



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV POZEMNÍCH KOMUNIKACÍ

INSTITUTE OF ROAD STRUCTURES

OVLIVNĚNÍ VLASTNOSTÍ ASFALTOVÉ SMĚSI TEPLOTOU POUŽITÉHO KAMENIVA

INFLUENCE OF THE TEMPERATURE OF THE AGGREGATE USED ON THE ASPHALT MIXTURE
PROPERTIES

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Tomáš Bocák

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Ondřej Dašek, Ph.D.

BRNO 2026

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav pozemních komunikací
Student: **Bc. Tomáš Bocák**
Vedoucí práce: **doc. Ing. Ondřej Dašek, Ph.D.**
Akademický rok: 2025/26
Studijní program: N0732A260026 Stavební inženýrství – konstrukce a dopravní stavby

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

Ovlivnění vlastností asfaltové směsi teplotou použitého kameniva

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Diplomová práce bude obsahovat rešeršní část, shrnující informace o požadavcích na výrobní teplotu asfaltových směsí, přičemž bude čerpáno z odborných publikací a předpisů, týkajících se této problematiky. V praktické části budou uvedeny informace o použitých materiálech a metodách a výsledky vhodně vybraných laboratorních zkoušek, které budou okomentovány.

Cíle a výstupy diplomové práce:

Norma ČSN 73 6121 uvádí, že teplota kameniva při výrobě asfaltové směsi nesmí překročit 250 °C. Obecně se předpokládá, že tato teplota může mít vliv na vlastnosti (zestárnutí) použitého asfaltového pojiva a tím i na vlastnosti vyrobené asfaltové směsi. V rámci diplomové práce budou vyrobeny asfaltové směsi při různých teplotách kameniva. Vlastnosti těchto asfaltových směsí budou hodnoceny vhodnými laboratorními metodami.

Seznam doporučené literatury a podklady:

Předané vzorky asfaltových směsí

Normy pro zkoušení asfaltových pojiv

Normy pro zkoušení asfaltových směsí

Normy: ČSN 65 7204, ČSN 73 6121, ČSN 73 6141, ČSN 73 6160

Literatura z internetu

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku.

V Brně, dne 27. 3. 2025

L. S.

doc. Ing. Dušan Stehlík, Ph.D.
vedoucí ústavu

doc. Ing. Ondřej Dašek, Ph.D.
vedoucí práce

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

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá vlivem teploty kameniva při výrobě asfaltové směsi ACO 11+ na její mechanické vlastnosti. Teoretická část je zaměřena na proces zpracování kameniva a R-materiálu v obalově asfaltových směsí a problematice stárnutí asfaltového pojiva. V praktické části jsou ze vzorků asfaltových směsí vyrobená zkušební tělesa dle příslušných norem, která jsou následně podrobena vybraným laboratorním zkušebními metodám. Na zkušebních tělesech byla provedena zkouška nízkoteplotních vlastností TSRST a dvoubodová zkouška ohybem na vetknutém komolém klínu metodou 2PB-TR. Výsledné vyhodnocené hodnoty zkoušek mohou posloužit výrobcům asfaltových směsí jako podklad, na jakou teplotu je bezpečné předeřhřívát kamenivo při výrobě asfaltových směsí s nepředeřhřátým R-materiálem.

KLÍČOVÁ SLOVA

Asfaltový beton, R-materiál, nízkoteplotní vlastnosti, tuhost, TSRST, 2PB-TR

ABSTRACT

This diploma thesis investigates the influence of aggregate temperature during the production of asphalt mixture ACO 11+ on its mechanical properties. The theoretical part focuses on the processing of aggregates and reclaimed asphalt pavement (RAP) in asphalt mixing plants, as well as on the ageing of asphalt binder. In the experimental part, test specimens were prepared from asphalt mixture samples in accordance with relevant standards and subsequently subjected to selected laboratory testing methods. The specimens were tested using the Thermal Stress Restrained Specimen Test (TSRST) to assess low-temperature properties and the two-point bending test on a notched trapezoidal beam (2PB-TR). The evaluated test results may serve asphalt mixture producers as a basis for determining safe aggregate preheating temperatures when producing asphalt mixtures containing non-preheated RAP.

KEYWORDS

Asphalt concrete, Reclaimed asphalt pavement, low-temperature performance, TSRST, 2PB-TR

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

BOCÁK, Tomáš. *Ovlivnění vlastností asfaltové směsi teplotou použitého kameniva*. Brno, 2026. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav pozemních komunikací. Vedoucí doc. Ing. Ondřej Dašek, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ O SHODĚ LISTINNÉ A ELEKTRONICKÉ FORMY ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci s názvem *Ovlivnění vlastností asfaltové směsi teplotou použitého kameniva* je shodná s odevzdanou listinnou formou.

V Brně dne 10. 1. 2026

Bc. Tomáš Bocák

autor

PROHLÁŠENÍ O PŮVODNOSTI ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci s názvem *Ovlivnění vlastností asfaltové směsi teplotou použitého kameniva* zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 10. 1. 2026

Bc. Tomáš Bocák

autor

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu diplomové práce panu doc. Ing. Ondřeji Daškovi, Ph.D. za odborné vedení, věcné připomínky a setrvalou ochotu. Že mi byl vedoucím, kterého mi ostatní záviděli. Dále bych rád poděkoval panu Ing. Stanislavu Klimentovi a společnosti COLAS CZ, a.s. za dodané vzorky asfaltové směsi, díky nimž bylo možné tuhle diplomovou práci realizovat. V neposlední řadě děkuji panu Pavlovi Strakovi a ostatním zaměstnancům v silniční laboratoři, za jejich ochotu a pomoc při provádění laboratorních zkoušek. A nakonec své rodině, která mě ve studiu po celou dobu podporovala.

Obsah

1. Úvod.....	11
2. Rešerše literatury.....	12
2.1. Výroba asfaltové směsi	12
2.2. Obalovna asfaltových směsí.....	12
2.3. Teplota kameniva na obalovně	13
2.3.1. Studené dávkování	13
2.3.2. Technologie sušení a přehřevu kameniva	14
2.3.3. Možnosti přidávání R-materiálu.....	15
2.4. Asfaltové pojivo	19
2.4.1. Degradace asfaltového pojiva v asfaltové směsi.....	19
2.4.2. Tepelně oxidační stárnutí.....	20
3. Cíle diplomové práce	23
4. Použité materiály.....	25
5. Výroba zkušebních těles.....	28
6. Použité zkušební metody.....	29
6.1. Zkouška nízkoteplotních vlastností s rovnoměrným poklesem teploty	29
6.1.1. Podstata zkoušky	29
6.1.2. Přístroje a pomůcky.....	30
6.1.3. Příprava zkušebních těles	31

6.1.4. Postup zkoušky.....	32
6.2. Dvoubodová zkouška ohybem na vetknutém komolém klínu	33
6.3. Podstata zkoušky.....	33
6.3.1. Přístroje a pomůcky.....	33
6.3.2. Příprava zkušebních těles	34
6.3.3. Postup zkoušky.....	36
7. Vyhodnocení výsledků zkoušek	37
7.1. Nízkoteplotní vlastnosti.....	37
7.2. Tuhost asfaltových směsí	41
7.2.1. Modul tuhosti a fázový úhel při teplotě -5 °C	42
7.2.2. Modul tuhosti a fázový úhel při teplotě 10 °C	44
7.2.3. Modul tuhosti a fázový úhel při teplotě 15 °C	47
7.2.4. Modul tuhosti a fázový úhel při teplotě 20 °C	49
7.2.5. Modul tuhosti a fázový úhel při teplotě 25 °C	52
7.2.6. Modul tuhosti a fázový úhel při teplotě 40 °C	54
7.3. Teplotní citlivost a frekvenční citlivost	59
7.4. Korelace naměřených hodnot.....	61
8. Závěr.....	64
9. Použitá literatura	66
10. Seznam tabulek	69

11. Seznam obrázků.....	71
12. Seznam grafů.....	73

1. Úvod

Výsledné fyzikálně-mechanické vlastnosti asfaltu, a tudíž i asfaltové směsi, jsou významně ovlivněny teplotou, při které byl materiál zpracováván. Pro potřeby výstavby kapacitně výkonnostní silniční sítě je nutné při výrobě asfaltových směsí dodržet technologicky správný postup při výrobě. Když pomineme možnost nedodržení správného skladování asfaltové směsi, chybný poměr jednotlivých složek směsi a další chyby při procesu výroby, je to právě teplota jednotlivých složek, která má nejvýraznější dopad na kvalitu výsledné asfaltové směsi [1].

Správná teplota směsi při výrobě je klíčová pro dobrou zpracovatelnost směsi při pokládce, ale také pro dlouhodobé fyzikálně-mechanické vlastnosti vozovky. Při nízké teplotě asfaltové směsi nedochází k rovnoměrnému obalení zrna pojivem a následné ztrátě soudržnosti. Naopak při nadměrně vysokých teplotách může lehce dojít k „přepálení“ pojiva, které má za následek zvýšení tvrdosti asfaltu a urychlené oxidace. To s velkou pravděpodobností, bude mít za následek tvorbu trhlin z důvodu snížení elasticity materiálu [2].

Zejména v případě asfaltových směsí, které obsahují vyšší množství R-materiálu, je nutné věnovat pozornost teplotě těchto směsí. Při dávkování R-materiálu studenou cestou je totiž nutné zahřát nově přidávané kamenivo na vyšší teplotu, aby byla kompenzována nízká teplota a často vysoká vlhkost R-materiálu a výsledná teplota asfaltové směsi zaručovala její vyhovující zpracovatelnost. Pokud se nově přidávané asfaltové pojivo dostane do přímého kontaktu s příliš zahřátým kamenivem, hrozí nebezpečí nadměrného stárnutí tohoto pojiva.

Jak je tedy zřejmé, sledování teploty je velmi důležité při výrobě asfaltové směsi. Ať už se jedná o teplotu při navažování, vysoušení a předeřevu kameniva, teplotu dávkovaného asfaltového pojiva nebo teplotu při míchání, pokaždé je potřeba věnovat pozornosti právě požadované teplotě, aby výsledná směs měla deklarované vlastnosti.

2. Rešerše literatury

2.1. Výroba asfaltové směsi

Výrobní proces asfaltových směsí je komplexní úkon, který musí dodržovat přísné nároky norem na výslednou kvalitu asfaltových povrchů pozemních komunikací, průmyslových ploch, parkovacích ploch, letišť, chodníků a jiných ploch. Konečnou jakost směsí určuje systém řízení výroby dle souboru norem ČSN EN 13108 a systém řízení kvality dle ČSN EN ISO 9001 [3][4]. V řadě norem ČSN EN 13108 jsou popsány základní požadavky na výrobu směsí na obalovnách, a to jak z hlediska složení směsi, tak výsledných vlastností. Určuje přesné dodržení zrnitosti kameniva, tvarový index, jeho čistotu a deklarované mechanické vlastnosti, jako může být odolnost proti drcení, mrazuvzdornosti a nasákavosti a v neposlední řadě objemové hmotnosti. Pro pojivo norma určuje jeho minimální množství ve směsi, vyjádřené v procentech celkové hmotnosti směsi. Zavedením systému řízení kvality závod deklaruje odběratelům kvalitu svého výrobku. Pro obalovnu tahle norma stanovuje kupříkladu evidenci vstupních materiálů, doložení zkoušek kameniva a asfaltu, průběžnou kontrolu výrobku při výrobě nebo také vedení záznamů o výrobě [5].

2.2. Obalovna asfaltových směsí

Obalovna je průmyslové zařízení na výrobu asfaltových směsí. Každá asfaltová směs podle svého určení má svou recepturu. Norma ČSN EN 13108 a její série určují na základě typu asfaltové směsi jednotlivé receptury a jejich klíčové parametry. A to frakci kameniva odpovídající obalové křivce, množství pojiva vyjádřeného v procentech hmotnosti, objemovou hmotnost směsi a viskozitu pojiva. Ve velínu má pověřená osoba přehled o celém procesu výroby a hlídá si množství nadávkovaných materiálů [6][7]. Kromě množství materiálů také hlídá vstupní a výstupní teploty materiálů a výsledné směsi. Požadavky na mezní výstupní teplotu asfaltové směsi předepisuje norma ČSN 73 6121. V tabulce 1 jsou uvedeny mezní teploty směsi podle druhu [8].

V případě směsí vyráběných s přidaným R-materiálem závisí teplota na množství, vlhkosti a teplotě R-materiálu, který je při výrobě přidáván. V míchacím zařízení obalovny nesmí teplota

kameniva překročit hodnotu 250 °C a výsledná teplota směsi musí být v mezích dle tabulky č. 1 mezních teplot asfaltových směsí.

