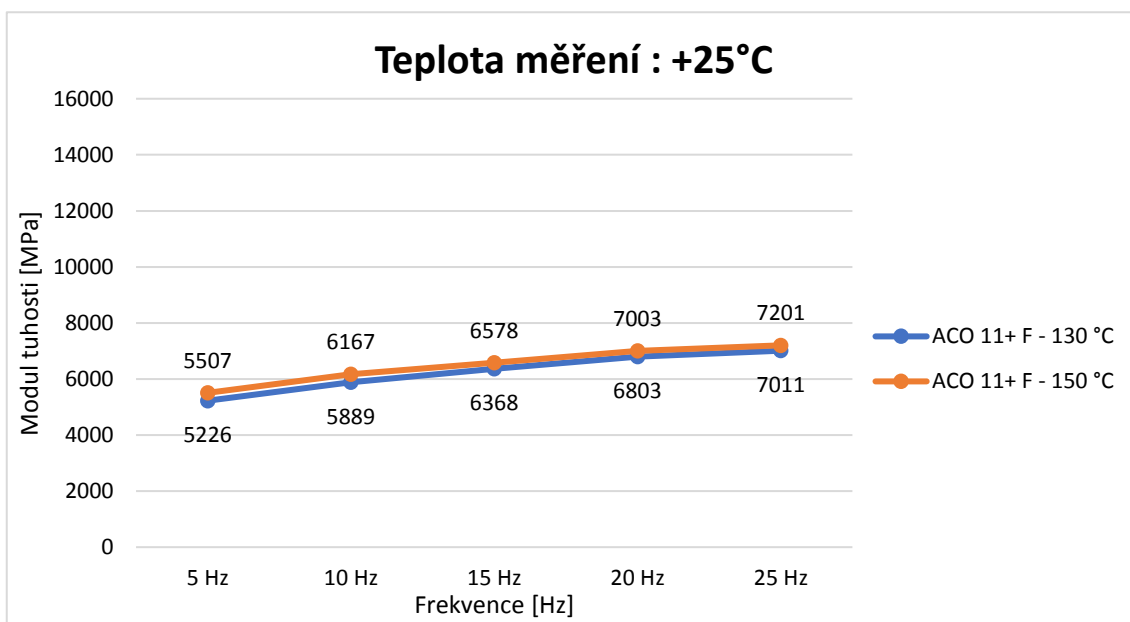
Graf 21: Porovnání výsledných hodnot modulů tuhosti při teplotě měření -5 °C



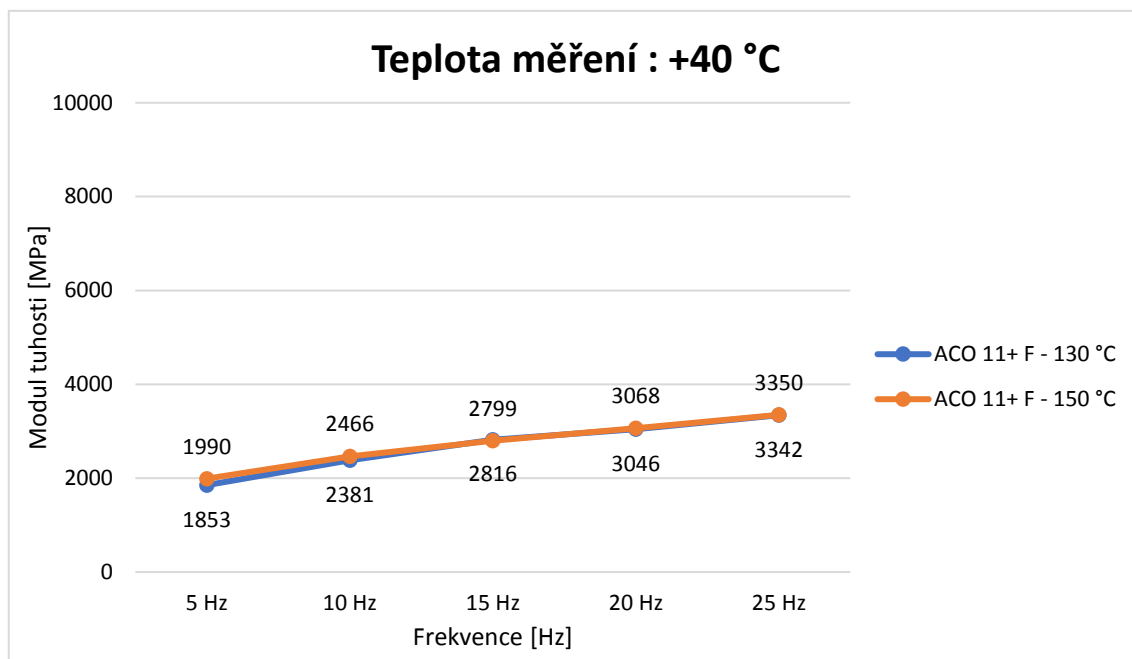
Graf 22: Porovnání výsledných hodnot modulů tuhosti při teplotě měření +10 °C



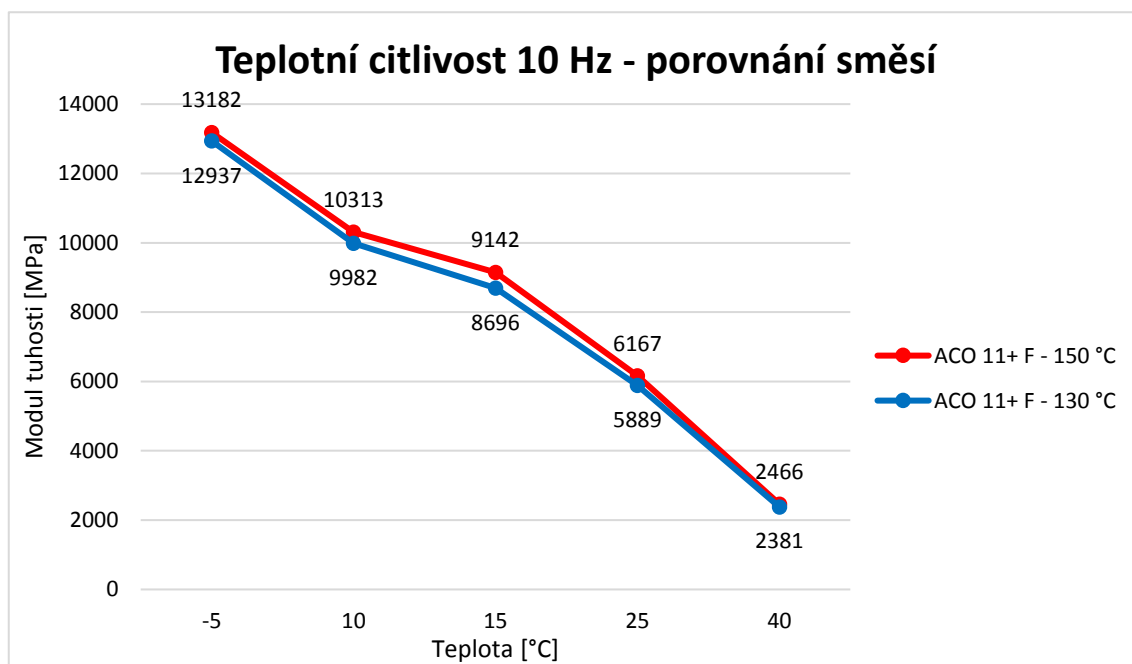
Graf 23: Porovnání výsledných hodnot modulů tuhosti při teplotě měření +15 °C



Graf 24: Porovnání výsledných hodnot modulů tuhosti při teplotě měření +25 °C



Graf 25: Porovnání výsledných hodnot modulů tuhosti při teplotě měření +40 °C



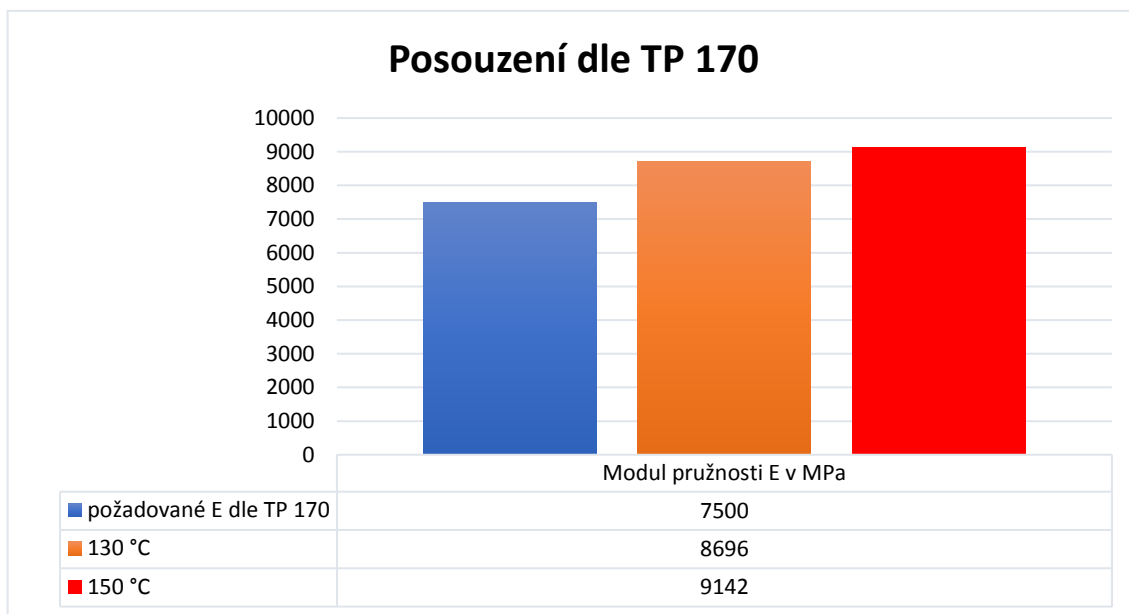
Graf 26: Porovnání výsledných hodnot teplotní citlivosti při frekvenci 10 Hz

Směs míchaná a hutněná při teplotě 130 °C nabývala nižších hodnot než směs, která byla míchaná a hutněná při teplotě 150 °C. Nižší naměřené hodnoty modulů tuhosti mohly být způsobené menším zestárnutím asfaltového pojiva díky menší pracovní teplotě při míchání a hutnění směsi, což způsobilo, že výsledná směs byla méně tužší, než směs ACO 11+ F – 150°C. Tuto teorii jsem následně ověřoval na vyextrahovaném pojivu.

Posouzení dle TP 170

Na závěr jsem zjištěné hodnoty posuzoval dle TP 170. Technické podmínky popisují požadované moduly tuhosti pro jednotlivé asfaltové směsi a druhy pojiva, kterých musí dosáhnout při měření za teploty +15 °C a frekvenci 10 Hz. [3]

U směsi druhu asfaltový beton AC při použití silničního asfaltu gradace 50/70 je požadovaný modul tuhosti 7500 MPa. Následující graf ukazuje, že asfaltové směsi s využitím technologie pěnoasfaltu při obou pracovních teplotách nabývají hodnot o více než 1000 MPa vyšších.



Graf 27: Posouzení dle TP 170 [3]

Na základě všech zjištěných informací můžeme konstatovat, že ačkoliv asfaltová směs míchána a hutněná při nižší teplotě dosahuje nižších hodnot modulů tuhosti, není tento pokles nijak výrazný a asfaltová směs stále splňuje požadavky dle TP 170.

Veškeré výše uvedené grafy vycházejí z průměrů naměřených hodnot. Všechny naměřené moduly tuhosti při všech teplotách a frekvencích u všech zkušebních vzorků jsou uvedeny v Příloze E.



Obrázek 37: Nařezané zkušební vzorky pro stanovení modulů tuhosti



Obrázek 38: Vzorek umístěný ve zkušebním zařízení

4.8.4. Odolnost proti trvalým deformacím – zkouška pojíždění kolem dle ČSN EN 12697-22+A1

Jako první zkoušku, pomocí které jsem stanovoval odolnost proti trvalým deformacím, byla zkouška pojíždění kolem. Postup zkoušky je popsán v kapitole 4.6.3. Stanovení odolnosti proti trvalým deformacím – zkouška pojíždění kolem. Zkoušku jsem provedl na zkušebních deskách 130.6 a 150.6 o tloušťce 40 mm, které jsem vyrobil dle postupu uvedeném v kapitole 4.3.2. Příprava těles zhutňovačem desek. Zkušební teplota byla 50 °C.

Cílem této zkoušky bylo zjištění hloubky vyjeté koleje po 10 000 cyklech $Y_{S,10\,000}$ a následné vypočítání hodnot PRD_{AIR} , což je průměrná hloubka vyjeté koleje, a WTS_{AIR} , což je poměrný přírůstek hloubky vyjeté koleje. Dle normy ČSN EN 13108-1 jsou pro obrusnou vrstvu z asfaltového betonu ACO požadované hodnoty PRD_{AIR} 5,0 % a WTS_{AIR} 0,07 mm/10³ cyklů.

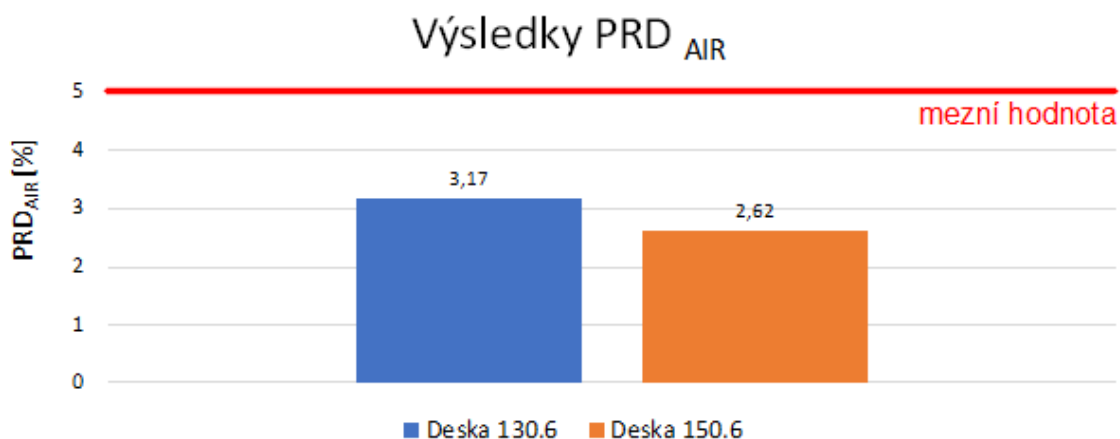


Obrázek 39: Zkušební deska nachystaná k provedení zkoušky pojíždění kolem

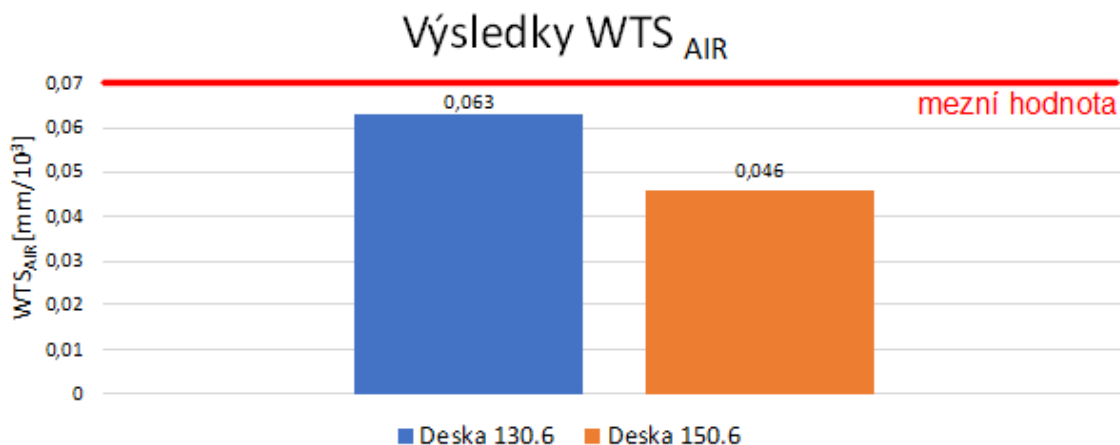
Následující tabulka a grafy popisují naměřené hodnoty u testovaných zkušebních desek:

ACO 11 Pěna, Zkouška pojíždění kolem						
Deska	Mezerovitost	Míra zhutnění	Teplota zkoušení	Tloušťka	PRD_{AIR}	WTS_{AIR}
-	(%)	(%)	(°C)	(mm)	(%)	(mm/10 ³)
130.6	2,6	99,7	50	40,1	3,17	0,063
150.6	2,6	99,7	50	40,1	2,62	0,046

Tabulka 22: Výsledky zkoušky pojíždění kolem



Graf 28: Naměřené výsledky PRD_{AIR}



Graf 29: Naměřené výsledky WTS_{AIR}

Jak již bylo patrné z výsledků modulů tuhosti, tak směs míchaná a hutněná při teplotě 130 °C je méně tužší, než směs míchaná a hutněná při teplotě 150 °C, díky čemuž je náchylnější na tvorbu trvalých deformací. Ačkoliv směs ACO 11+ F – 130 °C nabývá horších výsledků, tak splňuje požadavky dané normou ČSN EN 13108-1. Můžeme tedy konstatovat, že nižší teplota nijak výrazně neovlivnila funkční vlastnosti týkající se odolnosti proti trvalým deformacím asfaltové směsi.

Tato kapitola popisuje výsledné hodnoty, které jsem kontroloval s požadavky normy ČSN. Veškeré údaje naměřené během provádění zkoušky jsou uvedeny v tabulkách a grafech v Příloze F.

4.8.5. Odolnost proti trvalým deformacím – cyklická zkouška v tlaku v triaxiálním přístroji dle ČSN EN 12697-25

Jako druhou zkoušku pro stanovení odolnosti proti trvalým deformacím jsem provedl cyklickou zkoušku v tlaku v triaxiálním přístroji. Postup zkoušky je popsán v kapitole 4.6.4. Stanovení odolnosti proti trvalým deformacím – cyklická zkouška v tlaku v triaxiálním přístroji. Měření jsem provedl na tzv. Marshallových tělesech, jejichž výroba je popsána v kapitole 4.3.1. Příprava těles rázovým zhutňovačem.