Tabulka 5 – Mezní teploty asfaltových směsí

Typ a druh asfaltového pojiva	Norma	Mezní teploty (°C) podle druhu vyráběné směsi ^a				
		AC	BBTM	SMA	PA	AKO
100/150	ČSN 65 7204	130 až 170 ^b	–	–	130 až 170	120 až 150
50/70; 70/100		140 až 180	140 až 180	140 až 180	140 až 180	130 až 165
30/45		160 až 185	–	–	–	–
PMB 25/55-60, -65	ČSN 65 7222-1	155 až 180	155 až 180	155 až 180	–	–
PMB 45/80-65		155 až 180	155 až 180	155 až 180	–	–
CRMB 25/55-60 N CRMB 45/80-55 N	ČSN 65 7222-2	155 až 180	155 až 180	155 až 180	–	–

^a Manipulační teploty pojiv uvádějí zpravidla jejich výrobci. Pokud výrobce pojiva manipulační teploty pojiv neuvede, platí výše uvedené mezní teploty asfaltových směsí. Výrobce asfaltové směsi proto musí ověřit manipulační teploty při výrobě své konkrétní asfaltové směsi v rámci TT, přičemž musí respektovat hodnoty výrobce pojiva a tuto hodnotu udat do TT. V případě pojiv NT, aditivovaných a jiných musí výrobce pojiva poskytnout další potřebné údaje pro ověření a stanovení rozsahu manipulačních teplot.

^b Uvedené rozmezí se týká pouze asfaltových směsí ACO, ACL a ACP za použití tohoto asfaltu při jejich výrobě s R-materiálem podle pravidel uvedených v ČSN 73 6141.

Tabulka 1 Mezní teploty asfaltových směsí [8]

2.3. Teplota kameniva na obalovně

2.3.1. Studené dávkování

Kamenivo, a také R-materiál, před dávkováním do zařízení obalovny je potřeba skladovat v blízkosti násypky v zásobnících podle jednotlivých frakcí kameniva. Skládky s kamenivem, a případně s R-materiálem, jsou na rovném, odvodněném a zastřešeném povrchu. Tím je kamenivo chráněno před deštěm a na jeho další zpracování v sušícím bubnu je vynaloženo menší množství energie. Materiál má v prvotní fázi teplotu okolního prostředí, bez nadměrné vlhkosti. Na obrázku č. 1 je zásobník kameniva na obalovně [9][10].



Obrázek 2 Skládka kameniva podle frakcí na obalovně Zádveřice

Ze skládky je kamenivo nakladači naváženo do dávkovacích zásobníků. Dávkovací sestavu tvoří násypky, ze kterých kamenivo putuje po pásových dopravnících do sušícího bubnu. Pro ochranu materiálu před povětrnostními vlivy mohou být násypky opatřeny odklopným víkem. Na obrázku č. 2 jsou dávkovací zásobníky [10].



Obrázek 1 Dávkovací zásobníky studeného dávkování [10]

2.3.2. Technologie sušení a předehřevu kameniva

Zbavení kameniva vlhkosti a jeho ohřátí na požadovanou teplotu míchání je nesmírně důležitý technologický krok při výrobě asfaltové směsi. Účelem tohoto kroku je zaručit správné obalení zrna kameniva asfaltovým pojivem. Proces probíhá v sušícím bubnu, kde je pomocí hořáků kamenivo ohříváno a současně mechanicky mícháno v rotujícím ocelovém válci s lopatkami. Nejčastěji se využívají hořáky na zemní plyn, které zaručují čistší spalování a nízké emise. Dalším hojně rozšířeným typem paliva hořáku jsou topné oleje. Ty nabízejí stálý výkon, ale vyšší emise při spalování. Může být také využito kombinace těchto paliv nebo alternativně hořáky na uhelný prach či elektrického ohřevu [11][12].

V České republice se nejčastěji k sušení kameniva používá rotační sušící buben. Jedná se o zařízení, které zajišťuje odstranění vlhkosti pomocí proudu horkého vzduchu a předehřevu kameniva na požadovanou teplotu míchání s asfaltovým pojivem. Tento krok je důležitý pro zajištění rovnoměrného obalení kameniva pojivem. Velikost a hodinový výkon závisí na výkonu dané obalovny. Plášť tubusu sušícího bubnu je z plechu vysoké kvality, zaručující dlouhodobý provoz při vysokých teplotách. Prostor bubnu je opatřen přivařenými lopatkami, jejichž úkolem je kamenivo přemísťovat a rovnoměrně promíchávat. Z důvodu zamezení tepelných ztrát je plášť bubnu opatřen tepelnou izolací. Tu může tvořit kupříkladu vzduchová spára mezi vnitřním a vnějším válcem bubnu [13]. Na obrázku č. 3 je sušící buben.



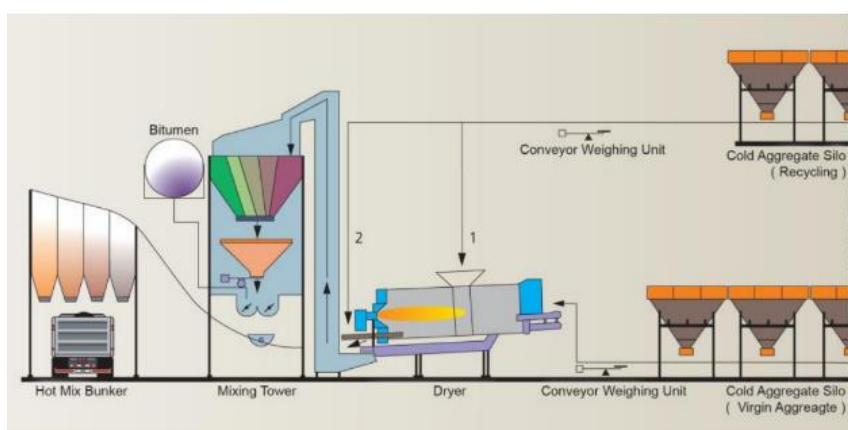
Obrázek 3 Sušící buben Jihočeské obalovny [13]

2.3.3. Možnosti přidávání R-materiálu

Znovuzískaný materiál z netuhých asfaltových vozovek je významným zdrojem druhotné suroviny při výrobě asfaltových směsí. R-materiál v sobě obsahuje kamenivo, jehož kvalita nebyla předešlým využitím zhoršena a pojivo, které lze dle potřeby pomocí přísad upravit. Takový materiál získaný vybouráním nebo vyfrézováním lze při dodržení jistých zásad a technologických postupů, opět použít do asfaltových směsí. Využití takového materiálu je předpokladem k udržitelnému hospodaření se nerostnými zdroji [24][25].

2.3.3.1. Studené dávkování R- materiálu

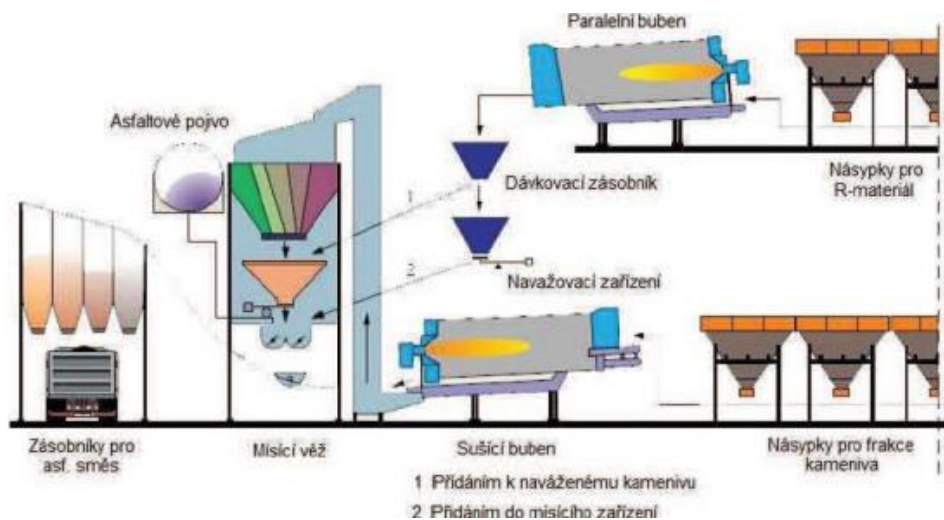
Technologicky nejjednodušší možností přidávání R-materiálu je technologie studeného dávkování. Podle druhu dodavatele obalovny a jeho dostupných technologií, je R-materiál přidáván dle své vlhkosti až v podílu 40 %, podle potřeby výsledných vlastností směsi. V tom případě je tedy nutné, aby nově přidávané kamenivo bylo nahráto na vyšší teplotu, aby mohlo svou tepelnou energii předat R-materiálu [26]. Na obrázku č. 4 je schéma obalovny se studeným dávkováním R-materiálu



Obrázek 4 Schéma obalovny se studeným dávkováním [27]

2.3.3.2. Přímý ohřev v paralelním sušícím bubnu

Při zpracování R-materiálu na obalovně se často využívá technologie paralelního sušícího bubnu. V tomto sušícím bubnu, odděleném od hlavního sušícího bubnu na kamenivo, dochází k předeřevu R-materiálu na požadovanou teplotu, nejčastěji 130 °C. Díky této technologii je možno vyrábět směsi s obsahem R-materiálu až 80 %. Schéma obalovny s paralelním bubnem je na obrázku č. 5 [14].



Obrázek 5 Schéma obalovny s paralelním bubnem [15]

2.3.3.3. Přímý ohřev metodou Drum-mix

Spojení předehřevu a míchání v jednom technologickém kroku je typické pro kontinuální obalovny. Jedná se o metodu, kdy se kamenivo suší, předehřívá a míchá zároveň s R-materiálem. To je velmi užitečné v případech, kdy se vyrábí velké objemy asfaltové směsi se stálou recepturou. Jak je patrné z obrázku č. 6, studené kamenivo je přidáváno v první polovině bubnu, kde se nachází hořák, kterým se materiál nahřívá. V druhé polovině se přidává R-materiál společně s pojivem. Značnou nevýhodou této metody je množství R-materiálu, které je možné při výrobě přidávat. Ačkoliv tepelná energie hořáku není přímým zdrojem tepla pro R-materiál (R-materiál je nahříván přenosem tepla z čistého kameniva), dochází k „přepálení“ již zestárlého pojiva obsaženého v R-materiálu. To je vystavením vysokým teplotám dále degradováno, což ovlivňuje kvalitu výsledné asfaltové směsi [15]. Na obrázku č. 6 je schéma metody drum-mix.

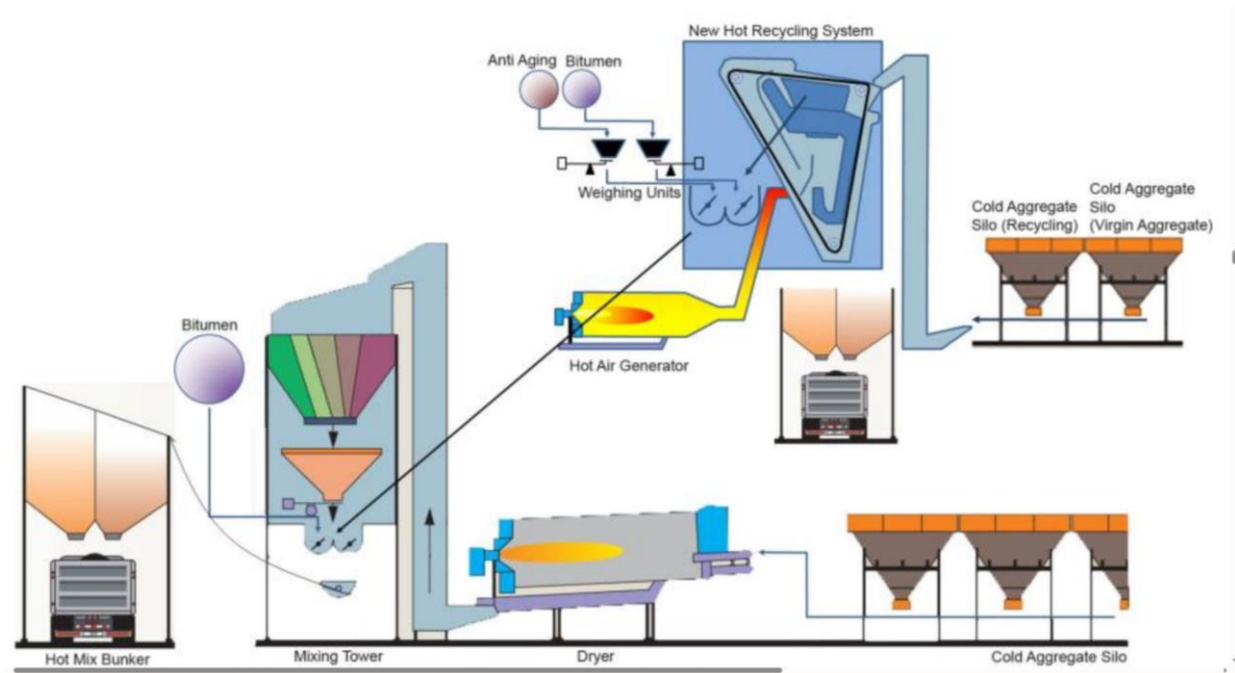


Obrázek 6 Schéma metody Drum-mix [16]

2.3.3.4. Nepřímý ohřev v paletovém trojúhelníkovém sušícím systému

Mnohem šetrnější metodou pro ohřev R-materiálu je moderní systém nepřímého ohřevu R-materiálu pomocí odděleného zařízení na obalovně. Jednou z možností nepřímého ohřevu je paletová komora trojúhelníkového sušícího systému („*Palletized Triangular Recycling Dryer*“). R-materiál je nahříván pomocí horkého vzduchu protékajícího stěnami zařízení z odděleného generátoru horkého vzduchu. Při vstupu horkého vzduchu do zařízení je teplota, průtok, rychlost a tlak hnaného vzduchu v zařízení regulována podle potřeby. Při vstupu horkého vzduchu do zařízení dosahuje teplota vzduchu přibližně 400 – 450 °C a při výstupu dosahuje hodnoty kolem 90 °C [27].