Ačkoliv existuje norma ČSN EN 12697-25 Asfaltové směsi – Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka – Část 25: Cyklická zkouška v tlaku popisující tuto zkoušku, tak v normě ČSN EN 13108-1 Asfaltové směsi – Specifikace pro materiály – Část 1: Asfaltový beton nepředepisuje žádné požadované výsledky této zkoušky. Z tohoto důvodu jsem zkoušku v triaxiálním přístroji provedl pouze jako doplňkovou ke zkoušce pojíždění kolem. [6] [28]

Pro měření byla použita 3 Marshallova tělesa od každé zkoušené směsi, která byla v triaxiálním přístroji zatěžována 10 000 cykly při zkušební teplotě 50 °C. Z naměřených deformací bylo vypočítáno kumulativní přetvoření ϵ_n u každého zkoušeného tělesa. Tato přetvoření byla následně zprůměrována a vzájemně posouzena.

Během provádění měření na vzorku 130.1 došlo k protržení gumové membrány, což vedlo k proniknutí vody ke vzorku a jeho následnému zničení. Z tohoto důvodu jsem výsledky této zkoušky z posouzení vyřadil.

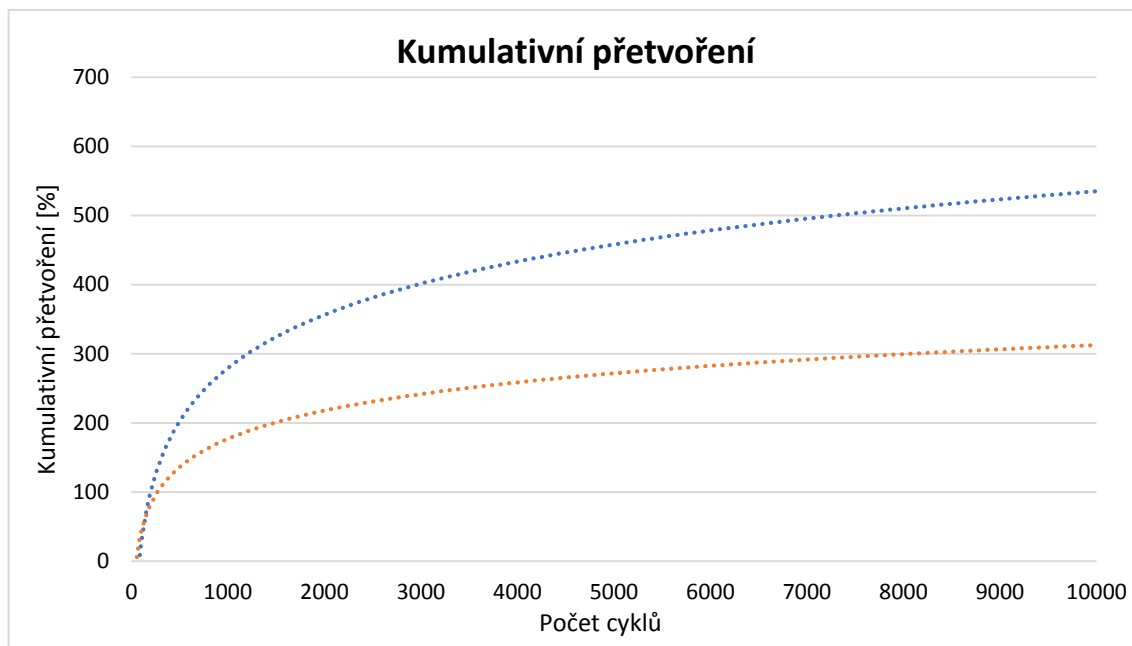


Obrázek 40: Poškozený vzorek v triaxiálním zařízení



Obrázek 41: Poškozený vzorek směsi ACO 11+ F – 130 °C

Po zprůměrování naměřených hodnot jsem výsledky vykreslil do níže uvedeného grafu:



Graf 30: Kumulativní přetvoření zkoušených směsí

Legenda ke grafu:

- modrá čára – ACO 11+ F – 130 °C
- červená čára – ACO 11+ F – 150 °C

Z grafu je patrné, že směs ACO 11+ F – 130 °C nabývá větších hodnot kumulativního přetvoření, než směs ACO 11+ F – 150 °C. Výsledky zkoušky potvrzují, jako výsledky ze stanovení modulů tuhosti a stanovení odolnosti proti trvalým deformacím zkouškou pojíždění kolem, že směs míchaná při nižší pracovní teplotě je méně tužší, a tím pádem náchylnější na trvalé deformace.

V následujících kapitolách jsou popsány zkoušky na extrahovaném pojivu, na kterém jsem ověřoval teorii, že chování směsi je způsobeno menším zestárnutím asfaltového pojiva.

4.8.6. Stanovení penetrace jehlou dle ČSN EN 1426 a bodu měknutí asfaltového pojiva dle ČSN EN 1427

Po provedení funkčních zkoušek na asfaltových směsích jsem z obou směsí vyextrahoval pojivo a provedl empirické zkoušky, tedy stanovení penetrace jehlou a stanovení bodu měknutí metodou kroužek a kulička. Extrakce pojiva je popsána v kapitole 4.4. a postupy provedených zkoušek jsou stanoveny v kapitolách 4.7.1. a 4.7.2.

Aby mohla být vyextrahovaná pojiva mezi sebou porovnána, bylo potřeba, aby byla stejně teplotně zatěžována, čímž je myšleno, aby u obou pojiv došlo ke stejnému počtu zahřátí. Pro provedení empirických zkoušek jsem využil asfaltová pojiva, která jsem vyextrahoval z Marshallových těles, které jsem použil při zkoušce trvalých deformací v triaxiální komoře. Jedná se tedy o pojiva, která byla zahřívána třikrát, a to

při míchání asfaltové směsi, při hutnění Marshallova tělesa a při extrahování pojiva ze zkušebního tělesa.

V následující tabulce jsou porovnány naměřené výsledky s hodnotami charakteristickými pro silniční asfalt gradace 50/70.

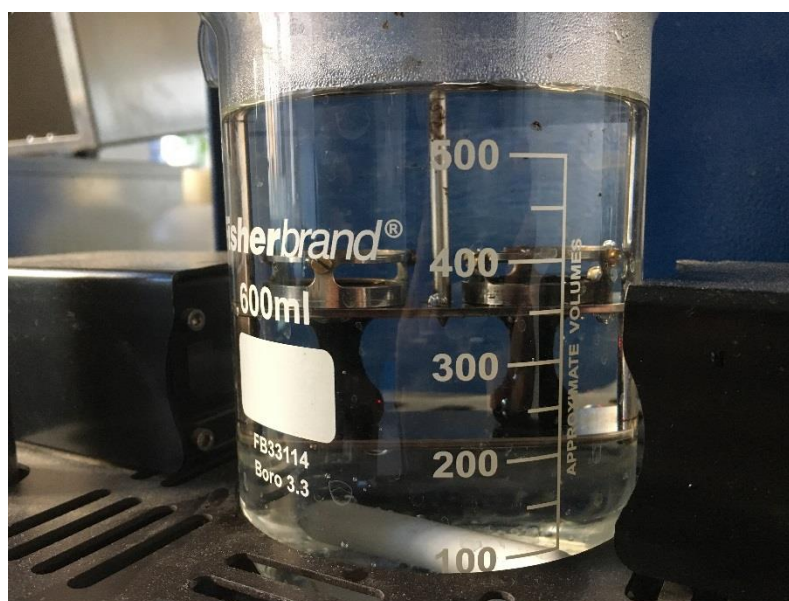
Silniční asfalt 50/70		
-	Penetrace [p.j.]	Bod měknutí [°C]
Charakteristické hodnoty	50 - 70	46 - 54
130 °C	26	56,8
150 °C	20	65,4

Tabulka 23: Výsledky stanovení penetrace jehlou a bodu měknutí

Po třech zahřívání asfaltového pojiva došlo k výraznému zestárnutí, což způsobilo, že zkoušená pojiva nabývají nižších hodnot při stanovení penetrace, a naopak vyšších hodnot při stanovení bodu měknutí v porovnání s charakteristickými hodnotami. Stárnutí pojiva se projevuje posunutím oboru použitelnosti, což znamená, že asfalt je odolnější při vyšších teplotách, ale při nižších teplotách dochází k dřívějšímu vzniku trhlin.

Při porovnání obou asfaltových pojiv je patrné, že ačkoliv byl rozdíl teplot při míchání a hutnění asfaltové směsi pouze 20 °C (tedy při dvou zahřívání ze tří), je rozdíl ve stanovené penetraci 6 penetračních jednotek a u bodu měknutí je rozdíl necelých 9 °C. Na základě těchto zjištění je možné konstatovat, že výroba asfaltové směsi při nižší pracovní teplotě vede k menšímu zestárnutí asfaltového pojiva, a tím příznivě ovlivní životnost asfaltové směsi.

Provedené empirické zkoušky na asfaltovém pojivu potvrzují teorii, že rozdíly ve výsledcích funkčních zkoušek na asfaltových směsích jsou způsobeny stavem asfaltového pojiva. Díky tomu směs ACO 11+ F – 130 °C s méně zestárlejším asfaltovým pojivem dosahovala lepších výsledků při stanovení nízkoteplotních vlastností a horších výsledků při stanovení modulů tuhosti a odolnosti proti trvalým deformacím, než směs ACO 11+ F – 150 °C.



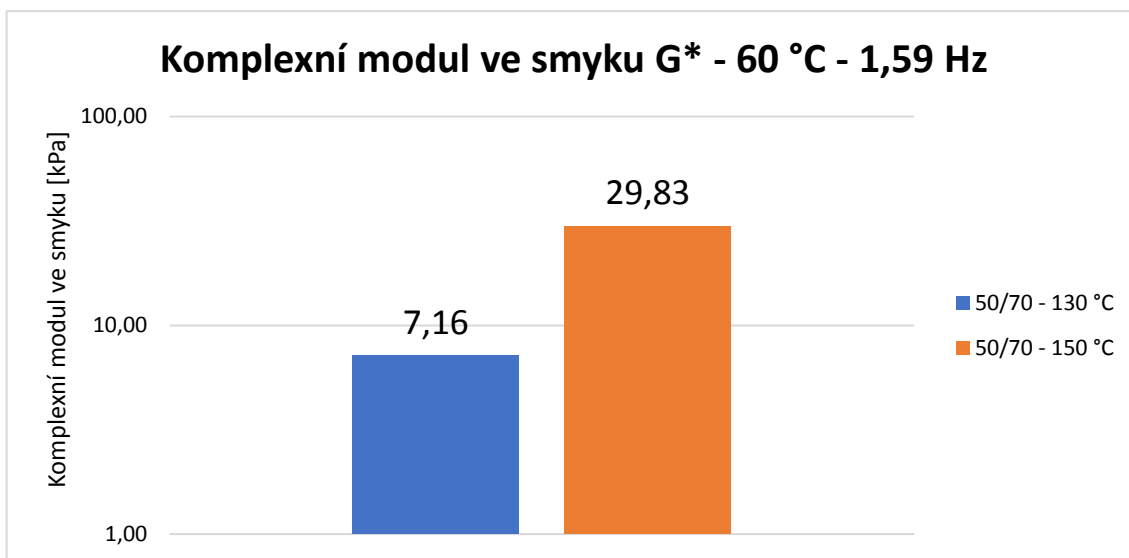
Obrázek 42: Zkušební vzorky po stanovení bodu měknutí

4.8.7. Stanovení komplexního modulu ve smyku a fázového úhlu dle ČSN EN 14770

Po provedení empirických zkoušek jsem na asfaltovém pojivu stanovil komplexní modul ve smyku a fázový úhel. Zkoušku jsem provedl na dynamickém smykovém reometru (DSR) při zatěžování o frekvenčním rozsahu 0,1 Hz až 10 Hz v teplotních mezích 10 °C – 70 °C. Postup zkoušky je popsán v kapitole 4.7.3.

Zkoušení proběhlo na asfaltových pojivech z obou zkoušených asfaltových směsí. Pro stanovení komplexního modulu a fázového úhlu byly použity 2 geometrie, a to 25 mm a 8 mm.

Jako hlavní zjištěné hodnoty pro porovnání testovaných pojiv jsem určil hodnoty naměřené při teplotě 60 °C a frekvenci 1,59 Hz, které jsou vyneseny v následujícím grafu.



Graf 31: Komplexní modul ve smyku při teplotě 60 °C a frekvenci 1,59 Hz

Zjištěné hodnoty komplexního modulu ve smyku potvrzují výsledky zjištěné při stanovení penetrace jehlou a bodu měknutí. Díky menšímu zestárnutí asfaltového pojiva dvakrát zahřívaného na teplotu 130 °C je toto pojivo viskóznější, a proto nabývá menších hodnot komplexního modulu, než pojivo dvakrát zahřívané při teplotě 150 °C.

Následující tabulky a graf popisují naměřené hodnoty při teplotě 60 °C. Kromě komplexního modulu ve smyku jsou zde znázorněny i zjištěné hodnoty fázového úhlu.

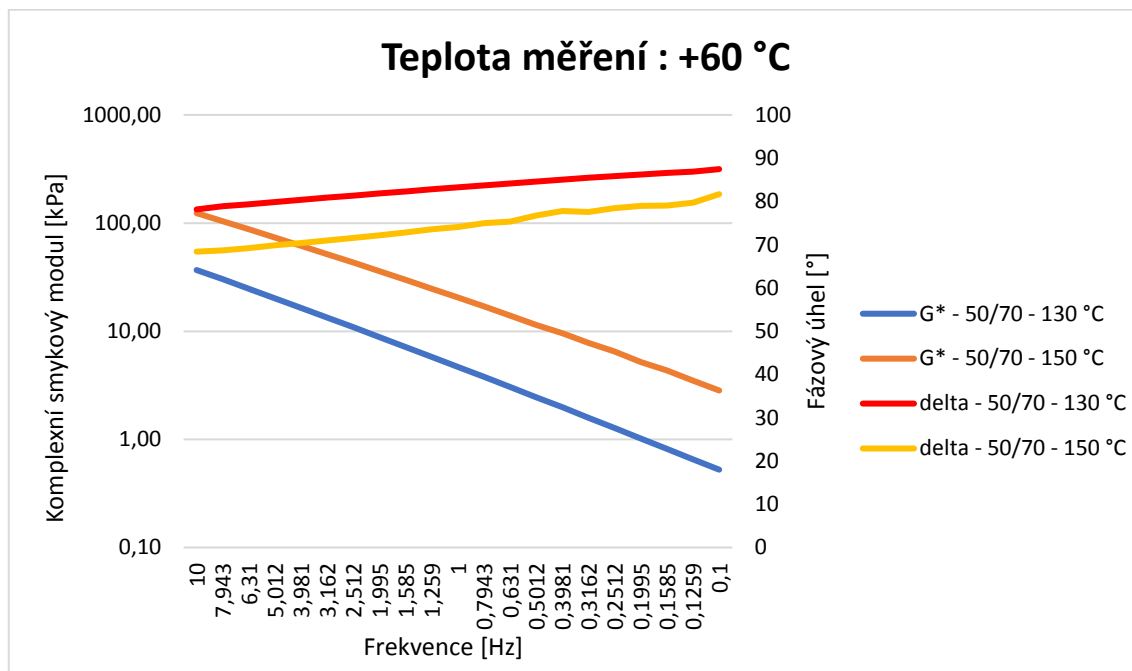
Silniční asfalt 50/70 - 130 °C			
Teplota měření [°C]	Frekvence [Hz]	G^* [kPa]	Fázový úhel [°]
60	10	36,77	78,16
60	7,943	30,20	78,87
60	6,31	24,72	79,36
60	5,012	20,19	79,86
60	3,981	16,45	80,36
60	3,162	13,40	80,87
60	2,512	10,89	81,36
60	1,995	8,84	81,85
60	1,585	7,16	82,34

60	1,259	5,80	82,8
60	1	4,69	83,26
60	0,7943	3,78	83,73
60	0,631	3,05	84,17
60	0,5012	2,46	84,63
60	0,3981	1,98	85,03
60	0,3162	1,59	85,45
60	0,2512	1,27	85,83
60	0,1995	1,02	86,21
60	0,1585	0,82	86,57
60	0,1259	0,65	86,9
60	0,1	0,52	87,47

Tabulka 24: Zjištěné komplexní moduly a fázové úhly u asfaltového pojiva 50/70 – 130 °C při teplotě měření 60 °C

Silniční asfalt 50/70 - 150 °C			
Teplota měření [°C]	Frekvence [Hz]	G* [kPa]	Fázový úhel [°]
60	10	123,50	68,4
60	7,943	104,10	68,72
60	6,31	87,77	69,24
60	5,012	73,57	69,84
60	3,981	61,64	70,39
60	3,162	51,58	71,01
60	2,512	43,03	71,56
60	1,995	35,83	72,2
60	1,585	29,83	72,84
60	1,259	24,74	73,54
60	1	20,50	74,1
60	0,7943	16,99	74,95
60	0,631	13,95	75,38
60	0,5012	11,46	76,74
60	0,3981	9,55	77,82
60	0,3162	7,81	77,56
60	0,2512	6,48	78,47
60	0,1995	5,20	79,01
60	0,1585	4,34	79,06
60	0,1259	3,50	79,71
60	0,1	2,83	81,68

Tabulka 25: Zjištěné komplexní moduly a fázové úhly u asfaltového pojiva 50/70 – 150 °C při teplotě měření 60 °C



Graf 32: Zjištěné komplexní moduly a fázové úhly při teplotě měření 60 °C

Stejným způsobem jsem postupoval při zpracování výsledků získaných při frekvenci měření 1,59 Hz.

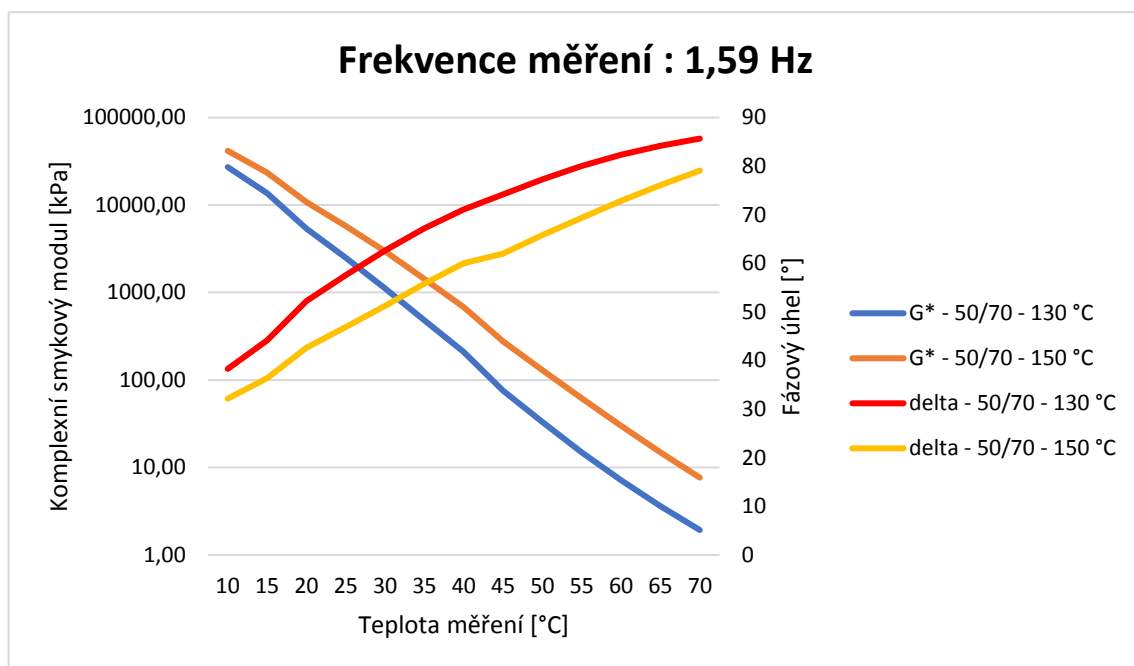
Silniční asfalt 50/70 - 130 °C			
Frekvence [Hz]	Teplota měření [°C]	G* [kPa]	Fázový úhel [°]
1,59	10	27150,00	38,29
1,59	15	13640,00	44,17
1,59	20	5364,00	52,26
1,59	25	2495,00	57,62
1,59	30	1111,00	62,64
1,59	35	480,80	67,21
1,59	40	209,80	71,07
1,59	45	75,48	74,16
1,59	50	33,19	77,28
1,59	55	14,84	80,06
1,59	60	7,16	82,34
1,59	65	3,60	84,19
1,59	70	1,93	85,68

Tabulka 26: Zjištěné komplexní moduly a fázové úhly u asfaltového pojiva 50/70 – 130 °C při frekvenci měření 1,59 Hz

Silniční asfalt 50/70 - 150 °C			
Frekvence [Hz]	Teplota měření [°C]	G* [kPa]	Fázový úhel [°]
1,59	10	41700,00	32,16
1,59	15	23430,00	36,41
1,59	20	10810,00	42,66
1,59	25	5758,00	46,91
1,59	30	2949,00	51,25

1,59	35	1431,00	55,8
1,59	40	679,70	60,01
1,59	45	276,80	62,02
1,59	50	129,60	65,81
1,59	55	61,70	69,37
1,59	60	29,83	72,84
1,59	65	14,88	76,07
1,59	70	7,65	79,09

Tabulka 27: Zjištěné komplexní moduly a fázové úhly u asfaltového pojiva 50/70 – 150 °C při frekvenci měření 1,59 Hz



Graf 33: Zjištěné komplexní moduly a fázové úhly při frekvenci měření 1,59 Hz

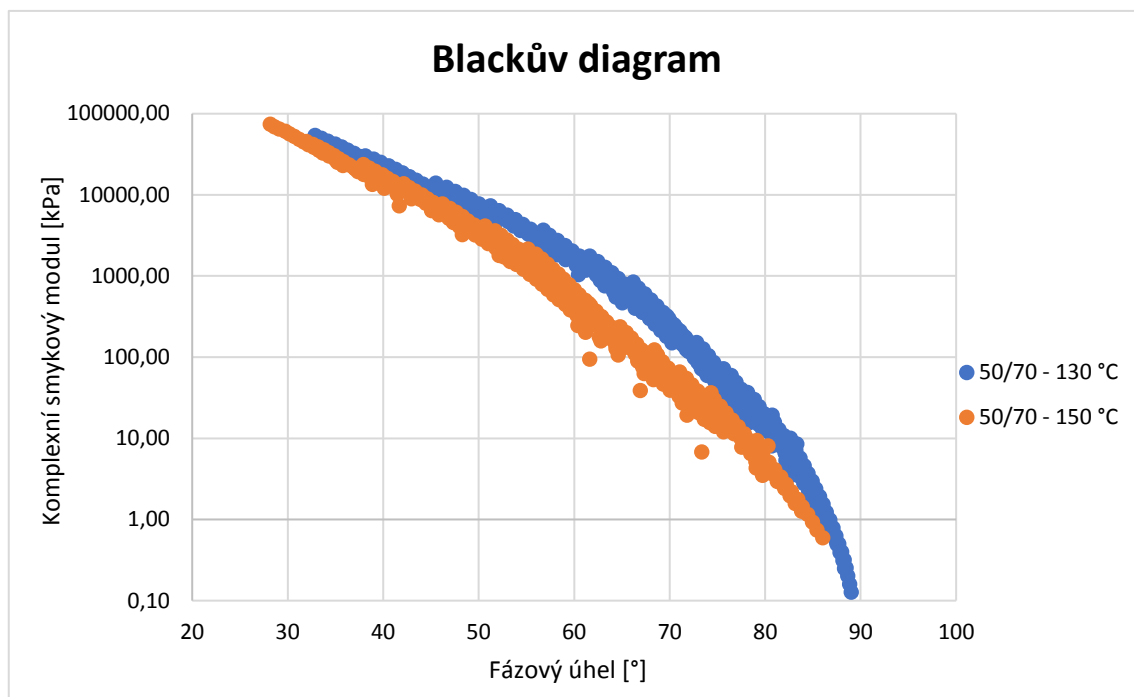
Zjištěné výsledky potvrzují, že asfaltové pojivo dvakrát zahříváné na teplotu 130 °C dosahuje při všech měřených teplotách a frekvencích nižších hodnot komplexního modulu, než pojivo dvakrát zahříváné na teplotu 150 °C. Tímto širším rozpracováním byly potvrzeny závěry výsledků měření při teplotě 60 °C a frekvenci 1,59 Hz na začátku této kapitoly.

Z výše uvedených grafů a tabulek je patrné, že s rostoucí teplotou klesá komplexní smykový modul. Tento výsledek je dán visko-elastickými vlastnostmi pojiva, kdy se při vyšších teplotách stává pojivo viskóznějším a díky tomu méně odolným vůči zatěžování. Naopak je zároveň patrné, že s rostoucí frekvencí zatěžování komplexní modul ve smyku roste. Stejné chování bylo zjištěno i při výpočtu modulů tuhosti u asfaltových směsí, což potvrzuje, že chování asfaltové směsi při různých teplotách a frekvencích zatížení je dáno visko-elastickými vlastnostmi pojiva. Výsledky zjištěných modulů tuhosti jsou zpracovány v kapitole 4.8.3.

Co se týká naměřených hodnot fázového úhlu, jde vidět, že u pojiva dvakrát zahříváného při teplotě 130 °C nabývá vyšších hodnot. Je to dáno tím, že u viskóznějšího pojiva má větší podíl imaginární složka komplexního modulu, která definuje viskózní chování asfaltu, než má u tvrdšího pojiva, a díky tomu u viskóznějšího pojiva vychází větší fázový úhel. Zároveň je z grafů patrné, že s rostoucím komplexním modulem klesá

velikost fázového úhlu. Tento jev je dán tím, že při zvyšování velikosti komplexního modulu roste jeho reálná složka, která definuje elastické chování pojiva, a tím dochází ke snižování fázového úhlu. Rozdělení komplexního modulu na jednotlivé složky a jejich vztah k fázovému úhlu je popsán v kapitole 4.7.3.

Na závěr jsem sestavil tzv. Blackův diagram, který znázorňuje vztah mezi komplexním modulem ve smyku a fázovým úhlem.



Graf 34: Blackův diagram

Blackův diagram potvrzuje výše zjištěnou skutečnost, že při stejných hodnotách komplexního modulu nabývá směs zahříváná při teplotě 130 °C vyšší hodnot fázového úhlu, což je dáno větším podílem imaginární složky, která definuje viskózní chování asfaltového pojiva.

Na závěr můžeme konstatovat, že tato funkční zkouška potvrdila závěry konstatované po provedení empirických zkoušek asfaltového pojiva. Nižší teplota vedla k menšímu zestárnutí pojiva, díky čemuž došlo k menšímu posunutí oboru použitelnosti a pojivo bylo viskóznější než pojivo zahříváné na vyšší teplotu. Tento závěr byl potvrzen všemi zkouškami, jak na asfaltových pojivech, tak na asfaltových směsích.

Veškeré neměřené hodnoty a uvedeny v Příloze G a následně vyneseny do grafů, které jsou uvedeny v Příloze H.

5. ZÁVĚR

Cílem diplomové práce bylo ověření funkčních vlastností asfaltové směsi s využitou technologií pěnoasfaltu, jejíž pracovní teplota byla snížena o 20 °C.

Teoretická část se zabývá základním dělením jednotlivých konstrukcí vozovky s bližším zaměřením na netuhé vozovky, konkrétně na asfaltové směsi. Dále se zabývá dělením směsí dle pracovní teploty. Hlavní pozornost je věnována teplým asfaltovým směsím, jejím výhodám a způsobu provádění. Na závěr je rozpracována technologie pěnoasfaltu a její dosavadní využití.

Praktická část se zabývá konkrétním posuzováním vlastností asfaltových směsí. Pro tuto práci byly vyrobeny dvě asfaltové směsi druhu asfaltový beton pro obrusné vrstvy ACO 11+ F s využitím zpěněného silničního asfaltu gradace 50/70, přičemž jednou byla směs vyrobena při teplotě 150 °C a podruhé při snížené teplotě 130 °C. V rámci práce byly provedeny funkční zkoušky na asfaltové směsi a následně bylo extrahováno asfaltové pojivo, na kterém byly provedeny empirické a funkční zkoušky.

Funkční zkoušky asfaltové směsi ukázaly, že směs vyrobená při nižší teplotě je méně tužší a díky tomu dosahuje lepších výsledků při stanovení nízkoteplotních vlastností a horších výsledků při stanovení modulů tuhosti a odolnosti proti trvalým deformacím. Tento jev je způsoben menším zestárnutím asfaltového pojiva díky menší pracovní teplotě, což bylo ověřeno pomocí zkoušek na extrahovaném pojivu.

Ačkoliv vychází zjištěné moduly tuhosti a odolnost proti trvalým deformacím u směsi s nižší pracovní teplotou hůře, stále jsou funkční vlastnosti v souladu s požadavky příslušných norem ČSN a technických podmínek TP.

Můžeme tedy konstatovat, že snížením pracovní teploty nedošlo ke zhoršení funkčních vlastností vyrobené směsi, což umožňuje využití této snížené pracovní teploty v praxi. Naopak lze říct, že díky nižší pracovní teplotě došlo k menšímu zestárnutí asfaltového pojiva, což má pozitivní vliv na životnost asfaltové směsi.

Na závěr doporučuji více se danou problematikou zabývat a testovat snížení pracovní teploty i u asfaltového betonu pro ložní a podkladní vrstvy.

6. SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] European Asphalt Pavement Association EAPA [online]. [cit. 4.11.2018]. Dostupné z: <https://www.eapa.org/>
- [2] Ředitelství silnic a dálnic ČR [online]. [cit. 4.11.2018]. Dostupné z: <https://www.rsd.cz/wps/portal/web/rsd/Silnicni-databanka>
- [3] TP 170 – Navrhování vozovek pozemních komunikací, MINISTERSTVO DOPRAVY ČR, 2004
- [4] COLAS CZ, a. s. [online]. [cit. 30.11.2018]. Dostupné z: <http://www.colas.cz/nase-stavby/silnicni-vystavba/?stranka=4&realizace=1>
- [5] Materiály předmětu BM02
- [6] ČSN EN 13108-1 Asfaltové směsi – Specifikace pro materiály – Část 1: Asfaltový beton
- [7] TP 112 – Studené pěnoasfaltové vrstvy, MINISTERSTVO DOPRAVY ČR, 2007
- [8] VALENTIN, Jan, MONDSCHNEIN, Petr. Vybrané experimentální poznatky o nízkoteplotních asfaltových směsích. In: *silnice-zeleznice.cz* [online]. [cit. 30.11.2018]. Dostupné z: <http://www.silnice-zeleznice.cz/clanek/vybrane-experimentalni-poznatky-o-nizkoteplotnich-asfaltovych-smesich/>
- [9] ABDULLAHA, Mohd Ezree, ZAMHARIA, Kemas Ahmad, BUHARIA, Rosnawati, BAKARA, Siti Khatijah Abu, KAMARUDDINA, Nurul Hidayah Mohd, NAYANB, Nafarizal, HAININC, Mohd Rosli, HASSANC, Norhidayah Abdul, HASSANC, Sitti Asmah, YUSOFFD, Nur Izzi Md. Warm Mix Asphalt Technology: A Review [online]. [cit. 1.12.2018]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/273311099_Warm_Mix_Asphalt_TTchnolo_A_Review
- [10] HILL, Brian, *Performance evaluation of warm mix asphalt mixtures incorporating reclaimed asphalt pavement*. Urbana, Illinois, 2011. Master of science thesis. University of Illinois at Urbana-Champaign. Adviser: Professor William G. Buttlar
- [11] ZAUMANIS, Martins, *Warm mix asphalt investigation*. Kgs.Lyngby, Denmark, 2010. Master of science thesis. Project conducted at: Technical university of Denmark, Department of Civil Engineering. Home university: Riga technical university, Faculty of Civil Engineering, Institute of Transportation. Supervisors: J. M. Jansen, J. Smirnovs
- [12] VENCLÍKOVÁ, Michaela. *Využití pěnoasfaltu v asfaltových směsích*. Brno, 2018. 93 s., 20 s. příl. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav pozemních komunikací. Vedoucí práce Ing. Petr Hýzl, Ph.D.
- [13] TP 238 – Nízkoteplotní asfaltové směsi (NTAS), MINISTERSTVO DOPRAVY ČR, 2011

- [14] MASTNÝ, Jan, *Vliv syntetických vosků a rejuvenátorů na vlastnosti asfaltové směsi s R-materiálem*. Praha, 2017. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta stavební, Katedra silničních staveb. Vedoucí práce Ing. Jan Valentin, Ph.D.
- [15] CHARIWALA, A., PATEL, S., SHAIKH, M., TAILOR, S. A study on warm mix asphalt technology on bituminous mixes using rediset-wmx. [online]. [cit. 11.12.2018]. Dostupné z: <http://www.iosrjournals.org/iosr-jmce/papers/vol13-issue4/Version-6/C1304061525.pdf>
- [16] DUPUY, Jean Paul, CARBONNEAU, Xavier. Pěnoasfaltové směsi. In: *asfaltové-vozovky.cz* [online]. [cit. 3.12.2018]. Dostupné z: http://www.asfaltové-vozovky.cz/av2017/data/prezentace/t1-8_dupuy.pdf
- [17] Wikipedie – Zeolit [online]. [cit. 3.12.2018]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Zeolit>
- [18] HÝZL, Petr, DAŠEK, Ondřej. *Rešerše na stav techniky pro využití technologie pěnoasfaltu při výrobě asfaltových směsí za horka*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav pozemních komunikací, 2017.
- [19] NPTEL – Foam bituminous mix [online]. [cit. 11.12.2018]. Dostupné z: <https://nptel.ac.in/courses/105104098/TransportationII/mod-2-lecture2/2-3-foamed-bituminous.htm>
- [20] Dostupné z: https://media.wirtgen-group.com/media/02_wirtgen/media_1/media_1_product_divisions/media_1_product_divisions_soil_stabilizers___cold_recyclers/W_brochure_Foamed-Bitumen_0116_EN.pdf
- [21] HÝZL, Petr. Praktické aplikace v pozemních komunikacích – Modul 6: Asfaltové směsi, 2006
- [22] JENKINS, K.J., VEN, M.F.C., GROOT, J.L.A. Characterisation of foamed bitumen, 7TH Conference on asphalt pavements for Southern Africa. [online]. [cit. 15.12.2018]. Dostupné z: <https://www.viastrade.it/letteratura/bitume/CHARACTERISATION%20OF%20FOAMED%20BITUMEN.pdf>
- [23] CHOMICZ-KOWALSKA, Anna, MRUGALA, Justyna, MACIEJEWSKI, Krzysztof. Evaluation of Foaming Performance of Bitumen Modified with the Addition of Surface Active Agent. Kielce, Poland. 2017
- [24] SUNARJONO, Sri. The influence of foamed bitumen characteristics on cold-mix asphalt properties. Nottingham, 2008. Thesis, The University of Nottingham. School of Civil Engineering, Nottingham Transportation Engineering Centre.
- [25] Aspha-min [online]. [cit. 16.12.2018]. Dostupné z: <https://www.aspha-min.com/>
- [26] KUMAR, Rajiv, CHANDRA, Satish. Warm mix asphalt investigation on public roads – A review. India. 2016. Indian Institute of Technology – Roorkee, Department of Civil Engineering.