Tepelně-výměnná plocha zařízení je až 3× větší než u konvenčního sušícího bubnu běžné asfaltové obalovny. Díky nižší teplotě použitého horkého vzduchu je asfaltové pojivo účinně chráněno před tepelnou degradací. Ohřátý R-materiál je následně přímo dopravován do míchacího zařízení obalovny [27]. Schéma obalovny s nepřímým ohřevem je na obrázku č. 7.



Obrázek 7 Schéma obalovny s nepřímým ohřevem [27]

2.4. Asfaltové pojivo

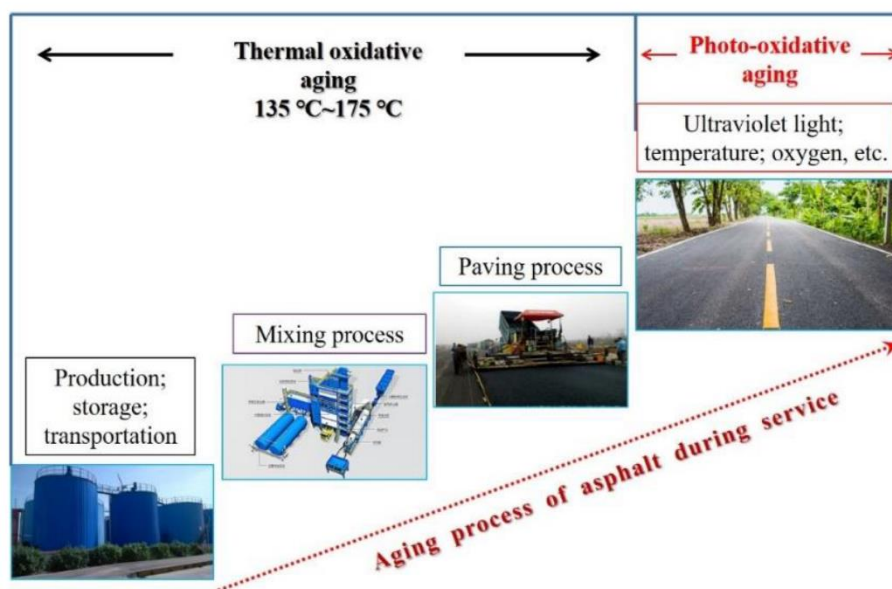
Asfaltovým pojivem rozumíme živičnou látku přírodního původu nebo vedlejší produkt při frakční destilaci ropy. Jedná se o směs přírodních vysoce molekulárních uhlovodíků a jejich derivátů, rozpustných v sirovodíku. Mohou nabývat skupenství pevného, kapalného, plynného nebo, při výrobě asfaltových směsí, nám nejužitečnějšího, viskózního. Asfalt jako takový je složen z malténové tekuté složky, do které patří pryskyřice, polární aromáty, naftalenové aromáty a nasycené uhlovodíky. Dále to jsou asfaltény, jakožto pevné částice [16][17].

2.4.1. Degradace asfaltového pojiva v asfaltové směsi

Životnost asfaltové vozovky je dána také stárnutím asfaltového pojiva ve směsi. Pokud pomineme poruchy způsobené nadměrným dopravním zatížením, působením vody a mrazu, špatně provedenými konstrukčními vrstvami nebo třeba nesprávným hutněním směsi, je životnost asfaltové vozovky také ovlivněna vlivem vysokých teplot [18]. Tento způsob degradace nazýváme stárnutí neboli oxidace. Asfaltové pojivo mění své vlastnosti vlivem degradačních činitelů, kterými jsou při výrobě vysoká teplota, přístup kyslíku či z dlouhodobého hlediska UV záření během životnosti konstrukce. Výsledkem je transformace původního pružno-plastického

asfaltu na materiál tužší a křehčí, což zvyšuje tendence asfaltového krytu k poškození důsledkem únavy materiálu nebo tvorbě různých druhů trhlin.

Proces stárnutí lze převést do tří fází. Při skladování a přepravě, míchání v míchacím centru na obalovně a během pokládky a provozu. Podle dlouhodobých výzkumů je prokázáno, že stárnutí má svou fyzikální a chemickou podstatu. Dochází zejména k odpařování lehkých frakcí, změně polarit jednotlivých složek, oxidačním reakcím při zvýšené teplotě za přítomnosti vzdušného kyslíku nebo vystavení UV záření. Podle dominantních příčin lze rozlišovat tepelně oxidační a foto oxidační stárnutí asfaltových směsí [19]. Na obrázku č. 8 je znázorněn proces stárnutí asfaltových směsí.



Obrázek 8 Proces stárnutí asfaltových směsí[19]

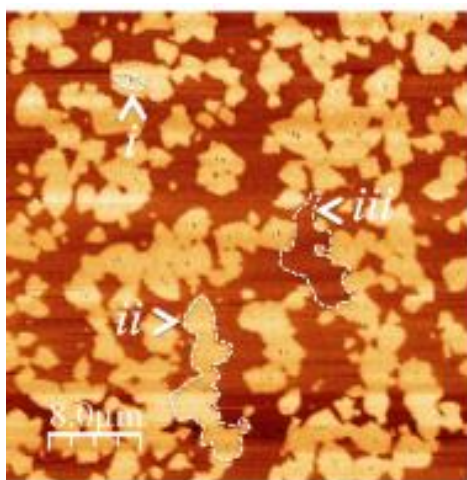
2.4.2. Tepelně oxidační stárnutí

Tepelně-oxidační stárnutí je jeden z klíčových procesů, který přispívá k degradaci asfaltových vrstev, obzvláště ke vzniku trhlin a zhoršení celkové mechanické odolnosti konstrukce. Tento jev vzniká, když je asfaltové pojivo vystaveno při vyšší teplotě vzdušnému kyslíku, což je typické pro výrobu, přepravu a pokládku asfaltových směsí.

Pod termínem „tepelně-oxidační stárnutí“ se ukrývá řada fyzikálně-chemických mechanismů. V asfaltovém pojivu dochází k oxidativnímu tvrdnutí pojiva prostřednictvím tvorby polárních kyslíkatých funkčních skupin, ztrátě nízkomolekulárních složek, a k exsudaci, tedy přechodu

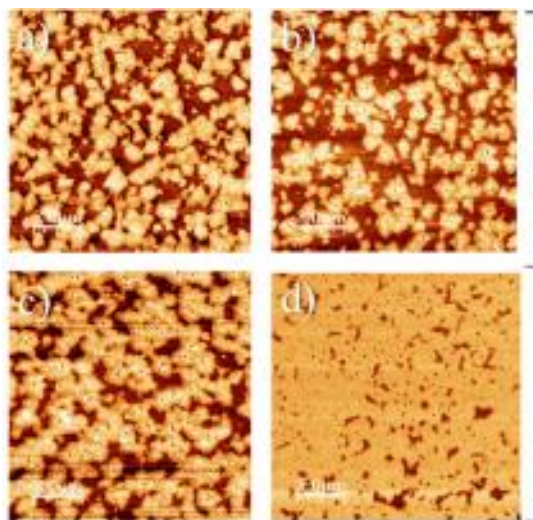
olejovitých složek v asfaltu do struktury povrchu kameniva. Tím dochází ke vzniku karbonylových a sulfoxidových funkčních skupin v asfaltových molekulách, čímž se zvyšuje polarita a podporuje vznik silnějších intermolekulárních vazeb. Důsledkem je zvýšená tuhost pojiva, snížení hodnoty penetrace a dalších funkčních zkoušek poživ. Asfalt se tímto stává křehkým a náchylnějším k poruchám ve výsledných asfaltových krytech vozovek. [20]

Na obrázku č. 9 je vidět základní mikrostruktura vzorku asfaltu před procesem termooxidativního stárnutí. Fáze (i) reprezentuje asfaltény, fáze (ii) jsou maltény, obklopující pevné, asfalténové složky a fáze (iii) je olejovitá část z nasycených uhlovodíků [20].



Obrázek 9 Mikroskopická struktura asfaltu před stárnutím [20]

Na obrázku č. 10 je struktura asfaltového pojiva po termooxidaci. Postup mikrostrukturální změny je zaznamenán ve čtyřech sledovaných časech stárnutí. Jak v pojivu docházelo ke stárnutí, zvyšoval se podíl asfalténových složek, malténových složek a ubývalo nasycených uhlovodíků [20].



Obrázek 10 Mikroskopická struktura asfaltu po stárnutí [20]

3. Cíle diplomové práce

Cílem diplomové práce je experimentální ověření, do jaké míry teplota použitého kameniva při výrobě asfaltových směsí ovlivňuje výsledné vlastnosti daných směsí. Inspirací k řešení této problematiky je fakt, že norma ČSN 73 6121 určuje maximální teplotu kameniva při výrobě asfaltových směsí na 250 °C, avšak v praxi tato limitní teplota nebyla důkladně ověřena a není tedy jasné, jak teplota kameniva při výrobě může ovlivnit chování asfaltové vrstvy ve vozovce. Poznatky z výsledků diplomové práce mohou posloužit výrobcům asfaltových směsí, kteří na svých obalovnách nedisponují technologií přehřevu R-materiálu a jsou nuceni nadměrně přehřívat nově dávkované kamenivo za účelem zajištění potřebné tepelné energie pro R-materiál. Ačkoliv je obecně známo, že vyšší teplota kameniva na obalovně přispívá k termooxidacímu stárnutí asfaltového pojiva, nebyly dosud systematicky a experimentálně ověřeny konkrétní vzorky asfaltových směsí, a tudíž dosavadní poznatky k dané problematice jsou omezené.

V rámci diplomové práce bude vyhodnocen vliv teploty použitého kameniva na vybrané asfaltové směsi typu asfaltový beton pro obrusné vrstvy ACO 11+. Vzorky asfaltových směsí budou vyhotoveny na obalovně asfaltových směsí s použitím kameniva o teplotě:

- 200 °C
- 250 °C
- 270 °C

Teploty reprezentují běžné, limitní a přeslimitní výrobní podmínky používané na obalovnách. U vyrobených směsí budou následně sledovány různé mechanické vlastnosti pomocí zkoušky nízkoteplotních vlastností TSRST dle normy ČSN EN 12697-46 a dvoubodové ohybové zkoušky 2PB-TR dle normy ČSN EN 12697-26+A1. Předpokládá se, že vlastnosti jednotlivých vzorků asfaltových směsí budou v důsledku různé míry přehřátí kameniva a rozdílné míry stárnutí pojiva nabývat odlišných hodnot.

Cílem diplomové práce je také porovnání získaných výsledků mezi jednotlivými vyhotovenými vzorky. Ty by měly přispět k lepšímu porozumění současných normových limitů na teplotu

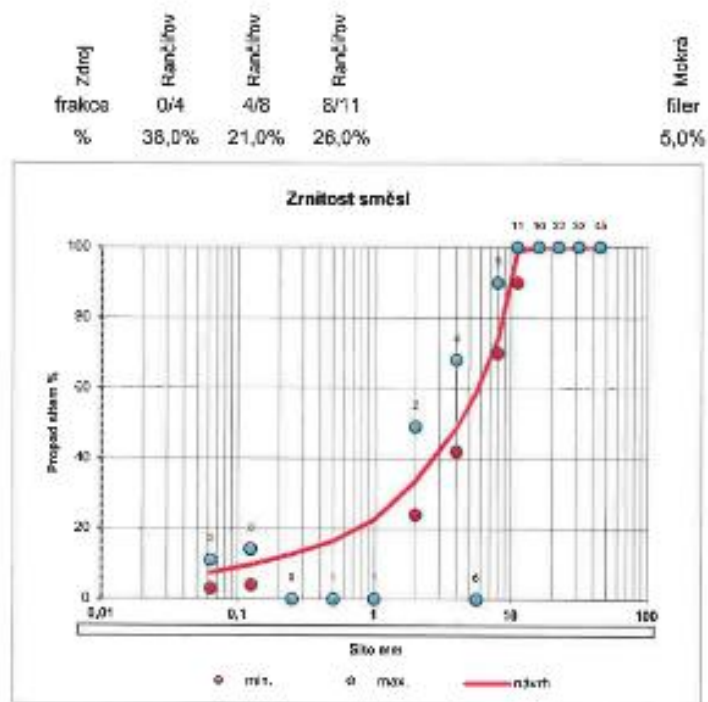
kameniva a výrobcům asfaltových směsí sloužit jako podklad, jaký důsledek překročení těchto limitů může mít.