- [27] TRL Report: Review of Shell Thiopave™ sulphur-extended asphalt modifier [online]. [cit. 16.12.2018]. Dostupné z: <https://trl.co.uk/sites/default/files/TRL672.pdf>
- [28] Froněk, spol. s r.o. – dopravní stavby. [online]. [cit. 17.12.2018]. Dostupné z: <https://www.fronek.cz/reference/detail/ii208-krasno-becov-km-5791-7291/>
- [29] Smlouva o dílo – II/330 Budiměřice – Průtah, km 21,372 – 21,882, II/330 Rašovice – Průtah. Praha. 2016.
- [30] TH03020283 – *Využití technologie pěnoasfaltu v asfaltových směsích*. Projekt. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební. Hlavní řešitel Ing. Petr Hýzl, Ph.D.
- [31] Protokol o zkoušce typu č. 4-2018-By, ACO 11+ F s asfaltem 50/70. Vydal: COLAS CZ, a. s., Jihlava, 2018
- [32] ORLEN Asfalt Česká republika s.r.o. [online]. [cit. 10.12.2018]. Dostupné z: <http://kreditco.sk/files/asfalt.pdf>
- [33] COLAS CZ, a. s. [online]. [cit. 10.12.2018]. Dostupné z: <http://www.colas.cz/sluzby/obalovny/>
- [34] Protokol č. JI-18-1456: Stanovení vlastností vzorku směsi, ACO 11+ s asfaltem 50/70. Vydal: COLAS CZ, a. s., Jihlava, 2018
- [35] TKP 7 – Hutněné asfaltové vrstvy, MINISTERSTVO DOPRAVY ČR, 2008
- [36] ČSN EN 12697-30+A1 Asfaltové směsi – Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka – Část 30: Příprava zkušebních těles rázovým zhutňovačem
- [37] ČSN EN 12697-25 Asfaltové směsi – Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka – Část 25: Cyklická zkouška v tlaku
- [38] ČSN EN 12697-33+A1 Asfaltové směsi – Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka – Část 33: Příprava zkušebních těles zhutňovačem desek
- [39] ČSN EN 12697-3 Asfaltové směsi – Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka – Část 3: Znovuzískání extrahovaného pojiva – Rotační vakuové destilační zařízení.
- [40] ČSN EN 1426 Asfalty a asfaltová pojiva – Stanovení penetrace jehlou
- [41] ČSN EN 1427 Asfalty a asfaltová pojiva – Stanovení bodu měknutí – Metoda kroužek a kulička
- [42] ČSN EN 14770 Asfalty a asfaltová pojiva – Stanovení komplexního modulu ve smyku a fázového úhlu – Dynamický smykový reometr (DSR)
- [43] ČSN EN 12697-46 Asfaltové směsi – Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka – Část 46: Nízkoteplotní vlastnosti a tvorba trhlin pomocí jednoosé zkoušky tahem.
- [44] ČSN EN 12697-26 Asfaltové směsi – Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka – Část 26: Tuhost
- [45] ČSN EN 12697-22+A1 Asfaltové směsi – Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka – Část 22: Zkouška pojíždění kolem

- [46] MILÁČKOVÁ, Kristýna, VALENTIN, Jan. *Porovnání dvou vybraných zkušebních metod pro stanovení dynamické viskozity asfaltových pojiv*. Sborník vědeckých prací Vysoké školy báňské – Technické univerzity Ostrava, článek č. 27, 2012
- [47] KUDLÍK, Jiří. Vliv dlouhodobého stárnutí na vybraná asfaltová pojiva. Praha, 2018. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta dopravní, Ústav dopravních systémů. Vedoucí práce doc. Ing. Otakar Vacín, Ph.D.

7. SEZNAM GRAFŮ

Graf 1: Visko-elastické chování asfaltu [5]	13
Graf 2: Čára zrnitosti směsi ACO 11 [5]	14
Graf 3: Závislosti pracovní teploty na energetickou náročnost asfaltových směsí [1]	15
Graf 4: Pokles expanzního poměru s časem [22]	23
Graf 5: Vztah mezi maximálním expanzním poměrem a poločasem [22]	23
Graf 6: Zjištění parametru FI [24]	24
Graf 7: Stanovení korekčního faktoru c [24]	25
Graf 8: Produkce teplé asfaltové směsi v Norsku [1]	26
Graf 9: Produkce teplé asfaltové směsi v USA [1]	28
Graf 10: Křivky zrnitosti jednotlivých frakcí kameniva [31]	35
Graf 11: Křivka zrnitost ACO 11+ F [34]	36
Graf 12: Složky komplexního smykového modulu [47]	59
Graf 13: Rozdíl mezi smykovým napětím a smykovým přetvořením [47]	60
Graf 14: Porovnání výsledků zkoušky nízkoteplotních vlastností	65
Graf 15: Průběh kryogenního napětí směsi 150 °C	65
Graf 16: Průběh kryogenního napětí směsi 130 °C	66
Graf 17: Hodnoty modulů tuhosti u směsi 150 °C	67
Graf 18: Hodnoty modulů tuhosti u směsi 130 °C	68
Graf 19: Teplotní citlivost u směsi 150 °C	69
Graf 20: Teplotní citlivost u směsi 130 °C	69
Graf 21: Porovnání výsledných hodnot modulů tuhosti při teplotě měření -5 °C	70
Graf 22: Porovnání výsledných hodnot modulů tuhosti při teplotě měření +10 °C	70
Graf 23: Porovnání výsledných hodnot modulů tuhosti při teplotě měření +15 °C	71
Graf 24: Porovnání výsledných hodnot modulů tuhosti při teplotě měření +25 °C	71
Graf 25: Porovnání výsledných hodnot modulů tuhosti při teplotě měření +40 °C	72
Graf 26: Porovnání výsledných hodnot teplotní citlivosti při frekvenci 10 Hz	72
Graf 27: Posouzení dle TP 170 [3]	73
Graf 28: Naměřené výsledky PRD_{AIR}	76
Graf 29: Naměřené výsledky WTS_{AIR}	76
Graf 30: Kumulativní přetvoření zkoušených směsí	78
Graf 31: Komplexní modul ve smyku při teplotě 60 °C a frekvenci 1,59 Hz	80
Graf 32: Zjištěné komplexní moduly a fázové úhly při teplotě měření 60 °C	82
Graf 33: Zjištěné komplexní moduly a fázové úhly při frekvenci měření 1,59 Hz	83
Graf 34: Blackův diagram	84

8. SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1: Pokládka obrusné vrstvy netuhé vozovky [4]	12
Obrázek 2: Rozdíl mezi strukturami jednotlivých asfaltových směsí [1]	14
Obrázek 3: Chemická přísada Rediset WMX [15]	19
Obrázek 4: Asfaltová pěna [20]	20
Obrázek 5: Výroba asfaltové pěny ve zpěňovacím zařízení [19]	21
Obrázek 6: Schéma šaržové obalovny [21]	21
Obrázek 7: Teplá asfaltová směs v Dánsku [1]	27
Obrázek 8: Chemická přísada Thiopave od firmy Shell [27]	29
Obrázek 9: II/212 Horní Pochlovice – Kaceřov km 26,113 – 27,713 [28]	32
Obrázek 10: Šaržová obalovna v Bystřici nad Pernštejnem firmy COLAS CZ	38
Obrázek 11: Vyrobená asfaltová směs	38
Obrázek 12: Rázový zhutňovač	39
Obrázek 13: Výtlačné zařízení	40
Obrázek 14: Marshallova tělesa směsi 150 °C	40
Obrázek 15: Lamelový zhutňovač	41
Obrázek 16: Navážka asfaltové směsi	42
Obrázek 17: Zkušební desky směsi 150 °C	42
Obrázek 18: Zkušební desky směsi 130 °C	42
Obrázek 19: Otevřené odstředivací zařízení	43
Obrázek 20: Destilační zařízení	44
Obrázek 21: Extrahované pojivo ze směsi ACO 11+ F – 130 °C + podložka pro vzorky do DSR	45
Obrázek 22: Zařízení CYKLON-40	46
Obrázek 23: Zkušební vzorek v centrovacím rámu	47
Obrázek 24: Rozměry těles pro stanovení modulů tuhosti	49
Obrázek 25: Zařízení pro měření modulů tuhosti	50
Obrázek 26: Malé zkušební zařízení	52
Obrázek 27: Znázornění tlaků působících na zkušební těleso v případě použití cyklického zatížení pulzy s časovou prodlevou [37]	53
Obrázek 28: Triaxiální přístroj	54
Obrázek 29: Nádoba s asfaltovým pojivem	55
Obrázek 30: Penetrometr	56
Obrázek 31: Zařízení pro stanovení bodu měknutí metodou kroužek a kulička	57
Obrázek 32: Podstata fungování DSR [46]	58
Obrázek 33: Dynamický smykový reometr (DSR)	61
Obrázek 34: Marshallova tělesa směsi ACO 11+ F – 130 °C	62
Obrázek 35: Vzorek uložený v triaxiálním přístroji	62
Obrázek 36: Porušený vzorek po stanovení nízkoteplotních vlastností	66
Obrázek 37: Nařezané zkušební vzorky pro stanovení modulů tuhosti	74
Obrázek 38: Vzorek umístěný ve zkušebním zařízení	74
Obrázek 39: Zkušební deska nachystaná k provedení zkoušky pojíždění kolem	75
Obrázek 40: Poškozený vzorek v triaxiálním zařízení	77
Obrázek 41: Poškozený vzorek směsi ACO 11+ F – 130 °C	77
Obrázek 42: Zkušební vzorky po stanovení bodu měknutí	79

9. SEZNAM TABULEK

Tabulka 1: Redukce znečišťujících látek při použití teplé směsi [9]	16
Tabulka 2: Technické charakteristiky organických přísad [13]	18
Tabulka 3: Minimální stanovené hodnoty ERM a HL [24]	23
Tabulka 4: První využití teplé asfaltové směsi v praxi [26]	25
Tabulka 5: Produkce teplé asfaltové směsi v USA [1]	28
Tabulka 6: Projekty zkoumající teplou asfaltovou směs v USA [26]	28
Tabulka 7: Požadované vlastnosti asfaltové pěny [7]	31
Tabulka 8: Využití VPAS podle třídy dopravního zatížení [7]	31
Tabulka 9: Sítový rozbor jednotlivých frakcí kameniva [31]	34
Tabulka 10: Vlastnosti silničního asfaltu 50/70 [31]	35
Tabulka 11: Zrnitost směsi ACO 11+ F [34]	36
Tabulka 12: Výpočet mezerovitosti směsi ACO 11+ F	37
Tabulka 13: Výpočet tvaru a hmotnosti [44]	49
Tabulka 14: Rozměry těles pro stanovení modulů tuhosti	49
Tabulka 15: Kapalínová lázeň pro stanovení bodu měknutí [41]	57
Tabulka 16: Stanovení objemové hmotnosti a mezerovitosti Marshallových těles	62
Tabulka 17: Vyrobené zkušební desky	63
Tabulka 18: Výsledky zkoušky nízkoteplotních vlastností u směsi 150 °C	64
Tabulka 19: Výsledky zkoušky nízkoteplotních vlastností u směsi 130 °C	64
Tabulka 20: Hodnoty modulů tuhosti u směsi 150 °C	67
Tabulka 21: Hodnoty modulů tuhosti u směsi 130 °C	68
Tabulka 22: Výsledky zkoušky pojíždění kolem	75
Tabulka 23: Výsledky stanovení penetrace jehlou a bodu měknutí	79
Tabulka 24: Zjištěné komplexní moduly a fázové úhly u asfaltového pojiva 50/70 – 130 °C při teplotě měření 60 °C	81
Tabulka 25: Zjištěné komplexní moduly a fázové úhly u asfaltového pojiva 50/70 – 150 °C při teplotě měření 60 °C	81
Tabulka 26: Zjištěné komplexní moduly a fázové úhly u asfaltového pojiva 50/70 – 130 °C při frekvenci měření 1,59 Hz	82
Tabulka 27: Zjištěné komplexní moduly a fázové úhly u asfaltového pojiva 50/70 – 150 °C při frekvenci měření 1,59 Hz	83

10. SEZNAM ROVNIC

Rovnice 1: Výpočet parametru FI [24]	24
Rovnice 2: Stanovení mezerovitosti směsi	37
Rovnice 3: Výpočet komplexního modulu	48
Rovnice 4: Výpočet reálné složky komplexního modulu	48
Rovnice 5: Výpočet imaginární složky komplexního modulu	48
Rovnice 6: Výpočet modulu tuhosti S	49
Rovnice 7: Výpočet přírůstku hloubky vyjeté koleje WTSAIR	51
Rovnice 8: Výpočet poměrné hloubky vyjeté koleje PRDAIR	51
Rovnice 9: Výpočet celkového tlaku $\sigma_A(t)$	53
Rovnice 10: Výpočet kumulativního přetvoření ϵ_n	53
Rovnice 11: Vyjádření penetrační jednotky	55
Rovnice 12: Výpočet komplexního smykového modulu G^*	58
Rovnice 13: Poměr maximálního napětí k maximální deformaci	59

11. SEZNAM PŘÍLOH

Příloha A

- Vyrobená Marshallova tělesa

Příloha B

- Vyrobené zkušební desky

Příloha C

- Výsledky zkoušky nízkoteplotních vlastností

Příloha D

- Rozměry zkušebních těles pro stanovení modulů tuhosti

Příloha E

- Dílčí výsledky modulů tuhosti

Příloha F

- Odolnost proti trvalým deformacím – zkouška pojíždění kolem

Příloha G

- Dílčí výsledky komplexních modulů a fázových úhlů

Příloha H

- Grafy z vyhodnocení komplexních modulů a fázových úhlů

PŘÍLOHA A

- Vyrobená Marshallova tělesa

Marshallova tělesa směsi ACO 11+ F – 150 °C

ACO 11+ F - 150 °C			
150.1	150.2	150.3	Průměr
1213,9	1208,6	1209,7	1209,7
715,7	718,3	715,5	715,5
1218,8	1219,3	1217,5	1217,5
2409,8	2409,3	2406,7	2408,6

Marshallova tělesa směsi ACO 11+ F – 130 °C

ACO 11+ F - 130 °C			
130.1	130.2	130.3	Průměr
1206,3	1210,2	1212,0	1212,0
708,0	715,6	715,5	715,5
1207,3	1219,2	1219,9	1219,9
2412,9	2400,1	2399,8	2404,3

PŘÍLOHA B

- Vyrobené zkušební desky

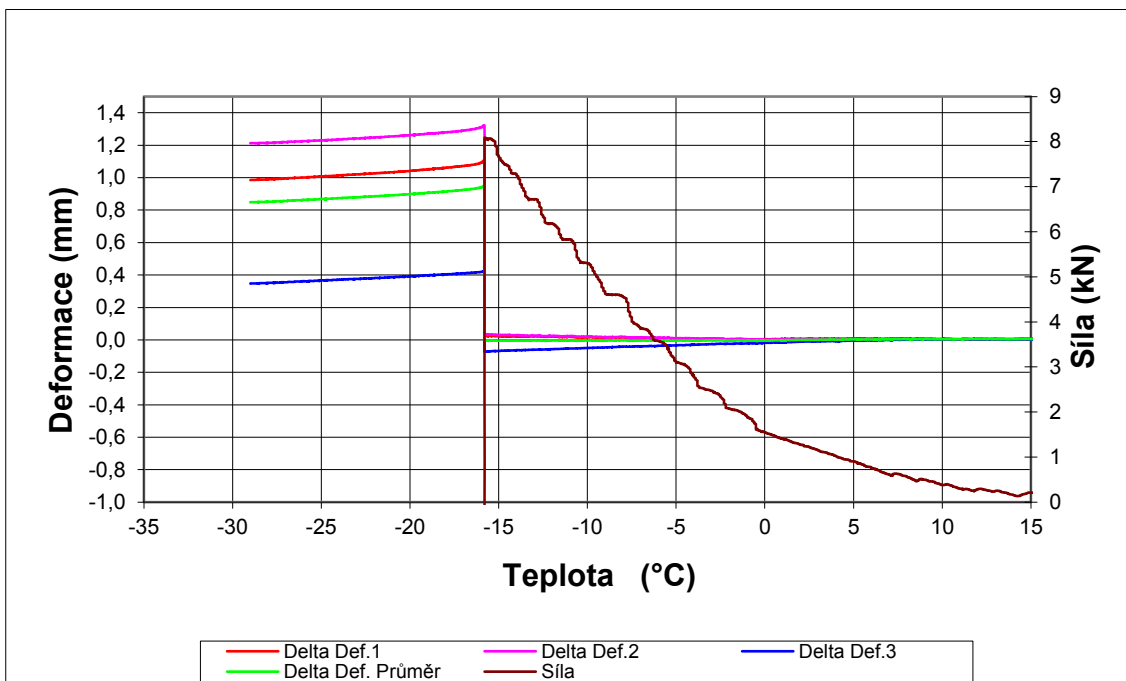
	ACO 11+ F - 150 °C					
Popis desky	150.1	150.2	150.3	150.4	150.5	150.6
Hmotnost suchá	9750	9663	9742	9720	9769	7804
Hmotnost pod vodou	5710	5648	5697	5650	5692	4578
Hmotnost po vytažení	9771	9700	9768	9752	9792	7833
Rozměry (tloušťka)	50,0	50,0	50,6	50,2	49,9	40,1
	50,6	50,1	50,2	50,4	50,2	40,0
	50,9	50,1	50,1	50,2	49,9	40,2
	49,9	50,6	50,4	50,3	50,2	40,2
	50,2	50,0	50,0	50,2	50,3	40,3
	50,1	50,1	50,1	50,4	50,2	39,9
	50,2	49,9	50,0	50,3	50,1	40,0
	50,2	50,4	50,3	50,1	49,9	40,1
	50,0	50,9	50,4	50,0	50,2	40,2
	50,1	50,8	50,2	50,2	50,0	40,0
Rozměry (šířka)	261,0	261,3	261,5	262,0	261,3	261,3
	260,9	261,2	261,6	261,8	261,1	261,1
	261,0	261,5	261,5	262,0	261,2	261,3
Rozměry (délka)	322,0	322,4	322,5	322,5	321,9	322,0
	322,1	322,0	322,6	322,6	322,6	321,8
	322,5	322,8	322,3	322,1	322,3	322,1
Tloušťka průměr	50,2	50,3	50,2	50,2	50,1	40,1
Šířka průměr	261,0	261,3	261,5	261,9	261,2	261,2
Délka průměr	322,2	322,4	322,5	322,4	322,3	322,0
teplota v lázni	20,9	20,9	20,9	20,9	18,6	21,6
objemová hmotnost vody	998,1	998,1	998,1	998,1	998,6	997,9
Objemová hmotnost (z vážení)	2396,4	2380,3	2388,5	2365,1	2379,3	2392,6
Maximální objemová hmotnost	2457,0	2457,0	2457,0	2457,0	2457,0	2457,0
Mezerovitost (z vážení)	2,5	3,1	2,8	3,7	3,2	2,6
Objemová hmotnost	2400,0	2400,0	2400,0	2400,0	2400,0	2400,0
Míra zhutnění	99,8%	99,2%	99,5%	98,5%	99,1%	99,7%
Zkouška	modul tuhosti	modul tuhosti	nízkotep. vlast.		modul tuhosti	trvalé deformace

	ACO 11+ F - 130 °C					
Popis desky	130.1	130.2	130.3	130.4	130.5	130.6
Hmotnost suchá	9747	9776	9757	9771	7771	7826
Hmotnost pod vodou	5720	5729	5719	5714	4522	4571
Hmotnost po vytažení	9782	9800	9801	9798	7794	7836
Rozměry (tloušťka)	50,0	50,3	50,8	49,9	40,0	40,1
	50,1	50,0	50,6	50,2	40,2	39,9
	50,3	50,0	50,4	49,9	40,1	40,2
	49,9	50,1	50,0	50,2	40,3	40,3
	50,4	50,2	50,1	50,3	39,9	40,0
	50,3	50,0	50,1	50,2	40,0	40,1
	50,2	49,9	50,0	50,1	40,2	40,2
	50,1	50,1	50,1	49,9	40,1	40,0
	50,0	50,2	50,4	50,2	39,9	40,0
	50,1	50,0	50,2	50,0	40,0	40,1
Rozměry (šířka)	261,3	261,6	261,4	261,3	261,4	261,2
	261,2	261,5	261,3	261,1	261,3	261,1
	261,2	261,6	261,2	261,2	261,5	261,5
Rozměry (délka)	322,6	322,1	322,5	321,9	322,0	321,9
	322,1	322,8	322,7	322,6	321,8	322,0
	322,7	322,6	322,1	322,3	322,5	322,3
Tloušťka průměr	50,1	50,1	50,3	50,1	40,1	40,1
Šířka průměr	261,2	261,6	261,3	261,2	261,4	261,3
Délka průměr	322,5	322,5	322,4	322,3	322,1	322,1
teplota v lázni	20,9	21,6	21,6	21,4	21,4	21,4
objemová hmotnost vody	998,1	997,9	997,9	998,0	998,0	998,0
Objemová hmotnost (z vážení)	2395,0	2396,4	2385,3	2387,7	2370,2	2392,1
Maximální objemová hmotnost	2457,0	2457,0	2457,0	2457,0	2457,0	2457,0
Mezerovitost (z vážení)	2,5	2,5	2,9	2,8	3,5	2,6
Objemová hmotnost	2400,0	2400,0	2400,0	2400,0	2400,0	2400,0
Míra zhutnění	99,8%	99,8%	99,4%	99,5%	98,8%	99,7%
Zkouška	modul tuhosti	modul tuhosti	modul tuhosti	nízkotep. vlast.		trvalé deformace

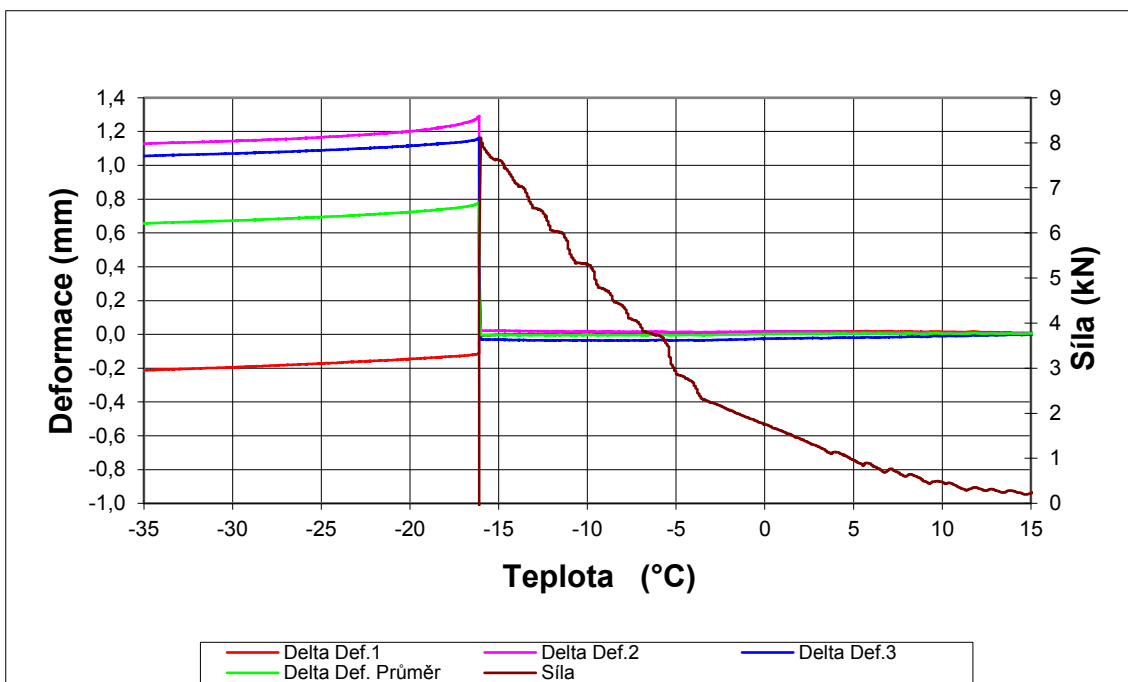
PŘÍLOHA C

- Výsledky zkoušky nízkoteplotních vlastností

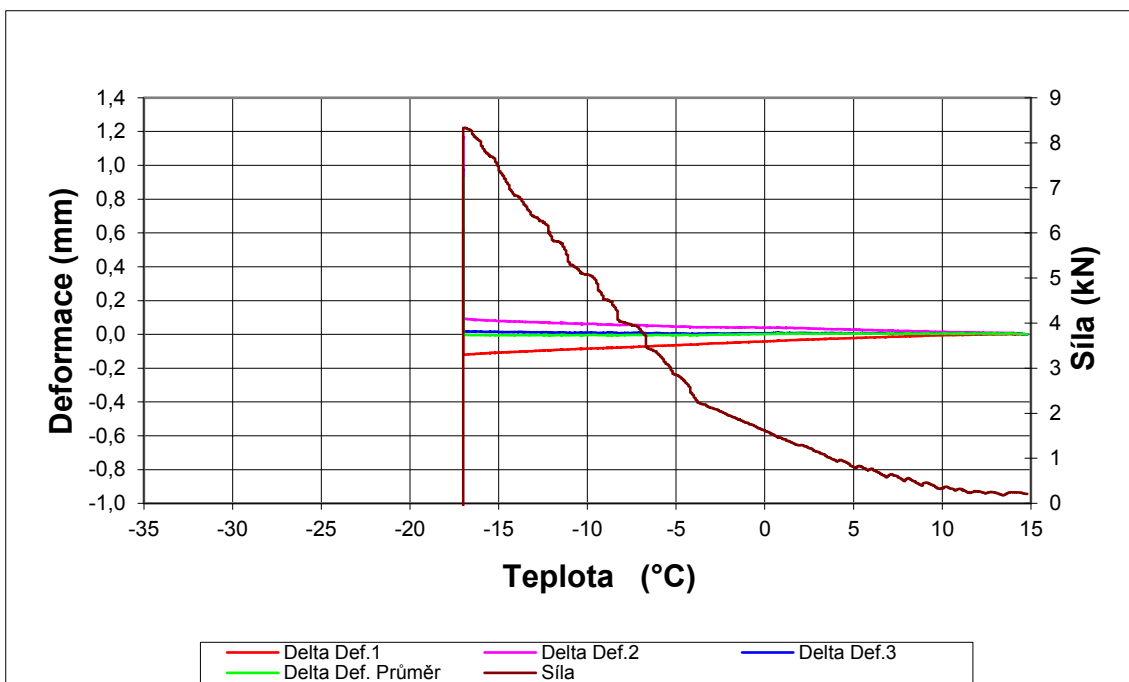
Akce :	Diplomová práce
Asfaltová směs :	ACO 11+ F - 150 °C - 150.3.1.
Rozměry zkušebního tělesa - mm :	50 x 50 x 250
Datum zkoušky :	5.10.2018
Zkoušku provedl :	Machel
Teplota temperování - °C :	10
Doba temperování - min. :	15
Rychlost ochlazování - °C/hod :	10
Max. síla při porušení - kN :	8,09
Max. napětí při porušení - MPa :	3,24
Teplota v komoře při porušení - °C :	-18,9
Teplota vzorku při porušení - °C :	-15,8



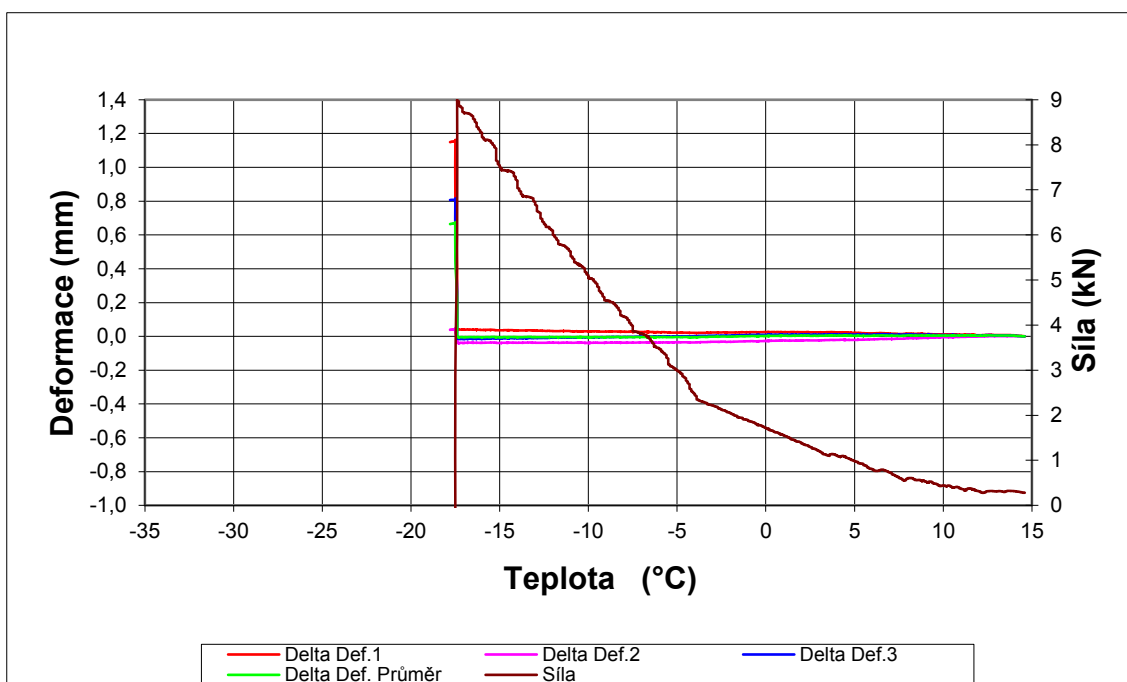
Akce :	Diplomová práce
Asfaltová směs :	ACO 11+ F - 150 °C - 150.3.2.
Rozměry zkušebního tělesa - mm :	50 x 50 x 200
Datum zkoušky :	9.10.2018
Zkoušku provedl :	Machel
Teplota temperování - °C :	10
Doba temperování - min. :	15
Rychlost ochlazování - °C/hod :	10
Max. síla při porušení - kN :	8,11
Max. napětí při porušení - MPa :	3,25
Teplota v komoře při porušení - °C :	-19,0
Teplota vzorku při porušení - °C :	-16,0



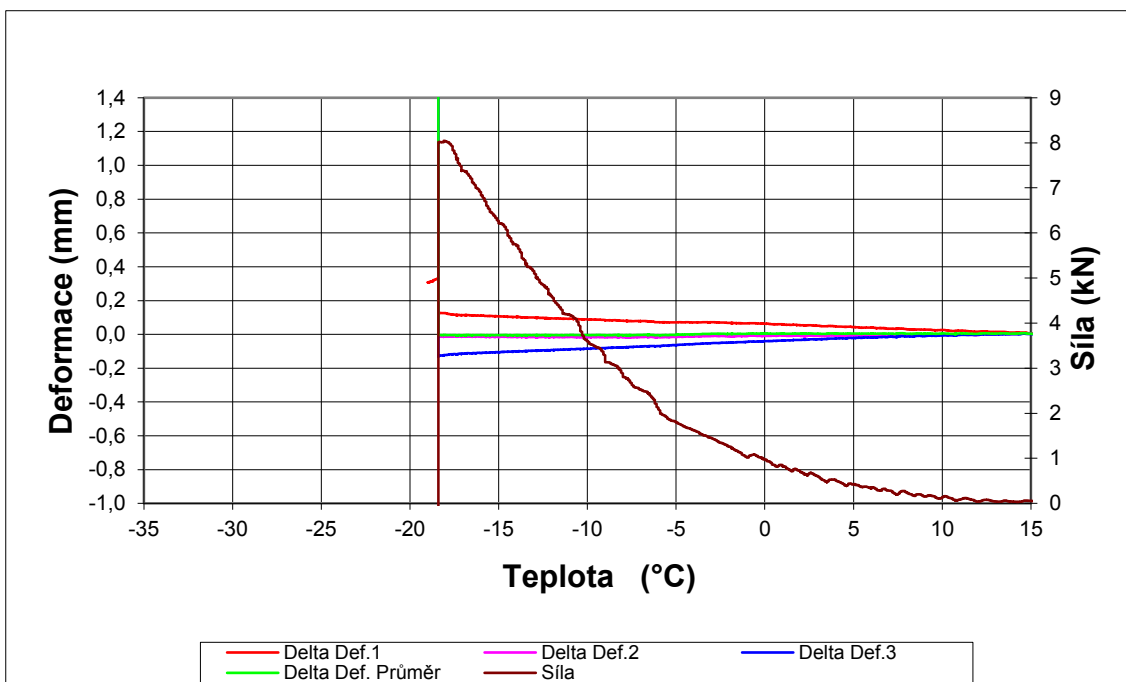
Akce :	Diplomová práce
Asfaltová směs :	ACO 11+ F - 150 °C - 150.3.3.
Rozměry zkušebního tělesa - mm :	50 x 50 x 200
Datum zkoušky :	16.10.2018
Zkoušku provedl :	Machel
Teplota temperování - °C :	10
Doba temperování - min. :	15
Rychlost ochlazování - °C/hod :	10
Max. síla při porušení - kN :	8,33
Max. napětí při porušení - MPa :	3,33
Teplota v komoře při porušení - °C :	-20,0
Teplota vzorku při porušení - °C :	-16,9



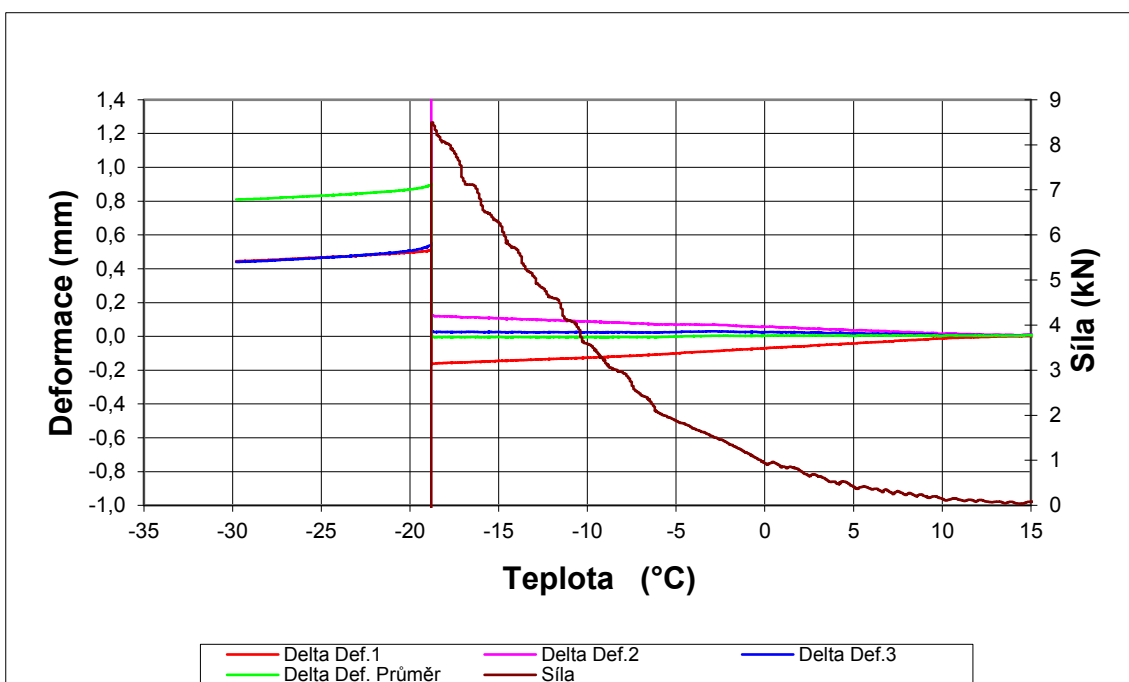
Akce :	Diplomová práce
Asfaltová směs :	ACO 11+ F - 150 °C - 150.3.4.
Rozměry zkušebního tělesa - mm :	50 x 50 x 200
Datum zkoušky :	22.10.2018
Zkoušku provedl :	Machel
Teplota temperování - °C :	10
Doba temperování - min. :	15
Rychlost ochlazování - °C/hod :	10
Max. síla při porušení - kN :	9,00
Max. napětí při porušení - MPa :	3,60
Teplota v komoře při porušení - °C :	-20,3
Teplota vzorku při porušení - °C :	-17,4