4. Použité materiály

Pro vypracování diplomové práce byly použity zkušební desky asfaltových směsí dodané firmou COLAS CZ, a.s. Jedná se o asfaltový beton typu ACO 11+, určený pro obrusnou vrstvu. Pojivo je silniční asfalt penetrační třídy 50/70 s přísadou Addibit L300, sloužící ke zlepšení adheze pojiva a kameniva. Vyrobena asfaltová směs byla použita pro interní potřeby firmy COLAS na vyhotovení ploch v areálu společnosti. Procentuální propady frakcí nového kameniva 0/4 mm, 4/8 mm a 8/11 mm a vápencové moučky jsou uvedeny v tabulce č. 2. Na obrázku č. 11 je znázorněna výsledná čára zrnitosti navržené asfaltové směsi ACO 11+.

Přísada		addibit L300		0,20 % z hmotnosti asfaltu		
kamenivo		1	2	3	filler	R-mat
frakce		0/4	4/8	8/11		
ve směsi kameniva		38,00 %	21,00 %	26,00 %	5,00 %	10,00 %
zdroj		Rančířov	Rančířov	Rančířov	Mokrá	Rančířov
propad sítem	16	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
	11,2	100,0	100,0	96,5	100,0	97,9
	8	100,0	95,7	7,9	100,0	87,9
	5,6	100,0	37,9	1,8	100,0	77,0
	4	94,0	5,4	1,0	100,0	66,9
	2	61,0	1,9	0,9	100,0	48,2
	1	36,0	1,6	0,8	100,0	34,4
	0,5	22,0	1,5	0,8	100,0	26,3
	0,25	13,7	1,4	0,8	100,0	20,5
	0,125	8,8	1,3	0,7	90,2	15,1
	0,063	6,1	1,1	0,7	72,8	12,0

Tabulka 2 Prosevací zkouška kameniva



Obrázek 11 Čára zrnitosti kameniva

Na kamenivu byly provedeny zkoušky podle tabulky 3.

vlastnosti použitého kameniva					
frakce	0/4	4/8	8/11	filler	R-mat
zrnitost	G _a 85	G _c 90/15	G _c 85/15		
obsah jem. částic	f ₁₀	f ₂	f ₂		
kvalita jem. částic	MB _f 10			MB _f 10	
tvarový index		SI ₃₀	SI ₂₅		
odol. proti drčení		LA ₂₅	LA ₂₅		
ohladitelnost		PSV ₅₇	PSV ₅₇		
nasákavost		WA ₂₄ 1	WA ₂₄ 1		
trvanlivost					
mrazuvzdornost		F ₂	F ₂		
hustota kg/M ³	2713	2685	2677	2700	2645

Tabulka 3 Zkoušky kameniva

Směs byla vyrobena s podílem R-materiálu ve výši 10%. V tabulce č. 4 je síťový rozbor a provedené zkoušky na R-materiálu.

Vlastnosti R-materiálu	Norma	Jednotka	Stanoveno	
Obsah rozpustného asfaltu	ČSN EN 12697-1	% hmot	4,9	
Penetrace znovuzískaného asfaltu	ČSN EN 12697-3, ČSN EN 1426		20	
Bod měknutí znovuzískaného asfaltu	ČSN EN 12697-3, ČSN EN 1427	0,1 mm	66	
Objemová hmotnost R-materiálu	ČSN EN 12697-5	kg/m ³	2452	
Objemová hmotnost směsi kameniva z R-materiálu	ČSN EN 1097-6	kg/m ³	2645	
Zrnitost směsi kameniva R-materiálu	ČSN EN 12697-2	-	16	100,0
			11,2	97,9
			8	87,9
			5,6	77,0
			4	66,9
			2	48,2
			1	34,4
			0,5	26,3
			0,25	20,5
			0,125	15,1
0,063	12,0			

Tabulka 4 Síťový rozbor a vlastnosti R-materiálu

Asfaltové směsi byly vyrobeny na obalovně asfaltových směsí Rančirov podle požadavků diplomové práce s teplotou kameniva 200 °C, 250 °C a 270 °C. Teplota asfaltové směsi byla měřena teploměrem zabudovaným na obalovně. Následně se také měřila teplota směsi na korbě nákladního vozu a lišila se oproti teplotě na obalovně o ± 2 °C. V tabulce č. 5 jsou uvedeny teploty kameniva a teploty výsledné asfaltové směsi.

Teplota kameniva	Teplota směsi
200°C	164°C
250°C	200°C
270°C	212°C

Tabulka 5 Teplota kameniva a směsi na obalovně

5. Výroba zkušebních těles

Pro zjištění nízkoteplotních vlastností a tuhosti asfaltových směsí byly z dodaných desek vyřezány požadované tvary zkušebních těles podle příslušných norem. K určení nízkoteplotních vlastností směsí bylo nařezáno pět zkušebních těles o rozměrech (50 × 50 × 250) mm a označeno jako vzorky .1,.2,.3,.4,.5 v souladu s normou ČSN EN 12697-46. Podle normy ČSN EN 12697-26+A1 byly dále nařezána tělesa tvaru komolých klínů, neboli trapezoidů, o rozměrech větší základny 70 mm, menší základny 25 mm, výšce 250mm a tloušťce 50mm. Trapezoidy byly opět označeny jako vzorky .1, .2, .3, .4, .5. Tělesa tvaru hranolů byla následně zbroušena na neseřízlých stranách, umyta a vysušena v laboratorní sušárně [21][22]. Na obrázku č. 12 je zachyceno řezání zkušebních těles.



Obrázek 12 Řezání zkušebních těles

6. Použité zkušební metody

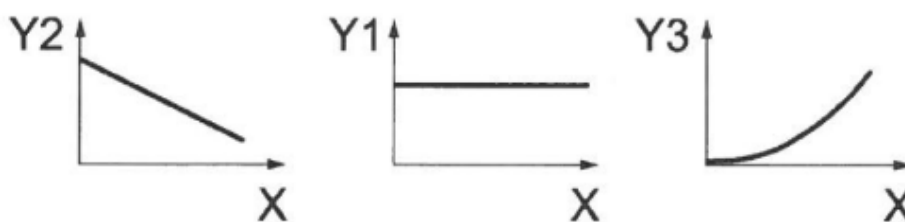
V následující kapitole budou uvedeny zkušební metody použité pro zpracování a vyhodnocení výsledku praktické části diplomové práce.

6.1. Zkouška nízkoteplotních vlastností s rovnoměrným poklesem teploty

Norma ČSN EN 12697-46 nabízí mnoho možných zkoušek nízkoteplotních vlastností asfaltových směsí. Pro potřeby mé diplomové práce jsem vybral zkoušku nízkoteplotních vlastností s rovnoměrným řízeným poklesem teploty TSRST (Thermal Stress Restrained Specimen Test) [21][23].

6.1.1. Podstata zkoušky

Během zkoušky nízkoteplotních vlastností s rovnoměrným řízeným poklesem teploty je vzorek asfaltové směsi vystaven konstantně klesajícímu teplotnímu zatížení. Testovanému vzorku je zamezeno tepelnému přetvoření, a tím je vyvoláváno kryogenní napětí. Výsledkem vzrůstajícího napětí dochází k porušení vzorku při kritickém napětí $\sigma_{\text{cry, failure}}$ a kritické teplotě T_{failure} [21]. Na obrázku č. 13 je znázorněn průběh teploty (Y2), deformace (Y1) a napětí (Y3) v čase během zkoušky.



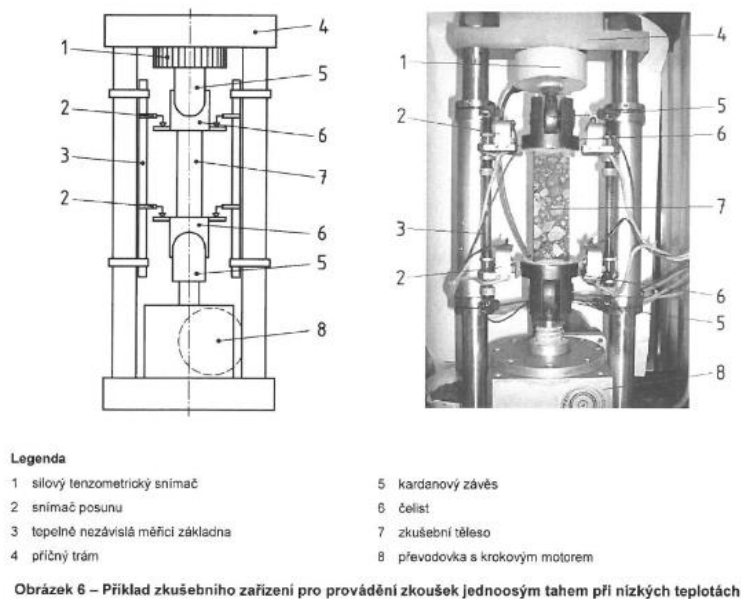
Obrázek 13 Podstata zkoušky TSRST [21]

6.1.2. Přístroje a pomůcky

K vyhotovení zkoušky nízkoteplotních vlastností metodou TSRST bylo využito následujících pomůcek:

- Termostatická komora
- Silový tenzometrický snímač
- Snímač posunu
- Tuhý rám komory
- Ocelové podložky
- Lepidlo na bázi epoxidu

Na obrázku č. 14 je znázorněno zatěžovací zařízení s uchyceným testovaným tělesem tvaru hranolu. V tělese nesmí vznikat žádné radiální ani příčné síly, popřípadě momenty. Toho je dosaženo uchycením pomocí kardanových závěsů [21].



Obrázek 14 Zatěžovací zařízení pro provádění zkoušky jednoosým tahem při nízkých teplotách [21]

6.1.3. Příprava zkušebních těles

Zkušební tělesa pro provádění zkoušky jednoosým tahem metodou TSRST byla vyřezána z jednotlivých asfaltových desek dodaných firmou COLAS dle požadavků normy ČSN EN 12697-46. Zkušební hranoly se získávají řezáním desek vyrobených v laboratoři podle ČSN EN 12697-33. Pro dodržení přesných rozměrů desek ($50 \times 50 \times 250$) mm byly hranoly po nařezání zbroušeny na neseřízých stranách a očištěny. Po nařezání a zbroušení byla tělesa umístěná do laboratorní sušárny a při standardní laboratorní teplotě $22 \text{ }^\circ\text{C}$ vysušena. Jednotlivá tělesa byla následně nalepena do ocelových čelistí v centrovací rámu. Vycentrováním tělesa omezíme vzniku jiných, než normálových napětí v průběhu zkoušky. Pro lepení těles bylo použito lepidlo na bázi dvousložkové epoxidové pryskyřice s kamennou moučkou. Na obrázku č. 15 je vzorek tělesa umístěn v centrovacím rámu [21].



Obrázek 15 Lepení vzorku v centrovacím rámu

6.1.4. Postup zkoušky

Pomocí ocelových čelistí je zkušební těleso umístěno do rámu zatěžovacího zařízení. K čelistem tělesa je upevněn tenzometrický snímač a snímač posunu. V první fázi zkoušky je potřeba těleso zastabilizovat na počáteční teplotu $T_0 = 10\text{ °C}$. Během fáze temperování tělesa nesmí být těleso vystaveno žádnému zatížení. Teplota tělesa byla sledována pomocí slepého tělesa v komoře.

Po stabilizaci tělesa na požadovanou počáteční teplotu je spuštěn proces postupného poklesu teploty v komoře rychlostí 10 °C/h . Během zkoušky je tělesu zamezeno přetvoření, čímž si těleso udržuje konstantní délku a v materiálu vzniká kryogenní napětí. Pokles teploty trvá do doby, než dojde k porušení tělesa [21].

Na obrázku č. 16 a 17 jsou zachycena tělesa v komoře a po skončení zkoušky.



Obrázek 16



Obrázek 17

Těleso po zkoušce TSRST

6.2. Dvoubodová zkouška ohybem na vetknutém komolém klínu

Pro určení modulu tuhosti vyrobených asfaltových směsí bude využita dvoubodová zkouška ohybem na vetknutém komolém klínu metodou 2PB-TR podle normy ČSN EN 12697-26+A1. Společně se zjištěnou tuhostí směsí bude také sledován fázový úhel.

6.3. Podstata zkoušky

Těleso tvaru komolého klínu je během zkoušky jednostranně vetknuto pomocí ocelové podložky k pevnému rámu zkušebního zařízení. Zkouška byla provedena při diskrétních hodnotách teploty -5, 10, 15, 20, 25 a 40 °C. Na volný konec působí periodicky se opakující se sinusová síla

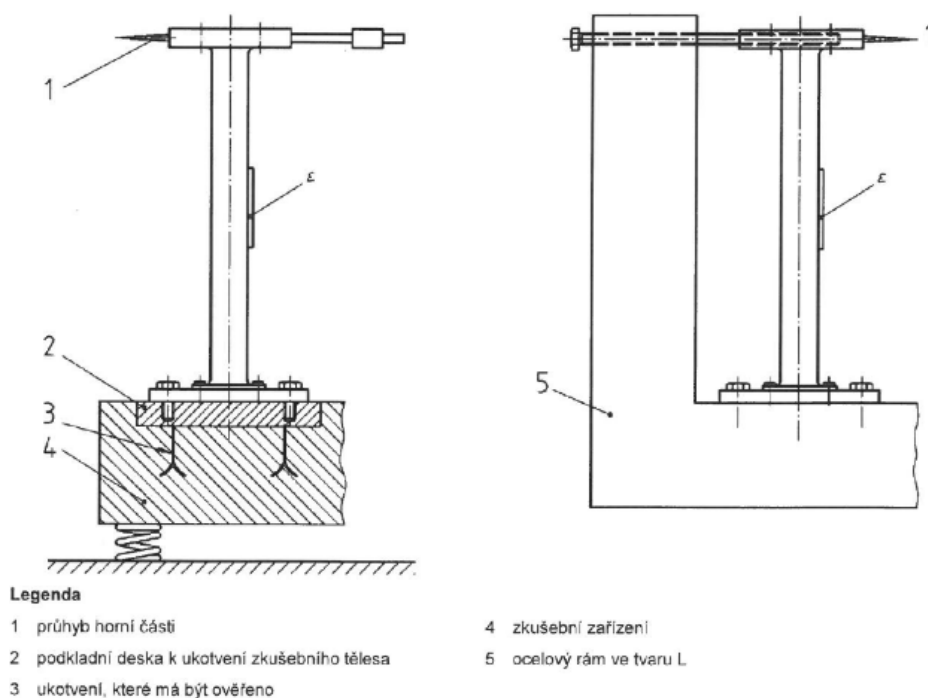
$F = F_0 * \sin(\omega * t)$, při frekvencích 1, 5, 10, 15, 20 a 25 Hz. Síla F_0 má být taková, aby způsobovala přetvoření v rozmezí $\varepsilon \leq 50 * 10^{-6}$ v nejvíce namáhané části tělesa. O tomhle přetvoření se předpokládá, že je v rozsahu lineárního namáhání materiálu. Výsledný komplexní modul tuhosti při různých teplotách se zjistí pomocí naměřené síly a fázového úhlu.

6.3.1. Přístroje a pomůcky

K provedení zkoušky tuhosti metodou 2PB-TR bylo využito následujících pomůcek:

- Ocelová podložka
- Zkušební zařízení schopné vyvodit sinusové zatížení
- Odvětrávaná termostatická komora
- Referenční ocelové těleso
- Měřicí aparatura ke sledování dynamické síly, průhybu a fázového úhlu

Zkušební těleso z asfaltové směsi je nalepeno pomocí epoxidového lepidla s kamennou moučkou k ocelové podložce. Pomocí podložky je těleso upnuto k pevnému rámu zkušebního zařízení, které je schopno vyvolat sinusový dynamický průhyb na vrcholu zkušebního tělesa při požadovaných frekvencích od 1 Hz do 25 Hz. Schéma ukotvení těles ve zkušebním zařízení je na obrázku č. 18.



Obrázek 18 Schéma ukotvení

6.3.2. Příprava zkušebních těles

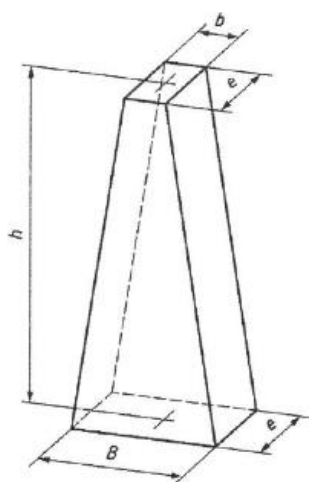
Z asfaltových desek dodaných firmou COLAS byla vyřezána zkušební tělesa tvaru komolého klínu. Asfaltové desky byly vyrobeny v laboratoři podle ČSN EN 12697-33. Zkušební tělesa se na spodní části následně přilepila pomocí epoxidového lepidla k ocelovým podložkám. Na horní části jsou taktéž nalepeny příchytky k zatěžovacímu zařízení tak, aby bylo zaručeno dobré geometrické uložení těles.

Rozměry těles byly voleny podle tabulky č. 6 z normy ČSN EN 12697-26+A1, a to délkou větší základny $B = 70$ mm, menší základny $B = 25$ mm, výškou $h = 250$ mm a tloušťce $e = 50$ mm. Na obrázku č. 19 je geometrie a upevnění zkušebních těles.

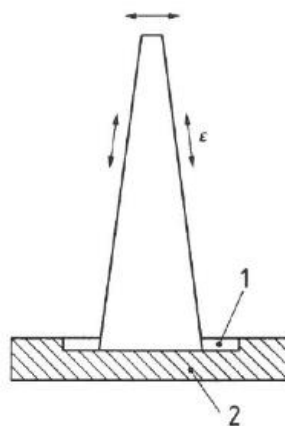
Rozměry zkušebních těles mm	Zkušební tělesa tvaru trámečku mm			Zkušební tělesa tvaru komolého klínu mm		
	$D \leq 16$ mm	$16 < D \leq 22$ mm	$D > 22$ mm	$D \leq 16$ mm	$16 < D \leq 22$ mm	$22 < D \leq 45$ mm
B				56 ± 1	70 ± 1	70 ± 1
b	40 ± 1	40 ± 1	80 ± 1	25 ± 1	25 ± 1	25 ± 1
e	40 ± 1	40 ± 1	80 ± 1	25 ± 1	25 ± 1	50 ± 1
h	120 ± 1	160 ± 1	320 ± 1	250 ± 1	250 ± 1	250 ± 1

POZNÁMKA D je (jmenovitá) velikost oka horního omezujícího síta kameniva ve směsi, v milimetrech (mm).

Tabulka 6 Minimální rozměry zkušebních těles



Obrázek A.2 – Geometrie zkušebních těles



Obrázek A.3 – Upevnění zkušebního tělesa

Legenda

- 1 drážka, 2 mm
- 2 kovová podkladní deska

Obrázek 19 Geometrie a upevnění zkušebních těles

6.3.3. Postup zkoušky

Zkušební tělesa byla vystavena harmonické (sinusové) síle s přesností $\pm 5\%$, působící na volný konec tělesa po dobu 30 sekund až maximálně 2 minuty, vyvolávající průhyb odpovídající poměrnému přetvoření ε menšímu než 50 mikrostrain. Těleso bylo zatěžováno při teplotách (-5, 10, 15, 20, 25 a 40) °C. Při každé teplotě bylo vyvoláváno zatížení při (1, 5, 10, 15, 20 a 25) Hz. Těleso bylo vždy temperováno v termostatické komoře na diskrétní hodnoty teploty s přesností $\pm 0,5$ °C. Výsledky měření budou reprezentovány jako průměrné naměřené hodnoty pro jednotlivé druhy asfaltových směsí. Na obrázku č. 20 jsou zkušební tělesa umístěna ve zkušebním zařízení



Obrázek 20 Zkušební tělesa zkoušky tuhosti ve zkušebním zařízení

7. Vyhodnocení výsledků zkoušek

V následujících kapitolách budou představeny výsledky zkoušek a porovnání mezi jednotlivými vzorky asfaltových směsí.

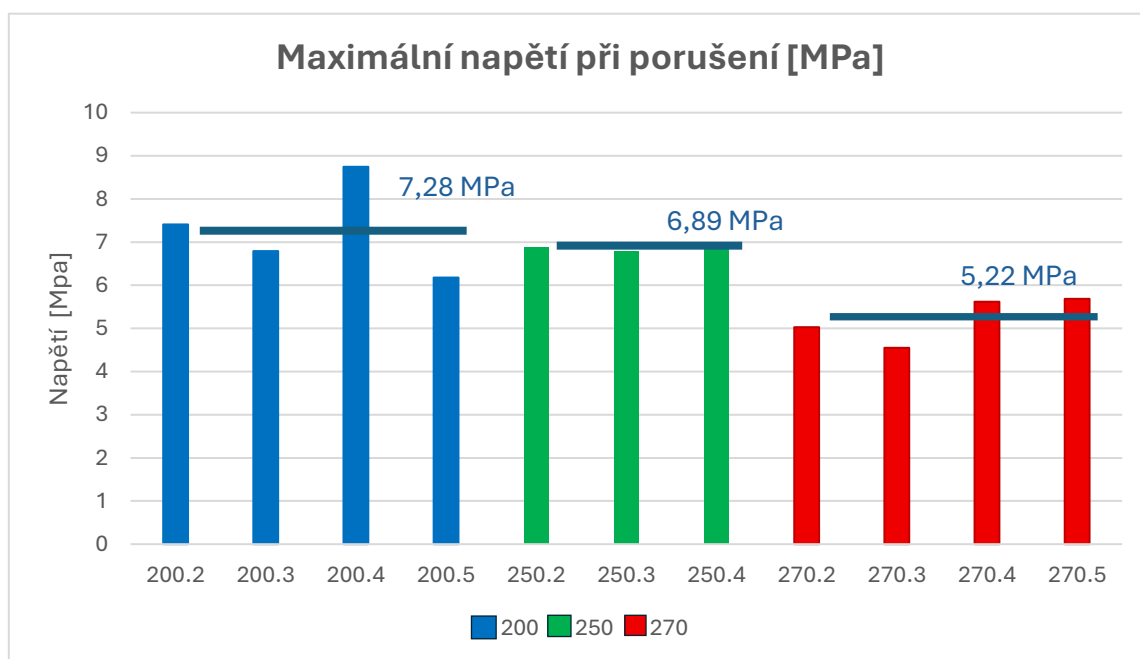
7.1. Nízkoteplotní vlastnosti

Na zkušebních tělesech tvaru hranolů byly provedeny zkoušky TSRST. Postup zkoušky byl dle požadavků normy ČSN EN 12697-46. Cílem bylo vyzkoušet minimálně 3 tělesa od každé vyrobené směsi. Pro co nejvyšší přesnost měření byla primárně volena tělesa s číslem .3 a sousední, jelikož se nacházela uprostřed dodané desky asfaltové směsi, jež se vizuálně jevila jako nejdokonaleji zhutněná. U některých zkušebních těles došlo k poruše čidel teploměrů, kdy se správně nezaznamenala teplota v tělese. Teplota komory byla vždy zaznamenána správně. V případě platných měření bylo zjištěno, že rozdíl teploty komory a teploty vzorku je v rozmezí 2,6 °C až 2,7 °C, tedy průměrně 2,66 °C. Tato průměrná teplota byla následně použita ke korekci teplot těles, u nichž došlo ke selhání čidla. Z důvodu chyb na čidlech teploměrů byla doměřena tělesa 200.5 a 270.5. V tabulce č. 7 jsou uvedeny teploty tělesa při porušení, včetně výsledných naměřených hodnot napětí při porušení [MPa], Teploty vzorku při porušení [°C] a Teploty komory při porušení.

Zkušební těleso	Napětí při porušení [MPa]	Teplota vzorku při porušení [°C]	Teplota komory při porušení [°C]
200.2	7,41	-20,3	-23,0
200.3	6,79	-21,8	-24,5
200.4	8,75	-22,6	-25,0
200.5	6,18	-18,8	-21,3
Ø 200	7,28	-20,9	-23,5
250.2	6,89	-20,1	-23,4
250.3	6,80	-20,9	-23,6
250.4	7,00	-19,6	-22,6
Ø 250	6,89	-20,2	-23,2
270.2	5,03	-14,2	-17,1
270.3	4,55	-11,6	-14,3
270.4	5,62	-15,2	-17,2
270.5	5,69	-15,7	-18,3
Ø 270	5,22	-14,2	-16,7

Tabulka 7 Výsledné naměřené hodnoty zkoušky TSRST

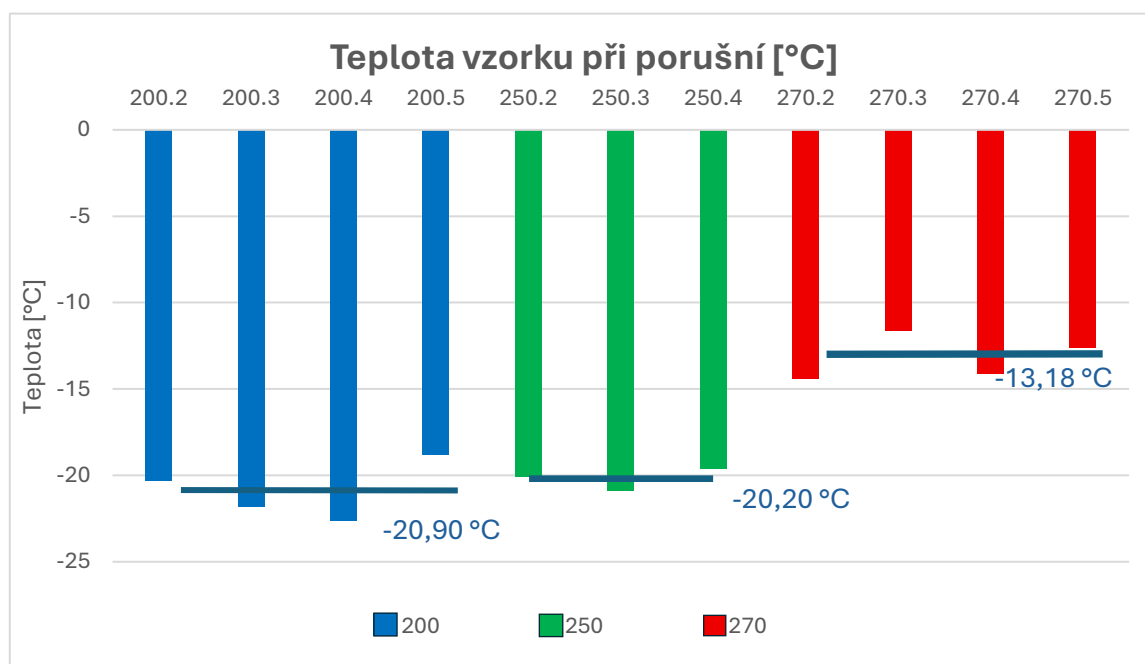
V grafu č. 1 jsou naměřené hodnoty maximálního napětí při porušení těles. Modrá křivka znázorňuje průměrnou hodnotu nad danými sloupci vzorku.