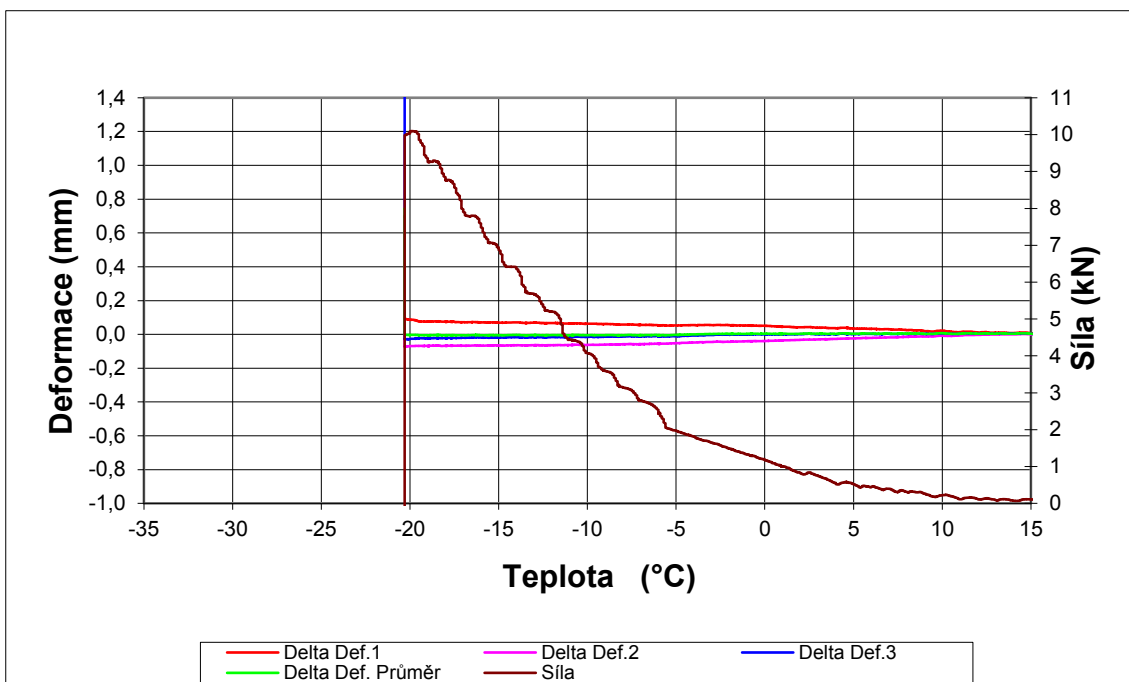
Akce :	Diplomová práce
Asfaltová směs :	ACO 11+ F - 130 °C - 130.4.1.
Rozměry zkušebního tělesa - mm :	50 x 50 x 250
Datum zkoušky :	8.10.2018
Zkoušku provedl :	Machel
Teplota temperování - °C :	10
Doba temperování - min. :	15
Rychlost ochlazování - °C/hod :	10
Max. síla při porušení - kN :	8,05
Max. napětí při porušení - MPa :	3,22
Teplota v komoře při porušení - °C :	-21,4
Teplota vzorku při porušení - °C :	-18,1



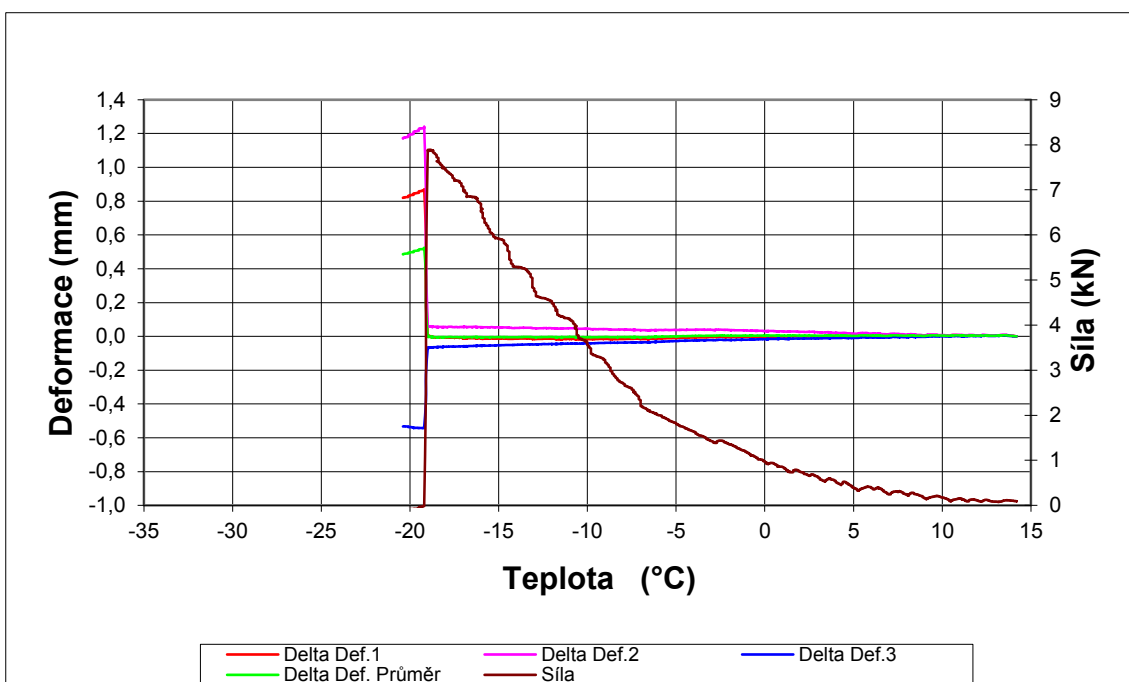
Akce :	Diplomová práce
Asfaltová směs :	ACO 11+ F - 130 °C - 130.4.2.
Rozměry zkušebního tělesa - mm :	50 x 50 x 200
Datum zkoušky :	10.10.2018
Zkoušku provedl :	Machel
Teplota temperování - °C :	10
Doba temperování - min. :	15
Rychlost ochlazování - °C/hod :	10
Max. síla při porušení - kN :	8,50
Max. napětí při porušení - MPa :	3,40
Teplota v komoře při porušení - °C :	-22,3
Teplota vzorku při porušení - °C :	-18,8



Akce :	Diplomová práce
Asfaltová směs :	ACO 11+ F - 130 °C - 130.4.3.
Rozměry zkušebního tělesa - mm :	50 x 50 x 200
Datum zkoušky :	12.10.2018
Zkoušku provedl :	Machel
Teplota temperování - °C :	10
Doba temperování - min. :	15
Rychlost ochlazování - °C/hod :	10
Max. síla při porušení - kN :	10,10
Max. napětí při porušení - MPa :	4,04
Teplota v komoře při porušení - °C :	-23,3
Teplota vzorku při porušení - °C :	-19,9



Akce :	Diplomová práce
Asfaltová směs :	ACO 11+ F - 130 °C - 130.4.4.
Rozměry zkušebního tělesa - mm :	50 x 50 x 200
Datum zkoušky :	17.10.2018
Zkoušku provedl :	Machel
Teplota temperování - °C :	10
Doba temperování - min. :	15
Rychlost ochlazování - °C/hod :	10
Max. síla při porušení - kN :	7,89
Max. napětí při porušení - MPa :	3,16
Teplota v komoře při porušení - °C :	-21,9
Teplota vzorku při porušení - °C :	-18,9



PŘÍLOHA D

- Rozměry zkušebních těles pro stanovení modulů tuhosti

ACO 11+ F - 150 °C					
vzorek	H	B	b	e	m
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[g]
150.1.1	252,2	70,0	26,4	49,9	1391,7
150.1.2	251,4	70,9	26,6	49,7	1429,6
150.1.3	251,5	71,0	26,0	49,8	1410,3
150.1.4	251,0	70,8	25,8	49,8	1425,8
150.1.5	250,3	70,4	25,8	50,0	1411,0
150.2.1	250,4	71,4	26,4	50,5	1437,0
150.2.2	250,8	70,6	27,7	50,4	1441,5
150.2.3	250,8	71,2	26,0	49,9	1434,5
150.2.4	251,4	70,8	25,8	49,8	1377,1
150.2.5	251,3	70,8	24,6	49,8	1361,6
150.5.1	253,7	70,9	26,1	49,7	1412,1
150.5.2	253,7	71,2	25,7	49,4	1401,9
150.5.3	253,6	70,8	27,4	49,8	1448,4
150.5.4	253,3	70,8	26,4	50,0	1445,9
150.5.5	253,0	70,5	25,6	50,6	1459,2

ACO 11+ F - 130 °C					
vzorek	H	B	b	e	m
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[g]
130.1.1	249,4	71,3	24,5	50,5	1423,7
130.1.2	249,8	69,9	27,8	50,2	1461,7
130.1.3	249,6	70,2	25,4	49,6	1386,3
130.1.4	249,4	70,8	27,4	49,8	1417,7
130.1.5	249,3	71,2	25	49,8	1356,9
130.2.1	250,5	71,4	26	50,4	1453,3
130.2.2	250,5	71,2	26,2	50,2	1456,1
130.2.3	250,4	71,4	25,4	50	1428,2
130.2.4	250,4	70,5	27,4	49,9	1409,0
130.2.5	250,3	70,4	26,2	50	1367,2
130.3.1	251,3	70,9	26	50	1362,4
130.3.2	251,2	70,5	26,2	50	1405,3
130.3.3	251,4	70,4	26,3	49,8	1411,6
130.3.4	250,9	70,2	26	49,8	1431,7
130.3.5	251,2	70,1	25,6	50,3	1434,1

PŘÍLOHA E

- Dílčí výsledky modulů tuhosti

ACO 11+ F - 150 °C - teplota zkoušení -5 °C						
Vzorek	5 Hz	10 Hz	15 Hz	20 Hz	25 Hz	5 Hz
150.1.1	10388	10692	10736	10841	10852	10125
150.1.2	13907	14228	14465	14642	14747	13260
150.1.3	13544	13971	14230	14418	14567	13645
150.1.4	13512	13899	14152	14429	14550	13465
150.2.1	12463	12764	12901	13097	13144	12403
150.2.2	12321	12675	12865	12991	13056	12265
150.2.3	14809	15103	15450	15690	15976	14787
150.2.4	12165	12398	12657	12898	12930	12167
150.2.5	11059	11409	11555	11790	11784	11001
150.5.1	12327	12629	12827	13021	13193	12380
150.5.2	11432	11742	11934	12022	12154	11499
150.5.3	12601	12886	13052	13279	13393	12516
150.5.4	14684	15085	15365	15398	15699	14768
150.5.5	14606	15063	15340	15515	15833	14726
Průměr	12844	13182	13395	13574	13706	

ACO 11+ F - 130 °C - teplota zkoušení -5 °C						
Vzorek	5 Hz	10 Hz	15 Hz	20 Hz	25 Hz	5 Hz
130.1.1	12607	12875	13058	13185	13221	12424
130.1.2	15034	15621	15734	15833	15959	15156
130.1.3	12392	12687	12861	13010	13133	12243
130.1.4	12784	13144	13226	13467	13607	12763
130.2.1	12839	13274	13578	13980	14074	13109
130.2.2	13360	13767	14189	14417	14676	13652
130.2.3	12844	13386	13692	13890	14068	13134
130.2.4	12785	13032	13288	13397	13512	12736
130.2.5	11857	12126	12326	12488	12682	11826
130.3.1	11137	11525	11745	12022	12127	11386
130.3.2	12532	12849	13104	13348	13386	12560
130.3.3	11050	11353	11487	11678	11719	11017
130.3.4	13597	14025	14290	14419	14557	13627
130.3.5	11142	11452	11599	11752	11843	11192
Průměr	12569	12937	13156	13349	13469	

ACO 11+ F - 150 °C - teplota zkoušení +10 °C						
Vzorek	5 Hz	10 Hz	15 Hz	20 Hz	25 Hz	5 Hz
150.1.1	7359	7742	8035	8185	8260	7234
150.1.2	9911	10599	10876	11216	11414	9999
150.1.3	9914	10602	10910	11372	11557	10136
150.1.4	10532	10985	11321	11653	11799	10492
150.2.1	10448	10888	11229	11511	11773	10449
150.2.2	10452	10832	11199	11501	11832	10284
150.2.3	7823	8053	8214	8352	8357	7281
150.2.4	9470	9911	10190	10432	10650	9302
150.2.5	10452	10866	11297	11563	11699	10501
150.5.1	9632	10043	10285	10453	10671	9565
150.5.2	9901	10532	10866	11253	11432	9992
150.5.3	9702	10144	10401	10599	10842	9699
150.5.4	10543	11181	11535	11930	12047	10714
150.5.5	11456	12004	12342	12652	12796	11228
Průměr	9828	10313	10621	10905	11081	

ACO 11+ F - 130 °C - teplota zkoušení +10 °C						
Vzorek	5 Hz	10 Hz	15 Hz	20 Hz	25 Hz	5 Hz
130.1.1	10263	10960	11285	11583	11769	10354
130.1.2	10104	10810	11190	11562	11825	10293
130.1.3	9807	10271	10681	11035	11222	9704
130.1.4	9265	9752	10084	10404	10696	9259
130.2.1	9923	10555	10953	11334	11509	10024
130.2.2	10772	11347	11675	11908	12184	10817
130.2.3	10294	10910	11272	11559	11855	10374
130.2.4	8832	9362	9805	10263	10306	8902
130.2.5	7960	8607	9051	9425	9629	8207
130.3.1	7987	8467	8774	9170	9301	8078
130.3.2	9662	10211	10610	10924	11151	9800
130.3.3	8430	8867	9129	9424	9442	8464
130.3.4	10222	10729	11218	11599	11879	10326
130.3.5	8595	8902	9321	9599	9653	8501
Průměr	9437	9982	10361	10699	10887	

ACO 11+ F - 150 °C - teplota zkoušení +15 °C						
Vzorek	5 Hz	10 Hz	15 Hz	20 Hz	25 Hz	5 Hz
150.1.1	7076	7823	8393	8752	9063	7328
150.1.2	8869	9574	9992	10312	10515	8906
150.1.3	8758	9550	10041	10540	10737	8703
150.1.4	9289	9987	10445	10906	11197	9148
150.1.5	631	661	673	720	707	611
150.2.1	8488	9039	9341	9731	9898	8401
150.2.2	8473	9054	9423	9798	9954	8455
150.2.3	8584	9207	9574	9939	10212	8551
150.2.4	7867	8481	8854	9135	9319	7949
150.2.5	7926	8495	8825	9155	9364	7898
150.5.1	8654	9397	9668	10007	10337	8622
150.5.2	7987	8618	9083	9455	9698	8018
150.5.3	8513	9263	9618	10002	10306	8647
150.5.4	8883	9635	9885	10361	10585	8966
150.5.5	9173	9869	10321	10667	10947	9358
Průměr	8467	9142	9533	9911	10152	

ACO 11+ F - 130 °C - teplota zkoušení +15 °C						
Vzorek	5 Hz	10 Hz	15 Hz	20 Hz	25 Hz	5 Hz
130.1.1	8450	9124	9600	10079	10235	8456
130.1.2	8228	8920	9429	9849	10125	8205
130.1.3	7962	8893	9363	9688	9814	7903
130.1.4	7552	8251	8672	9289	9495	7669
130.1.5	6340	6931	7256	7604	7785	6276
130.2.1	8804	9475	9828	10230	10463	8708
130.2.2	8981	9620	9989	10371	10613	8872
130.2.3	8625	9346	9692	10061	10337	8660
130.2.4	7860	8447	8709	9177	9315	7724
130.2.5	7224	7860	8208	8524	8774	7121
130.3.1	6945	7527	7896	8216	8407	6961
130.3.2	7655	8398	8822	9236	9526	7845
130.3.3	7582	8127	8497	8855	8987	7559
130.3.4	8265	8944	9482	9972	10170	8484
130.3.5	8085	8807	9261	9705	9999	8270
Průměr	8016	8696	9103	9518	9733	

ACO 11+ F - 150 °C - teplota zkoušení +25 °C						
Vzorek	5 Hz	10 Hz	15 Hz	20 Hz	25 Hz	5 Hz
150.1.1	4541	5147	5537	5948	6187	4364
150.1.2	5227	5958	6404	6939	7132	5102
150.1.3	5318	5982	6369	6928	7220	5160
150.1.4	5501	6299	6693	7093	7165	5532
150.2.1	5597	6329	6733	7115	7237	5646
150.2.2	5601	6341	6752	7143	7255	5585
150.2.3	4870	5282	5532	5779	5929	4710
150.2.4	5567	6244	6619	6962	7165	5485
150.2.5	5086	5724	6020	6426	6601	5025
150.5.1	5505	6129	6592	7024	7206	5522
150.5.2	5344	5991	6354	6922	7256	5401
150.5.3	6192	6844	7363	7713	8023	6128
150.5.4	6338	6944	7421	7892	8077	6152
150.5.5	6406	7124	7701	8160	8365	6310
Průměr	5507	6167	6578	7003	7201	

ACO 11+ F - 130 °C - teplota zkoušení +25 °C						
Vzorek	5 Hz	10 Hz	15 Hz	20 Hz	25 Hz	5 Hz
130.1.1	5313	6024	6490	6995	7189	5263
130.1.2	5637	6390	6868	7260	7589	5603
130.1.3	5236	5827	6322	6807	6929	5101
130.1.4	4717	5478	5979	6337	6726	4581
130.2.1	4786	5461	5945	6434	6629	4851
130.2.2	5673	6323	6927	7336	7725	5607
130.2.3	5642	6300	6825	7294	7479	5207
130.2.4	5092	5700	6205	6640	6783	5164
130.2.5	4522	5185	5676	6108	6395	4580
130.3.1	4568	5079	5531	5937	6088	4479
130.3.2	5506	6144	6666	7096	7345	5425
130.3.3	5295	5896	6268	6680	6686	5159
130.3.4	5979	6803	7257	7714	7884	5863
130.3.5	5201	5832	6199	6603	6701	5255
Průměr	5226	5889	6368	6803	7011	