Graf 1 Maximální napětí při porušení

Z grafu č. 1 je zřejmý předpokládaný trend poklesu maximálního napětí, které tělesa asfaltové směsi vyrobené při vyšší teplotě odolávají. Nejvýraznější rozdíl naměřeného napětí je mezi tělesy vyrobenými při teplotě 270 °C a 250 °C. Zatímco rozdíl naměřené maximálního napětí mezi tělesy vyrobenými při 200 °C a 250 °C nejsou tak znatelné. U těles ze vzorků asfaltové směsi vyrobených při teplotě kameniva 200 °C byly naměřené hodnoty s průměrnou hodnotou 7,28 MPa, oproti tělesům s teplotou kameniva 250 °C a průměrnou naměřenou hodnotou 6,89 MPa. Rozdíl v průměrném naměřeném napětí je 0,39 MPa. Oproti tělesům ze vzorků asfaltových směsí vyrobených z kameniva o teplotě 250 °C a 270 °C, kde je rozdíl naměřeného maximálního napětí 1,67 MPa. Výsledky potvrzují, že s rostoucí teplotou kameniva na obalovně, dochází k výraznému stárnutí asfaltového pojiva, pojivo je tudíž křehčí a směs s tímto pojivem není schopná přenést tak vysoké tahové napětí.

V Grafu č. 2 jsou naměřené hodnoty teploty vzorku při porušení. U vzorků 200.2, 200.3, 250.3, 270.3 se jedná o korigované hodnoty. Modrou křivkou jsou znázorněny průměrné výsledky.

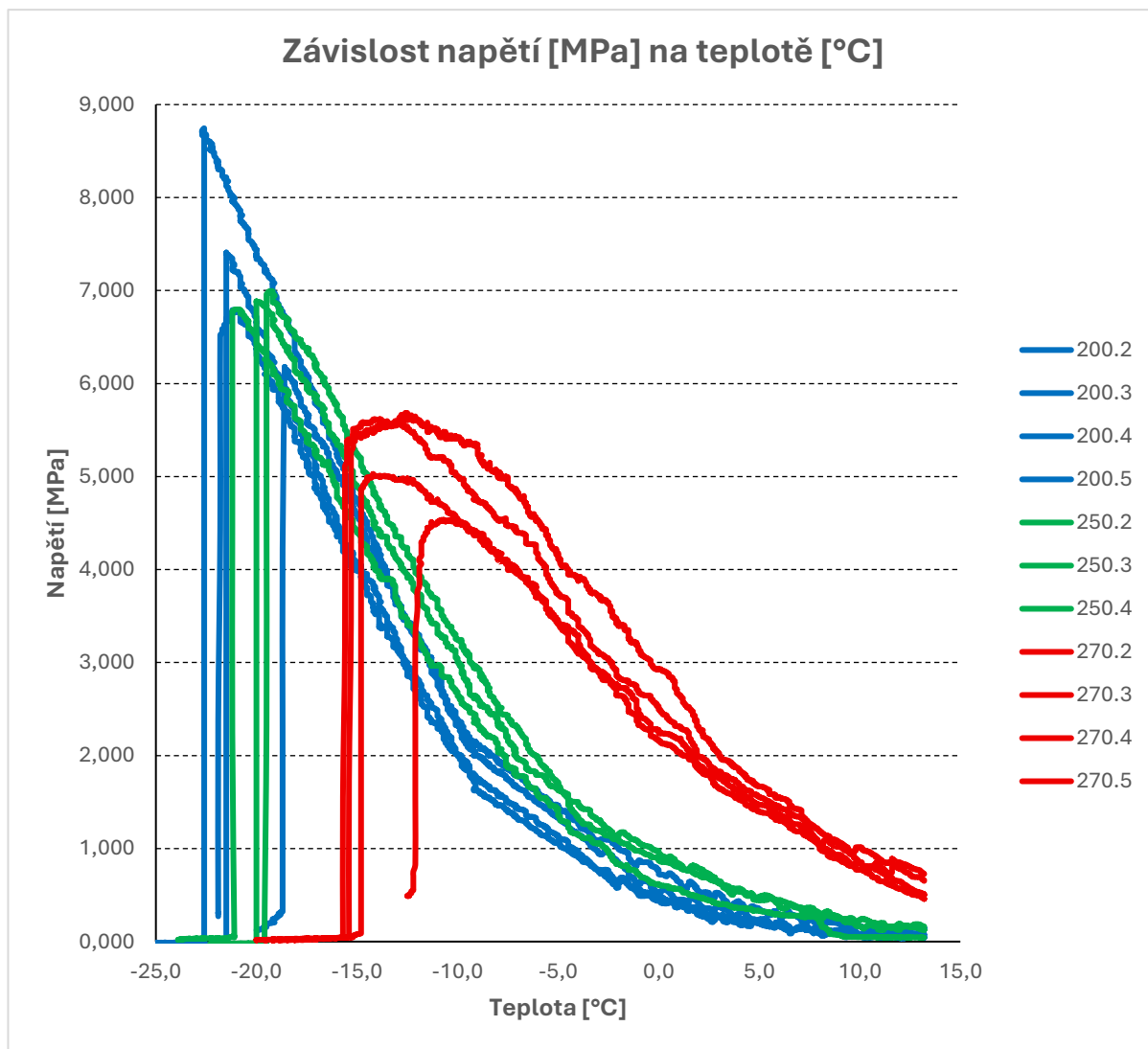


Graf 2 Teplota vzorku při porušení

Z grafu č. 2 je opět jasně vidět, jak s rostoucí teplotou kameniva při výrobě asfaltových směsí dochází ke zhoršení nízkoteplotních vlastností asfaltové směsi. Vzorky s kamenivem o výrobní teplotě 200 °C dosáhly průměrné kritické teploty vzorku -20,90 °C. U vzorků s kamenivem o teplotě 250 °C byla teplota vyšší (horší) o 0,7 °C. Vzorky asfaltové směsi s kamenivem o teplotě

270 °C dosáhly průměrné kritické teploty -13,18 °C. To činí rozdíl mezi směsí z kameniva 250 °C a 270 °C o 7,02 °C.

Na grafu č. 3 je znázorněna závislost narůstajícího kryogenního napětí na klesající teplotě.



Graf 3 Závislost napětí na teplotě

Na grafu č. 3 jsou pro přehlednost asfaltové směsi vyobrazeny barevně pro jednotlivé teplotní režimy při výrobě. Na grafu lze vidět, že asfaltové směsi vyrobené při teplotě 200 °C v porovnání s ostatními asfaltovými směsí, vychází nejlépe z hlediska nízkoteplotních vlastností. Vůči asfaltovým směsím s teplotou kameniva při výrobě 250 °C, vykazuje směs 200 °C buďto velmi podobné nebo lepší hodnoty maximálního napětí v tahu. Oproti tomu vzorky asfaltových směsí vyrobených při teplotě kameniva 270 °C vykazují nejhorší nízkoteplotní vlastnosti s průměrnou

hodnotou maximálního napětí pouze 5,22 MPa. U vzorků asfaltové směsi vyrobené při teplotě 270 °C je také vidět, že již od začátku zkoušky je potlačena relaxace tahového napětí a křivka závislosti napětí na teplotě narůstá okamžitě po začátku zkoušky. V případě ostatních dvou asfaltových směsí dochází nejprve k relaxaci napětí, přičemž toto napětí se začne znatelně zvyšovat až při teplotě cca 5 °C.

Z výsledných naměřených dat zkoušky TSRST lze usoudit, že limitní hodnota teploty kameniva 250 °C z normy ČSN 73 6121 je zvolena správně.

7.2. Tuhost asfaltových směsí

Na zkušebních tělesech tvaru komolých klínů, neboli trapezoidů, byly provedeny zkoušky ohybem 2PB-TR. Postup zkoušky byl proveden v souladu s normou ČSN EN 12697-26+A1. Cílem zkoušky bylo zjistit moduly tuhosti a odpovídající fázové úhly pro dodané asfaltové směsi při různých teplotách a frekvencích zatěžování. Pro každou asfaltovou směs byla tuhost zjišťována (v souladu s požadavkem normy ČSN EN 12697-26+A1) na čtyřech zkušebních tělesech. Pro vyhodnocení výsledků budou využity aritmetické průměry modulů tuhosti a fázových úhlů jednotlivých typů asfaltových směsí.

7.2.1. Modul tuhosti a fázový úhel při teplotě -5 °C

V tabulce č. 8 jsou naměřené výsledky aritmetických průměrů modulů tuhosti asfaltových směsí. V tabulce č. 9 jsou naměřeny aritmetické průměry fázových úhlů asfaltových směsí.

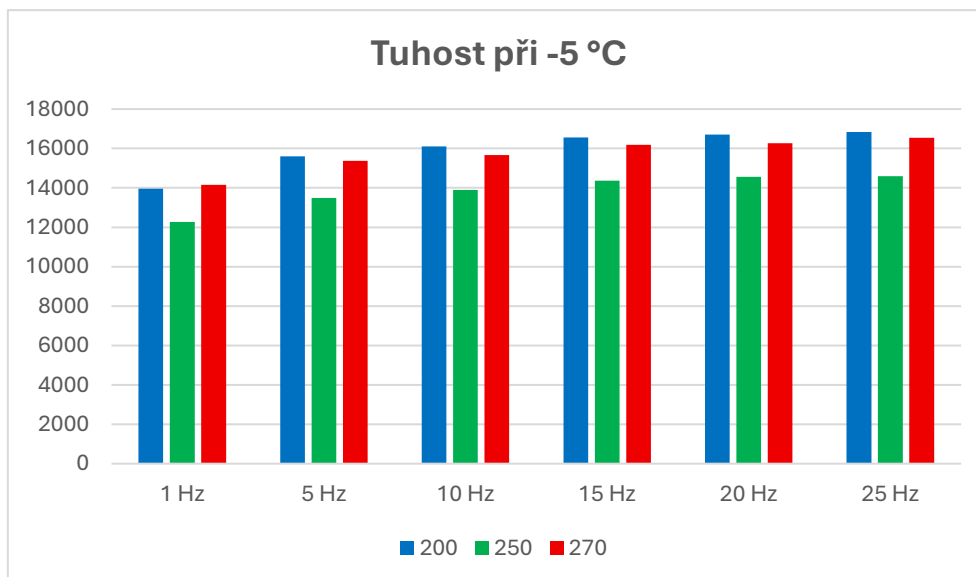
Tuhost při -5 °C						
tělesa	1 Hz	5 Hz	10 Hz	15 Hz	20 Hz	25 Hz
∅ 200	13957	15603	16096	16564	16704	16835
∅ 250	12270	13481	13899	14373	14559	14598
∅ 270	14150	15376	15666	16183	16274	16543

Tabulka 8 Modul tuhosti při teplotě -5 °C

Fázový úhel při -5 °C						
tělesa	1 Hz	5 Hz	10 Hz	15 Hz	20 Hz	25 Hz
∅ 200	6,9	5,5	4,8	4,5	4,2	4,0
∅ 250	6,7	5,6	5,1	4,9	4,5	3,8
∅ 270	5,3	4,7	4,3	4,7	4,5	4,6

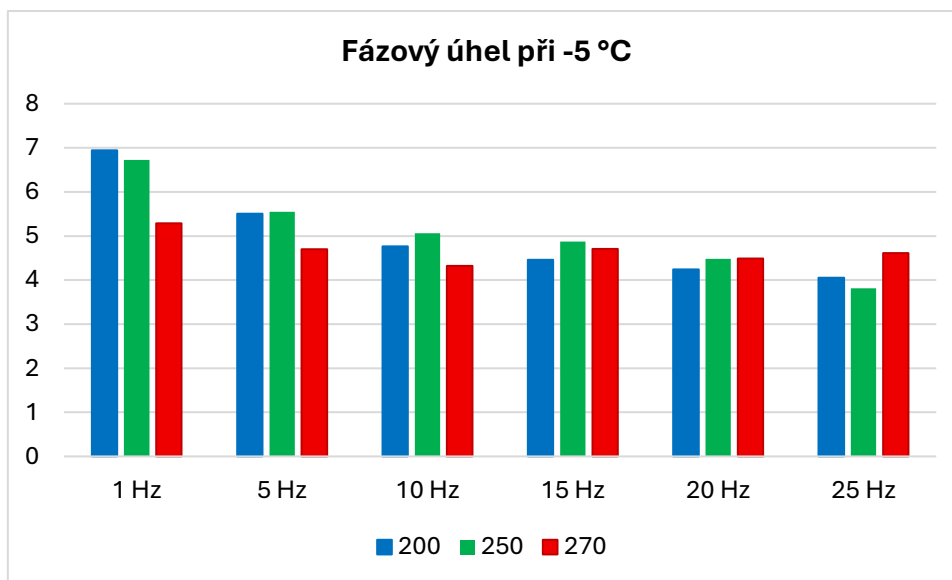
Tabulka 9 Fázový úhel při teplotě -5 °C

V grafu č. 4 jsou graficky porovnány výsledné naměřené tuhosti asfaltových směsí při různých frekvencích za stálé teploty -5 °C.



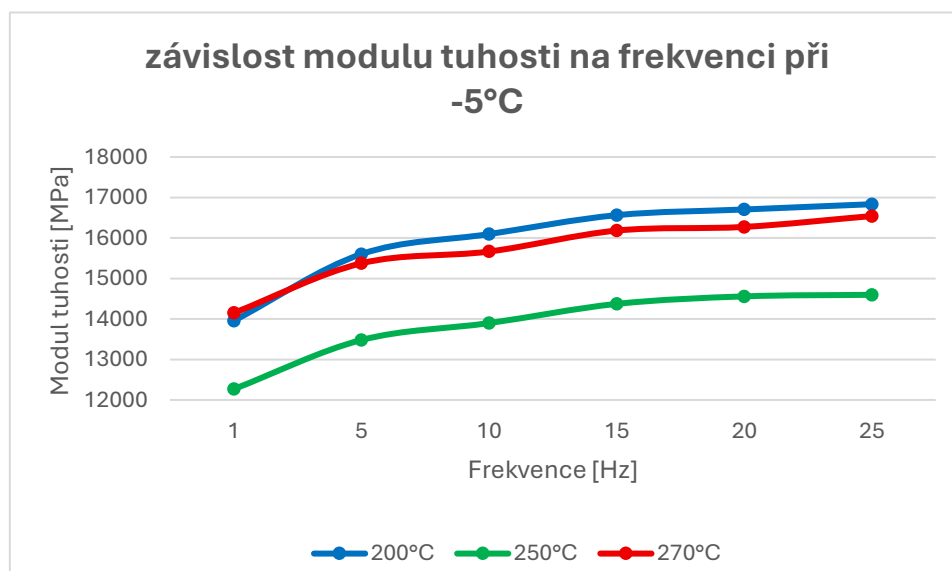
Graf 4 Výsledné naměřené tuhosti při teplotě -5 °C

V grafu č.5 jsou graficky porovnány výsledné naměřené fázové úhly při různých frekvencích za stálé teploty -5 °C.



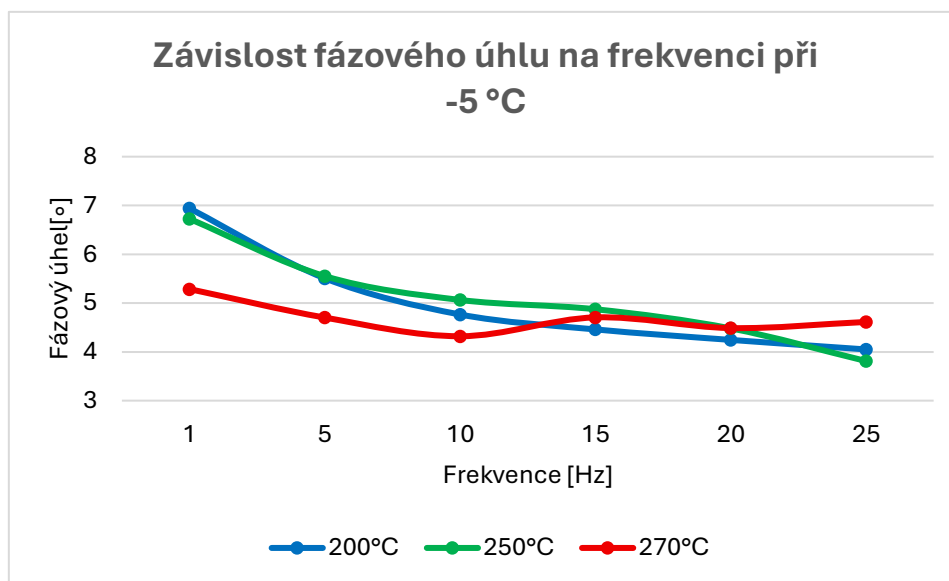
Graf 5 Výsledné naměřené fázové úhly při teplotě -5 °C

V grafu č. 6 je Závislost modulu tuhosti na frekvenci jednotlivých těles při teplotě -5 °C.



Graf 6 Závislost modulu tuhosti na frekvenci při teplotě -5 °C

V grafu 7. je Závislost fázového úhlu na frekvenci při teplotě -5 °C.



Graf 7 Závislost fázového úhlu na frekvenci při teplotě -5 °C

7.2.2. Modul tuhosti a fázový úhel při teplotě 10 °C

V tabulce č. 10 jsou naměřené výsledky aritmetických průměrů modulů tuhosti asfaltových směsí. V tabulce č. 11 jsou naměřeny aritmetické průměry fázových úhlů asfaltových směsí.

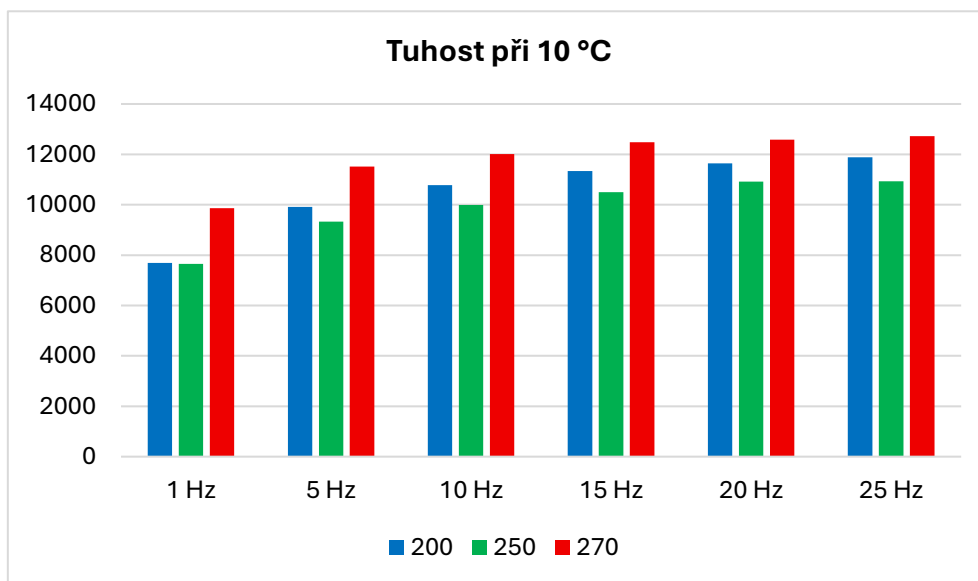
Tuhost při 10 °C						
tělesa	1 Hz	5 Hz	10 Hz	15 Hz	20 Hz	25 Hz
∅ 200	7688	9918	10773	11337	11637	11881
∅ 250	7657	9335	9991	10498	10920	10931
∅ 270	9866	11517	12009	12480	12589	12726

Tabulka 10 Modul tuhosti při teplotě 10 °C

Fázový úhel při 10 °C						
tělesa	1 Hz	5 Hz	10 Hz	15 Hz	20 Hz	25 Hz
∅ 200	17	13	11	11	10	10
∅ 250	14	11	10	9	9	8
∅ 270	9	8	7	8	7	7

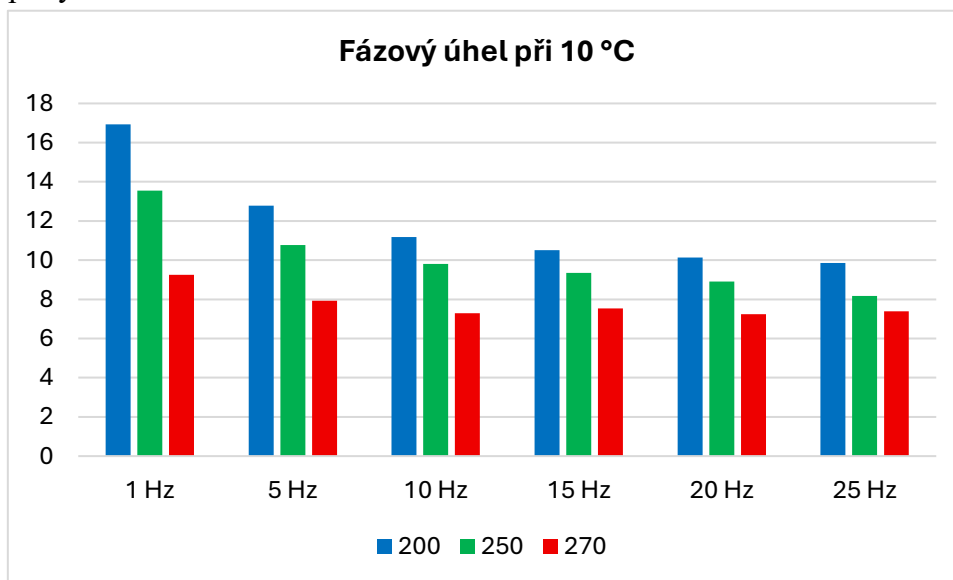
Tabulka 11 Fázový úhel při teplotě 10 °C

V grafu č. 8 jsou graficky porovnány výsledné naměřené tuhosti asfaltových směsí při různých frekvencích za stálé teploty 10 °C.



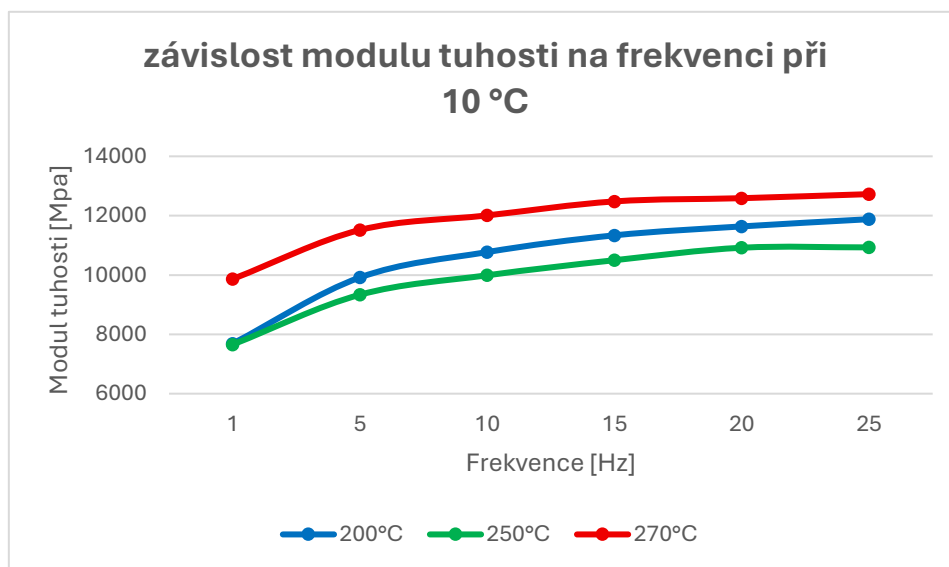
Graf 8 Výsledné naměřené tuhosti při teplotě 10 °C

V grafu č.9 jsou graficky porovnány výsledné naměřené fázové úhly při různých frekvencích za stálé teploty 10 °C



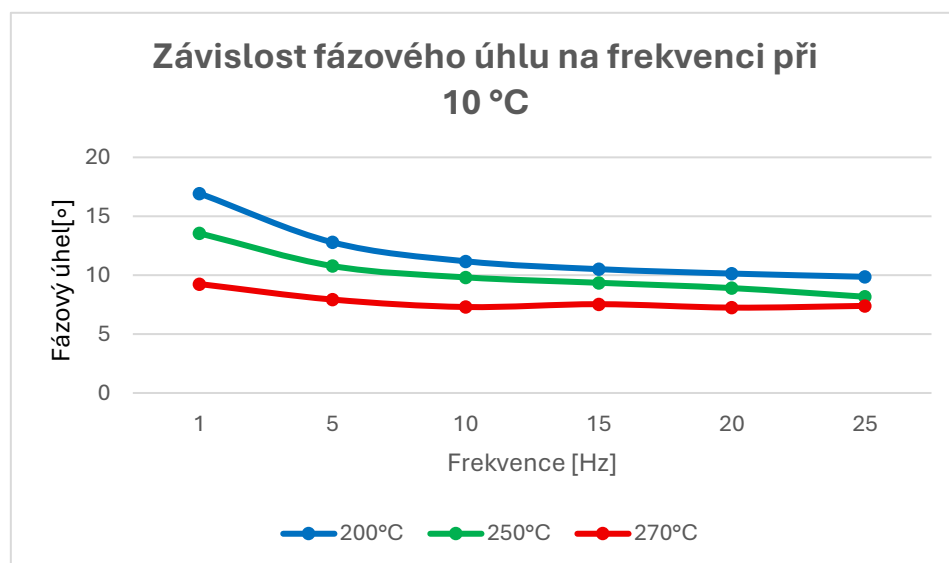
Graf 9 Výsledné naměřené fázové úhly při teplotě 10 °C

V grafu č. 10 je Závislost modulu tuhosti na frekvenci při teplotě 10 °C.