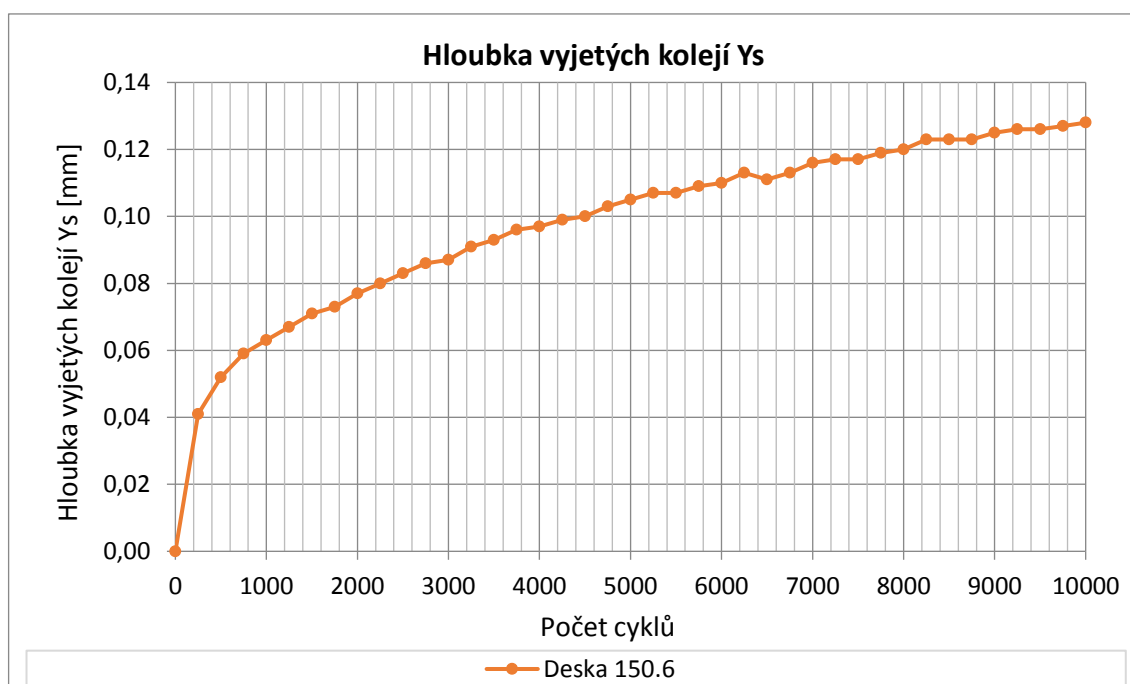
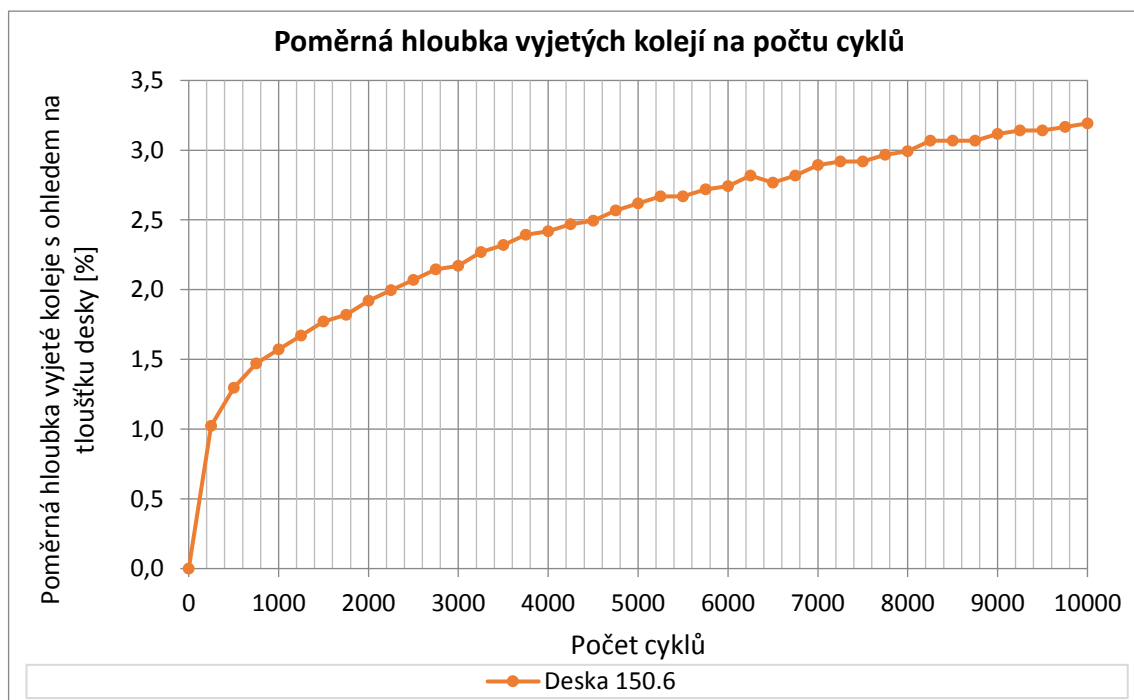
ACO 11+ F - 150 °C - teplota zkoušení +40 °C						
Vzorek	5 Hz	10 Hz	15 Hz	20 Hz	25 Hz	5 Hz
150.1.1	1511	1946	2344	2686	3076	1542
150.1.2	1806	2339	2782	2949	3378	1706
150.1.3	1743	2401	2754	3099	3482	1732
150.1.4	1719	2393	2713	3062	3501	1722
150.2.1	2161	2649	2997	3315	3780	2143
150.2.2	2104	2583	3014	3261	3570	2094
150.2.3	1772	2099	2277	2504	2588	1737
150.2.4	1758	2087	2370	2585	2693	1683
150.2.5	2154	2596	3011	3286	3601	2101
150.5.1	1743	2054	2211	2467	2501	1722
150.5.2	1638	1946	2136	2309	2369	1635
150.5.3	2469	3059	3438	3700	4012	2378
150.5.4	2632	3133	3464	3771	4088	2391
150.5.5	2653	3234	3673	3954	4263	2519
Průměr	1990	2466	2799	3068	3350	

ACO 11+ F - 130 °C - teplota zkoušení +40 °C						
Vzorek	5 Hz	10 Hz	15 Hz	20 Hz	25 Hz	5 Hz
130.1.1	1523	2166	2538	2600	3034	1390
130.1.2	1496	2135	2762	2790	3101	1503
130.1.3	1488	2009	2380	2912	3159	1338
130.1.4	1413	1920	2357	2601	2984	1253
130.2.1	1926	2533	2984	3183	3546	1811
130.2.2	2428	2945	3411	3757	4085	2208
130.2.3	2073	2613	3109	3284	3527	2018
130.2.4	1981	2440	2856	3119	3420	1845
130.2.5	1613	1998	2418	2599	3007	1497
130.3.1	1689	2149	2562	2772	3012	1620
130.3.2	2497	3022	3287	3711	3952	2266
130.3.3	1785	2271	2716	2856	3119	1714
130.3.4	2198	2744	3240	3374	3633	1970
130.3.5	1832	2394	2810	3084	3211	1895
Průměr	1853	2381	2816	3046	3342	

PŘÍLOHA F

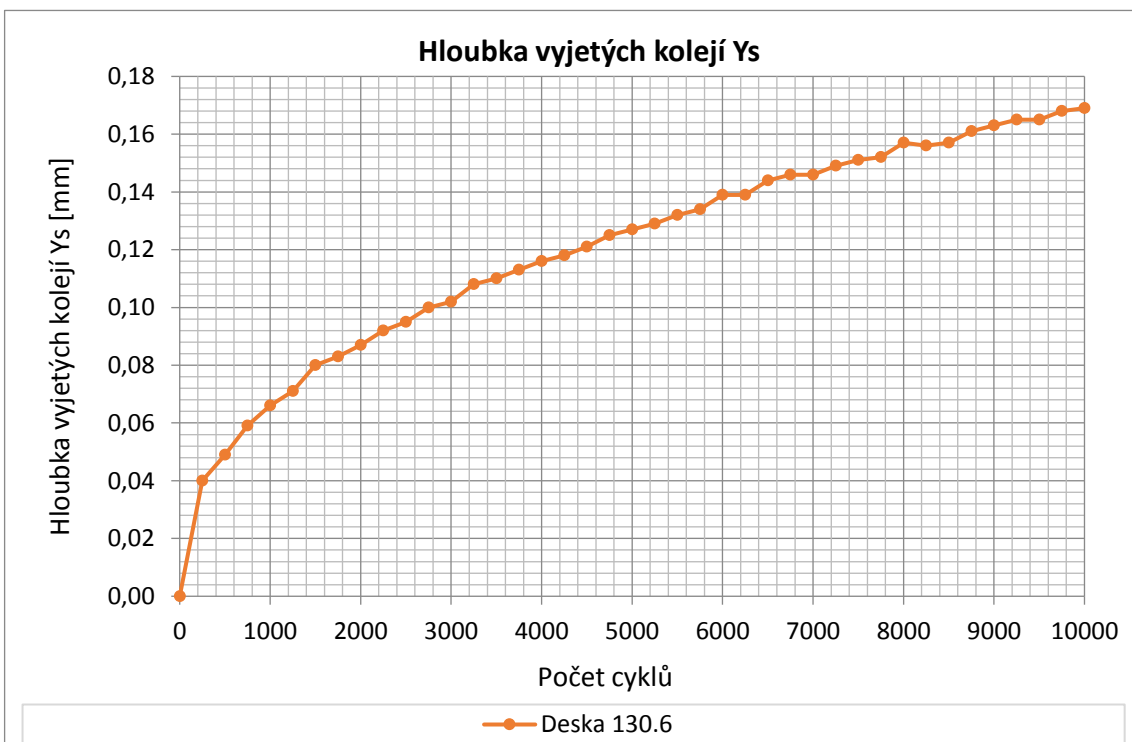
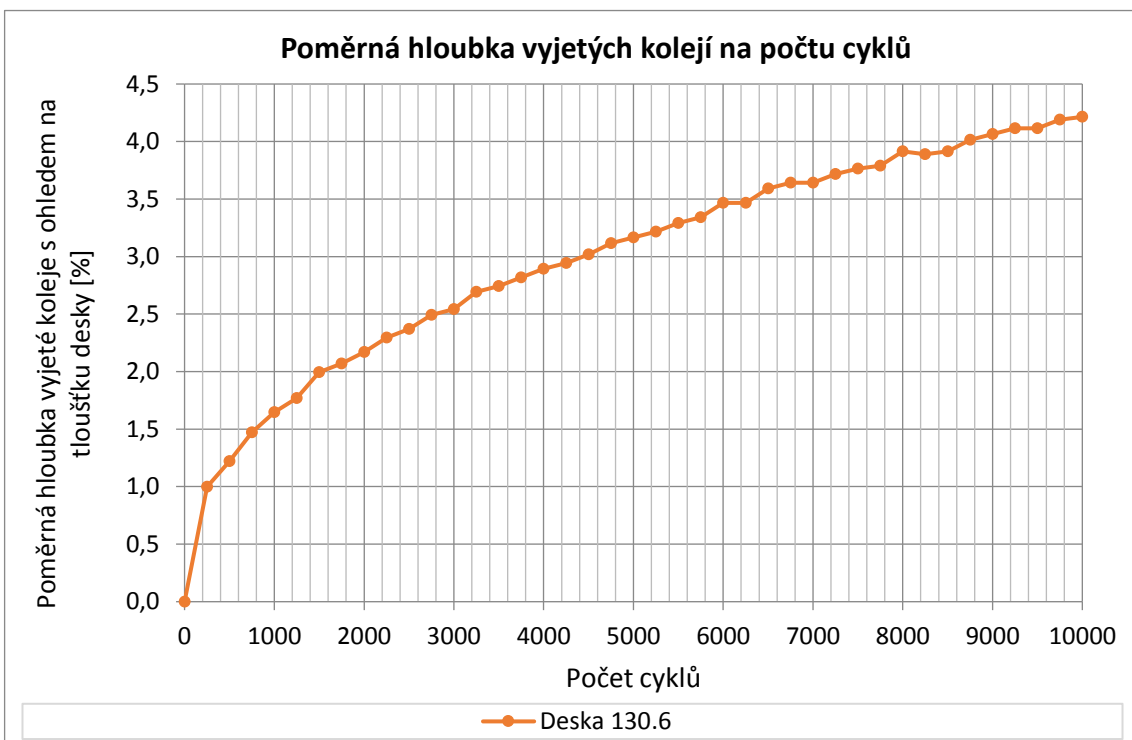
- Odolnost proti trvalým deformacím – zkouška pojíždění kolem

Deska 150.6				
ACO 11+ F - 150 °C				
Teplota zkoušení: 50 °C				
Tloušťka	Y _{s,10 000}	Y _{s,5 000}	PRD _{AIR}	WTS _{AIR}
(mm)	(mm)	(mm)	(%)	(mm/10 ³)
40,1	0,13	0,11	2,62	0,046



Deska 150.6				
Počet cyklů	Počet pojezdů	Teplota [C°]	P deska Ys [mm]	P deska Ys [mm]
0	0	48,0	1,09	0,00
250	500	49,5	1,13	0,04
500	1000	49,6	1,14	0,05
750	1500	49,7	1,15	0,06
1000	2000	49,7	1,15	0,06
1250	2500	49,7	1,15	0,07
1500	3000	49,7	1,16	0,07
1750	3500	49,7	1,16	0,07
2000	4000	49,7	1,16	0,08
2250	4500	49,7	1,17	0,08
2500	5000	49,7	1,17	0,08
2750	5500	49,8	1,17	0,09
3000	6000	49,8	1,17	0,09
3250	6500	49,7	1,18	0,09
3500	7000	49,8	1,18	0,09
3750	7500	49,8	1,18	0,10
4000	8000	49,8	1,18	0,10
4250	8500	49,8	1,19	0,10
4500	9000	49,8	1,19	0,10
4750	9500	49,8	1,19	0,10
5000	10000	49,8	1,19	0,11
5250	10500	49,8	1,19	0,11
5500	11000	49,9	1,19	0,11
5750	11500	49,8	1,20	0,11
6000	12000	49,7	1,20	0,11
6250	12500	49,9	1,20	0,11
6500	13000	49,9	1,20	0,11
6750	13500	49,9	1,20	0,11
7000	14000	49,8	1,20	0,12
7250	14500	49,9	1,20	0,12
7500	15000	49,8	1,20	0,12
7750	15500	49,9	1,21	0,12
8000	16000	49,8	1,21	0,12
8250	16500	49,9	1,21	0,12
8500	17000	49,9	1,21	0,12
8750	17500	49,9	1,21	0,12
9000	18000	49,9	1,21	0,13
9250	18500	49,9	1,21	0,13
9500	19000	49,8	1,21	0,13
9750	19500	49,8	1,21	0,13
10000	20000	49,9	1,22	0,13

Deska 130.6				
ACO 11+ F - 130 °C				
Teplota zkoušení : 50 °C				
Tloušťka	Y _{s,10 000}	Y _{s,5 000}	PRD _{AIR}	WTS _{AIR}
(mm)	(mm)	(mm)	(%)	(mm/10 ³)
40,1	0,17	0,13	3,17	0,063



Deska 130.6				
Počet cyklů	Počet pojezdů	Teplota [C°]	P deska Ys [mm]	P deska Ys [mm]
0	0	41,5	1,13	0,00
250	500	45,7	1,17	0,04
500	1000	48,1	1,18	0,05
750	1500	49,4	1,19	0,06
1000	2000	49,4	1,20	0,07
1250	2500	49,5	1,20	0,07
1500	3000	49,5	1,21	0,08
1750	3500	49,5	1,21	0,08
2000	4000	49,6	1,22	0,09
2250	4500	49,6	1,22	0,09
2500	5000	49,6	1,22	0,10
2750	5500	49,6	1,23	0,10
3000	6000	49,6	1,23	0,10
3250	6500	49,7	1,24	0,11
3500	7000	49,7	1,24	0,11
3750	7500	49,7	1,24	0,11
4000	8000	49,7	1,25	0,12
4250	8500	49,7	1,25	0,12
4500	9000	49,7	1,25	0,12
4750	9500	49,7	1,25	0,13
5000	10000	49,7	1,26	0,13
5250	10500	49,8	1,26	0,13
5500	11000	49,7	1,26	0,13
5750	11500	49,7	1,26	0,13
6000	12000	49,8	1,27	0,14
6250	12500	49,8	1,27	0,14
6500	13000	50,0	1,27	0,14
6750	13500	49,8	1,28	0,15
7000	14000	49,8	1,28	0,15
7250	14500	49,8	1,28	0,15
7500	15000	49,9	1,28	0,15
7750	15500	49,8	1,28	0,15
8000	16000	49,9	1,29	0,16
8250	16500	49,8	1,29	0,16
8500	17000	49,9	1,29	0,16
8750	17500	49,9	1,29	0,16
9000	18000	49,9	1,29	0,16
9250	18500	49,9	1,29	0,17
9500	19000	49,9	1,29	0,17
9750	19500	49,8	1,30	0,17
10000	20000	49,9	1,30	0,17

PŘÍLOHA G

- Dílčí výsledky komplexních modulů a fázových úhlů

Silniční asfalt 50/70 - 150 °C			
Teplota měření [°C]	Frekvence [Hz]	G* [kPa]	Fázový úhel [°]
10	10	74000,00	28,17
10	7,943	69300,00	28,61
10	6,31	65110,00	29,12
10	5,012	60680,00	29,73
10	3,981	56470,00	30,19
10	3,162	52530,00	30,68
10	2,512	48670,00	31,18
10	1,995	45070,00	31,65
10	1,585	41700,00	32,16
10	1,259	38510,00	32,72
10	1	35590,00	33,22
10	0,7943	32800,00	33,67
10	0,631	30180,00	34,31
10	0,5012	27670,00	34,95
10	0,3981	25210,00	35,21
10	0,3162	23050,00	35,79
10	0,2512	21090,00	37,04
10	0,1995	19420,00	37,34
10	0,1585	17530,00	39,34
10	0,1259	15940,00	39,45
10	0,1	14710,00	39,6
15	10	45450,00	31,96
15	7,943	41900,00	32,62
15	6,31	38880,00	33,19
15	5,012	35830,00	33,81
15	3,981	33000,00	34,31
15	3,162	30380,00	34,84
15	2,512	27880,00	35,36
15	1,995	25570,00	35,86
15	1,585	23430,00	36,41
15	1,259	21410,00	36,98
15	1	19620,00	37,55
15	0,7943	17910,00	37,95
15	0,631	16300,00	38,66
15	0,5012	14840,00	39,09
15	0,3981	13460,00	38,87
15	0,3162	12050,00	40,1
15	0,2512	11050,00	41,41
15	0,1995	10180,00	41,49

15	0,1585	8963,00	42,94
15	0,1259	8077,00	45,16
15	0,1	7330,00	45,68
20	10	23620,00	37,91
20	7,943	21340,00	38,52
20	6,31	19470,00	39,18
20	5,012	17670,00	39,91
20	3,981	16060,00	40,45
20	3,162	14580,00	41,03
20	2,512	13210,00	41,59
20	1,995	11950,00	42,13
20	1,585	10810,00	42,66
20	1,259	9744,00	43,29
20	1	8795,00	43,88
20	0,7943	7913,00	44,45
20	0,631	7143,00	45,02
20	0,5012	6424,00	45,08
20	0,3981	5696,00	45,83
20	0,3162	5131,00	46,86
20	0,2512	4576,00	47,36
20	0,1995	4080,00	47,99
20	0,1585	3663,00	48,31
20	0,1259	3251,00	48,3
20	0,1	2880,00	51,23
25	10	13760,00	42,14
25	7,943	12300,00	42,72
25	6,31	11100,00	43,34
25	5,012	9967,00	44,07
25	3,981	8964,00	44,62
25	3,162	8045,00	45,22
25	2,512	7204,00	45,82
25	1,995	6439,00	46,37
25	1,585	5758,00	46,91
25	1,259	5131,00	47,6
25	1	4572,00	48,08
25	0,7943	4075,00	48,7
25	0,631	3632,00	49,27
25	0,5012	3214,00	49,63
25	0,3981	2840,00	50,33
25	0,3162	2510,00	51,01
25	0,2512	2204,00	51,81
25	0,1995	1941,00	52,84
25	0,1585	1725,00	52,6
25	0,1259	1512,00	53,32
25	0,1	1342,00	54,5

30	10	7736,00	46,2
30	7,943	6837,00	46,97
30	6,31	6094,00	47,66
30	5,012	5411,00	48,28
30	3,981	4807,00	48,85
30	3,162	4264,00	49,51
30	2,512	3776,00	50,08
30	1,995	3340,00	50,66
30	1,585	2949,00	51,25
30	1,259	2591,00	51,86
30	1	2284,00	52,35
30	0,7943	2013,00	52,88
30	0,631	1765,00	53,6
30	0,5012	1541,00	54,24
30	0,3981	1348,00	55,35
30	0,3162	1185,00	55,7
30	0,2512	1032,00	56,03
30	0,1995	905,60	56,65
30	0,1585	779,50	57,31
30	0,1259	678,50	57,95
30	0,1	589,70	57,85
35	10	4126,00	50,65
35	7,943	3597,00	51,69
35	6,31	3168,00	52,35
35	5,012	2780,00	52,98
35	3,981	2442,00	53,54
35	3,162	2143,00	54,15
35	2,512	1875,00	54,69
35	1,995	1639,00	55,23
35	1,585	1431,00	55,8
35	1,259	1247,00	56,38
35	1	1086,00	56,99
35	0,7943	942,60	57,52
35	0,631	815,50	58,02
35	0,5012	706,70	58,79
35	0,3981	612,40	59,14
35	0,3162	528,90	59,82
35	0,2512	454,10	60,28
35	0,1995	392,60	61,02
35	0,1585	336,90	61,63
35	0,1259	289,40	62,21
35	0,1	248,00	62,83
40	10	2148,00	55,14
40	7,943	1859,00	55,99
40	6,31	1618,00	56,58

40	5,012	1404,00	57,21
40	3,981	1219,00	57,77
40	3,162	1056,00	58,33
40	2,512	913,20	58,88
40	1,995	788,50	59,44
40	1,585	679,70	60,01
40	1,259	585,90	60,53
40	1	503,20	61,14
40	0,7943	431,70	61,72
40	0,631	370,50	62,31
40	0,5012	316,50	62,85
40	0,3981	270,40	63,4
40	0,3162	230,90	64,07
40	0,2512	196,60	64,61
40	0,1995	167,20	65,24
40	0,1585	142,10	65,85
40	0,1259	120,60	66,47
40	0,1	102,20	67,38
45	10	912,30	57,04
45	7,943	791,90	57,82
45	6,31	687,80	58,48
45	5,012	590,90	59,1
45	3,981	510,30	59,68
45	3,162	438,40	60,33
45	2,512	377,30	60,87
45	1,995	323,10	61,46
45	1,585	276,80	62,02
45	1,259	236,10	62,55
45	1	202,70	63,27
45	0,7943	172,60	63,66
45	0,631	146,30	64,3
45	0,5012	126,00	64,88
45	0,3981	106,20	64,6
45	0,3162	89,31	66,65
45	0,2512	75,93	67,14
45	0,1995	63,14	67,31
45	0,1585	52,79	68,31
45	0,1259	44,19	70,11
45	0,1	39,06	70,92
50	10	460,70	61,51
50	7,943	396,20	61,83
50	6,31	340,60	62,45
50	5,012	290,70	63,02
50	3,981	247,80	63,56
50	3,162	211,20	64,15

50	2,512	179,60	64,69
50	1,995	152,60	65,24
50	1,585	129,60	65,81
50	1,259	109,60	66,37
50	1	92,86	67
50	0,7943	78,38	67,63
50	0,631	66,13	68,24
50	0,5012	56,09	68,69
50	0,3981	46,71	69,33
50	0,3162	39,17	70,04
50	0,2512	32,92	70,97
50	0,1995	27,19	71,3
50	0,1585	23,34	72,16
50	0,1259	19,36	71,82
50	0,1	15,67	74,2
55	10	236,60	64,81
55	7,943	201,50	65,43
55	6,31	171,70	65,98
55	5,012	145,10	66,55
55	3,981	122,70	67,07
55	3,162	103,60	67,67
55	2,512	87,37	68,25
55	1,995	73,46	68,78
55	1,585	61,70	69,37
55	1,259	51,66	70,06
55	1	43,17	70,56
55	0,7943	36,23	71,06
55	0,631	30,40	71,98
55	0,5012	25,10	72,76
55	0,3981	20,84	73,03
55	0,3162	17,15	73,62
55	0,2512	14,06	74,77
55	0,1995	12,00	75,64
55	0,1585	9,47	79,12
55	0,1259	8,05	80,28
55	0,1	6,78	80,36
60	10	123,50	68,4
60	7,943	104,10	68,72
60	6,31	87,77	69,24
60	5,012	73,57	69,84
60	3,981	61,64	70,39
60	3,162	51,58	71,01
60	2,512	43,03	71,56
60	1,995	35,83	72,2
60	1,585	29,83	72,84

60	1,259	24,74	73,54
60	1	20,50	74,1
60	0,7943	16,99	74,95
60	0,631	13,95	75,38
60	0,5012	11,46	76,74
60	0,3981	9,55	77,82
60	0,3162	7,81	77,56
60	0,2512	6,48	78,47
60	0,1995	5,20	79,01
60	0,1585	4,34	79,06
60	0,1259	3,50	79,71
60	0,1	2,83	81,68
65	10	65,80	71,03
65	7,943	55,05	71,74
65	6,31	45,97	72,33
65	5,012	38,26	72,94
65	3,981	31,80	73,53
65	3,162	26,38	74,17
65	2,512	21,79	74,79
65	1,995	18,01	75,42
65	1,585	14,88	76,07
65	1,259	12,24	76,73
65	1	10,06	77,43
65	0,7943	8,25	78,09
65	0,631	6,75	78,76
65	0,5012	5,53	79,38
65	0,3981	4,50	80,07
65	0,3162	3,66	80,72
65	0,2512	2,96	81,26
65	0,1995	2,42	82,03
65	0,1585	1,96	82,61
65	0,1259	1,58	83,14
65	0,1	1,27	83,8
70	10	36,33	74,34
70	7,943	30,10	74,68
70	6,31	24,92	75,3
70	5,012	20,56	75,91
70	3,981	16,93	76,54
70	3,162	13,93	77,18
70	2,512	11,42	77,8
70	1,995	9,35	78,45
70	1,585	7,65	79,09
70	1,259	6,25	79,74
70	1	5,09	80,41
70	0,7943	4,13	81,01

70	0,631	3,36	81,65
70	0,5012	2,72	82,2
70	0,3981	2,20	82,75
70	0,3162	1,78	83,41
70	0,2512	1,43	83,87
70	0,1995	1,15	84,45
70	0,1585	0,93	84,94
70	0,1259	0,75	85,43
70	0,1	0,60	86,03

Silniční asfalt 50/70 - 130 °C			
Teplota měření [°C]	Frekvence [Hz]	G* [kPa]	Fázový úhel [°]
10	10	53900,00	32,85
10	7,943	49670,00	33,53
10	6,31	46020,00	34,21
10	5,012	42290,00	34,97
10	3,981	38850,00	35,63
10	3,162	35650,00	36,29
10	2,512	32580,00	36,95
10	1,995	29760,00	37,6
10	1,585	27150,00	38,29
10	1,259	24670,00	39,04
10	1	22500,00	39,73
10	0,7943	20400,00	40,29
10	0,631	18460,00	41,19
10	0,5012	16700,00	41,65
10	0,3981	14990,00	41,72
10	0,3162	13350,00	43,47
10	0,2512	12300,00	44,37
10	0,1995	11060,00	44,74
10	0,1585	9792,00	46,04
10	0,1259	8769,00	48,55
10	0,1	7783,00	49,04
15	10	30340,00	38,13
15	7,943	27520,00	38,99
15	6,31	25110,00	39,75
15	5,012	22750,00	40,58
15	3,981	20610,00	41,3
15	3,162	18650,00	42,02
15	2,512	16820,00	42,75
15	1,995	15150,00	43,47
15	1,585	13640,00	44,17
15	1,259	12210,00	45,01
15	1	10960,00	45,75

15	0,7943	9785,00	46,53
15	0,631	8769,00	47,29
15	0,5012	7835,00	47,54
15	0,3981	6896,00	48,41
15	0,3162	6167,00	49,69
15	0,2512	5454,00	50,29
15	0,1995	4826,00	51,05
15	0,1585	4294,00	51,63
15	0,1259	3784,00	51,62
15	0,1	3297,00	55,19
20	10	14000,00	45,49
20	7,943	12410,00	46,65
20	6,31	11080,00	47,56
20	5,012	9856,00	48,42
20	3,981	8768,00	49,18
20	3,162	7780,00	50,01
20	2,512	6882,00	50,78
20	1,995	6078,00	51,51
20	1,585	5364,00	52,26
20	1,259	4710,00	53,08
20	1	4140,00	53,69
20	0,7943	3643,00	54,37
20	0,631	3197,00	55,39
20	0,5012	2782,00	55,95
20	0,3981	2421,00	56,66
20	0,3162	2111,00	57,49
20	0,2512	1827,00	58,21
20	0,1995	1594,00	59,11
20	0,1585	1358,00	60,23
20	0,1259	1182,00	61,23
20	0,1	1037,00	61,44
25	10	7348,00	51,25
25	7,943	6413,00	52,14
25	6,31	5642,00	52,99
25	5,012	4943,00	53,85
25	3,981	4329,00	54,61
25	3,162	3786,00	55,42
25	2,512	3300,00	56,14
25	1,995	2870,00	56,89
25	1,585	2495,00	57,62
25	1,259	2159,00	58,43
25	1	1870,00	59,12
25	0,7943	1616,00	59,89
25	0,631	1385,00	60,5
25	0,5012	1191,00	61,8

25	0,3981	1031,00	62,32
25	0,3162	885,00	62,72
25	0,2512	757,30	63,19
25	0,1995	639,90	64,13
25	0,1585	552,00	64,37
25	0,1259	469,10	65,03
25	0,1	399,50	66,4
30	10	3671,00	56,76
30	7,943	3168,00	57,41
30	6,31	2746,00	58,24
30	5,012	2371,00	59,05
30	3,981	2045,00	59,78
30	3,162	1762,00	60,54
30	2,512	1513,00	61,24
30	1,995	1297,00	61,94
30	1,585	1111,00	62,64
30	1,259	950,20	63,33
30	1	808,70	64,01
30	0,7943	688,10	64,73
30	0,631	585,30	65,38
30	0,5012	497,20	65,95
30	0,3981	421,10	66,69
30	0,3162	356,20	67,16
30	0,2512	301,20	67,9
30	0,1995	254,10	68,45
30	0,1585	213,90	69,07
30	0,1259	179,80	69,68
30	0,1	151,00	70,24
35	10	1768,00	61,64
35	7,943	1505,00	62,47
35	6,31	1285,00	63,23
35	5,012	1095,00	63,95
35	3,981	932,50	64,62
35	3,162	792,80	65,3
35	2,512	672,40	65,94
35	1,995	569,20	66,57
35	1,585	480,80	67,21
35	1,259	405,80	67,82
35	1	341,60	68,44
35	0,7943	287,20	69,07
35	0,631	241,10	69,63
35	0,5012	202,10	70,24
35	0,3981	169,10	70,88
35	0,3162	141,30	71,4
35	0,2512	118,00	71,99

35	0,1995	98,31	72,58
35	0,1585	81,81	73,17
35	0,1259	67,96	73,67
35	0,1	56,61	74,47
40	10	843,60	66,17
40	7,943	712,20	66,73
40	6,31	601,10	67,4
40	5,012	506,40	68,04
40	3,981	426,00	68,67
40	3,162	357,80	69,3
40	2,512	300,00	69,9
40	1,995	251,10	70,48
40	1,585	209,80	71,07
40	1,259	175,10	71,64
40	1	145,90	72,22
40	0,7943	121,40	72,78
40	0,631	100,80	73,37
40	0,5012	83,67	73,94
40	0,3981	69,33	74,52
40	0,3162	57,35	75,09
40	0,2512	47,37	75,68
40	0,1995	39,06	76,28
40	0,1585	32,16	76,81
40	0,1259	26,44	77,45
40	0,1	21,69	78,05
45	10	321,70	69,71
45	7,943	270,10	70,13
45	6,31	226,00	70,75
45	5,012	189,40	71,36
45	3,981	158,20	71,91
45	3,162	131,70	72,51
45	2,512	109,60	73,09
45	1,995	90,98	73,6
45	1,585	75,48	74,16
45	1,259	62,27	74,75
45	1	51,54	75,16
45	0,7943	42,71	75,68
45	0,631	35,25	76,57
45	0,5012	28,83	77,06
45	0,3981	23,74	77,1
45	0,3162	19,40	77,59
45	0,2512	15,71	78,37
45	0,1995	12,94	79,73
45	0,1585	10,09	82,65
45	0,1259	8,56	83,32

45	0,1	7,35	83,68
50	10	151,40	72,82
50	7,943	126,20	73,5
50	6,31	104,80	74,05
50	5,012	86,86	74,6
50	3,981	71,88	75,13
50	3,162	59,43	75,69
50	2,512	49,00	76,19
50	1,995	40,33	76,73
50	1,585	33,19	77,28
50	1,259	27,20	77,83
50	1	22,32	78,36
50	0,7943	18,26	79,07
50	0,631	14,90	79,33
50	0,5012	12,09	80,34
50	0,3981	9,93	81,45
50	0,3162	8,07	80,71
50	0,2512	6,67	82,06
50	0,1995	5,35	82,16
50	0,1585	4,37	82,45
50	0,1259	3,53	82,73
50	0,1	2,82	84,05
55	10	72,20	75,64
55	7,943	59,65	76,44
55	6,31	49,16	76,95
55	5,012	40,41	77,47
55	3,981	33,19	77,98
55	3,162	27,20	78,52
55	2,512	22,24	79,03
55	1,995	18,19	79,54
55	1,585	14,84	80,06
55	1,259	12,09	80,57
55	1	9,83	81,11
55	0,7943	7,98	81,66
55	0,631	6,48	82,14
55	0,5012	5,26	82,58
55	0,3981	4,25	83,11
55	0,3162	3,44	83,54
55	0,2512	2,77	84,08
55	0,1995	2,24	84,54
55	0,1585	1,80	84,92
55	0,1259	1,45	85,29
55	0,1	1,16	85,99
60	10	36,77	78,16
60	7,943	30,20	78,87

60	6,31	24,72	79,36
60	5,012	20,19	79,86
60	3,981	16,45	80,36
60	3,162	13,40	80,87
60	2,512	10,89	81,36
60	1,995	8,84	81,85
60	1,585	7,16	82,34
60	1,259	5,80	82,8
60	1	4,69	83,26
60	0,7943	3,78	83,73
60	0,631	3,05	84,17
60	0,5012	2,46	84,63
60	0,3981	1,98	85,03
60	0,3162	1,59	85,45
60	0,2512	1,27	85,83
60	0,1995	1,02	86,21
60	0,1585	0,82	86,57
60	0,1259	0,65	86,9
60	0,1	0,52	87,47
65	10	19,38	80,74
65	7,943	15,79	80,98
65	6,31	12,84	81,45
65	5,012	10,43	81,94
65	3,981	8,45	82,4
65	3,162	6,84	82,87
65	2,512	5,53	83,32
65	1,995	4,46	83,76
65	1,585	3,60	84,19
65	1,259	2,90	84,6
65	1	2,33	85,01
65	0,7943	1,87	85,42
65	0,631	1,50	85,79
65	0,5012	1,21	86,18
65	0,3981	0,97	86,55
65	0,3162	0,77	86,89
65	0,2512	0,62	87,21
65	0,1995	0,49	87,52
65	0,1585	0,39	87,84
65	0,1259	0,31	88,15
65	0,1	0,25	88,31
70	10	10,84	81,97
70	7,943	8,77	82,77
70	6,31	7,09	83,2
70	5,012	5,72	83,65
70	3,981	4,61	84,08

70	3,162	3,72	84,5
70	2,512	2,99	84,91
70	1,995	2,40	85,3
70	1,585	1,93	85,68
70	1,259	1,54	86,05
70	1	1,24	86,41
70	0,7943	0,99	86,75
70	0,631	0,79	87,09
70	0,5012	0,63	87,41
70	0,3981	0,50	87,71
70	0,3162	0,40	87,99
70	0,2512	0,32	88,26
70	0,1995	0,25	88,47
70	0,1585	0,20	88,65
70	0,1259	0,16	88,86
70	0,1	0,13	89,01

PŘÍLOHA H

- Grafy z vyhodnocení komplexních modulů a fázových úhlů