Graf 10 Závislost modulu tuhosti na teplotě při 10 °C

V grafu č. 11 je Závislost fázového úhlu na frekvenci při teplotě 10 °C.



Graf 11 Závislost fázového úhlu na frekvenci při teplotě 10 °C

7.2.3. Modul tuhosti a fázový úhel při teplotě 15 °C

V tabulce č. 12 jsou naměřené výsledky aritmetických průměrů modulů tuhosti asfaltových směsí. V tabulce č. 13 jsou naměřeny aritmetické průměry fázových úhlů asfaltových směsí.

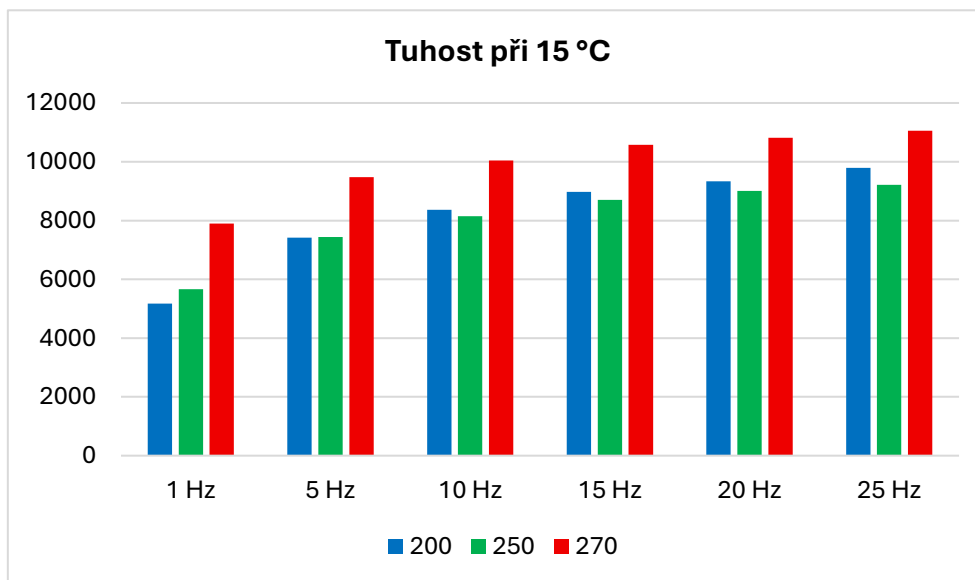
Tuhost při 15 °C						
tělesa	1 Hz	5 Hz	10 Hz	15 Hz	20 Hz	25 Hz
∅ 200	5171	7419	8367	8975	9331	9790
∅ 250	5661	7435	8149	8699	9009	9210
∅ 270	7902	9474	10038	10573	10812	11058

Tabulka 12 Modul tuhosti při teplotě 15 °C

Fázový úhel při 15 °C						
tělesa	1 Hz	5 Hz	10 Hz	15 Hz	20 Hz	25 Hz
∅ 200	24,6	18,4	16,0	15,0	14,4	14,0
∅ 250	18,8	14,5	13,1	12,4	11,7	11,0
∅ 270	11,8	9,9	9,1	9,3	8,9	8,9

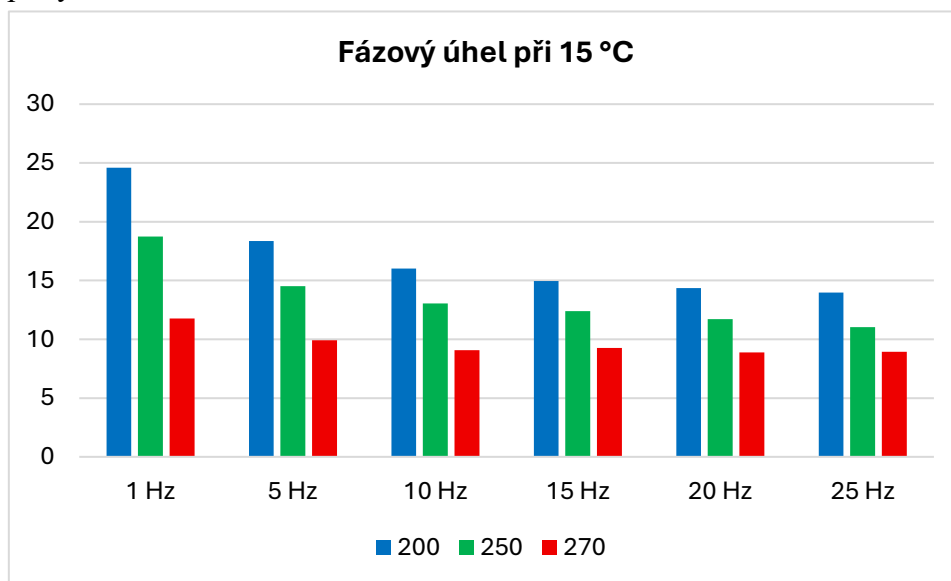
Tabulka 13 Fázový úhel při teplotě 15 °C

V grafu č. 12 jsou graficky porovnány výsledné naměřené tuhosti asfaltových směsí při různých frekvencích za stálé teploty 15 °C.



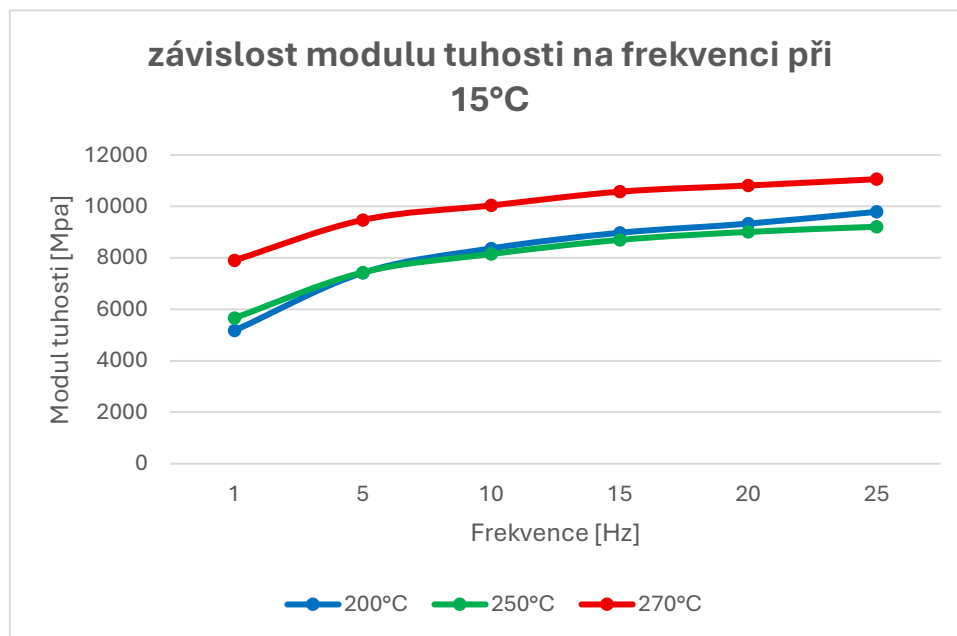
Graf 12 Modul tuhosti při teplotě 15 °C

V grafu č. 13 jsou graficky porovnány výsledné naměřené fázové úhly při různých frekvencích za stálé teploty 15 °C.



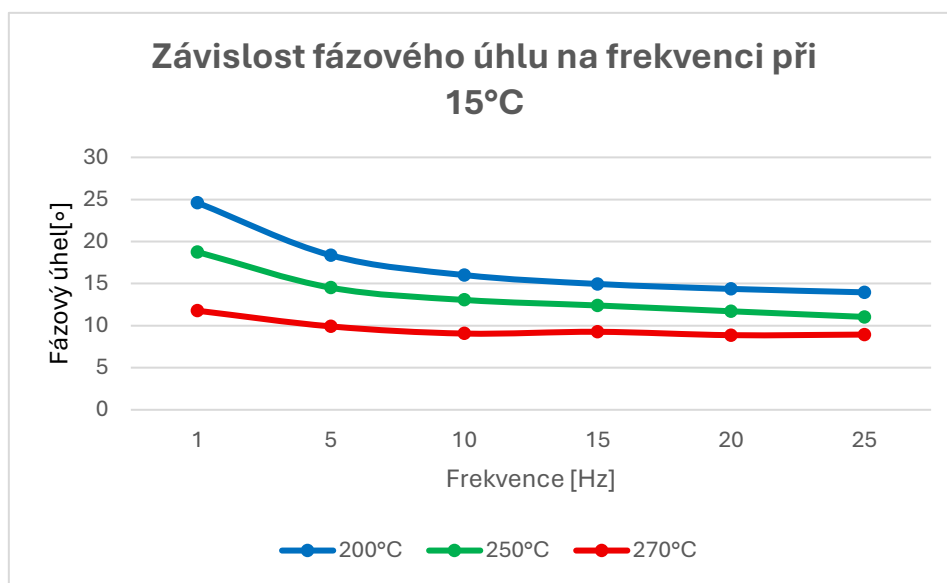
Graf 13 Výsledné Fázové úhly při teplotě 15 °C

V grafu č. 14 je Závislost modulu tuhosti na frekvenci jednotlivých těles při teplotě 15 °C.



Graf 14 Závislost modulu tuhosti při teplotě 15 °C

V grafu č. 15 je Závislost fázového úhlu na frekvenci při teplotě 15 °C.



Graf 15 Závislost fázového úhlu na teplotě při 15 °C

7.2.4. Modul tuhosti a fázový úhel při teplotě 20 °C

V tabulce č. 14 jsou naměřené výsledky aritmetických průměrů modulů tuhosti asfaltových směsí. V tabulce č. 15 jsou naměřeny aritmetické průměry fázových úhlů asfaltových směsí.

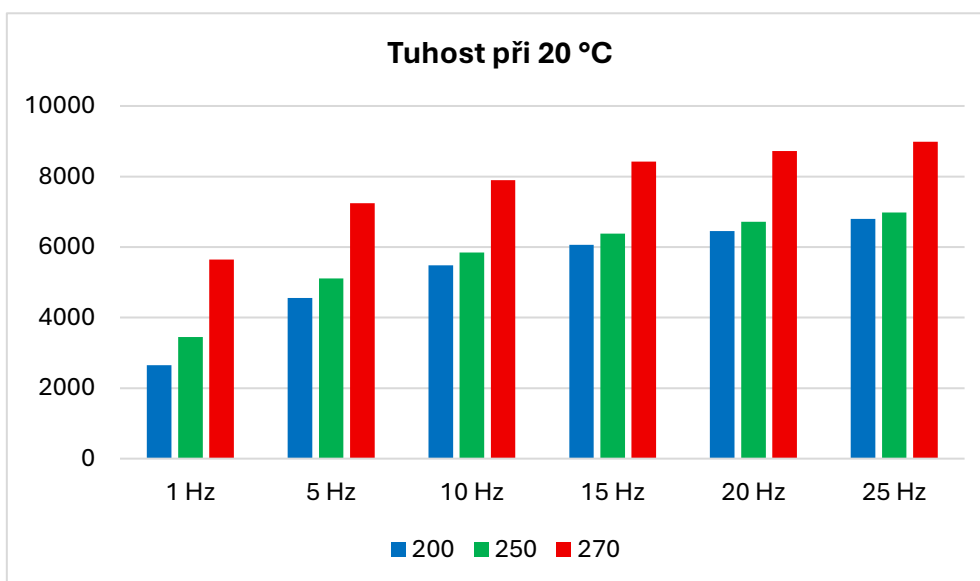
Tuhost při 20 °C						
tělesa	1 Hz	5 Hz	10 Hz	15 Hz	20 Hz	25 Hz
∅ 200	2646	4559	5479	6059	6454	6802
∅ 250	3451	5108	5842	6377	6716	6983
∅ 270	5646	7247	7899	8425	8721	8984

Tabulka 14 Modul tuhosti při teplotě 20 °C

Fázový úhel při 20 °C						
tělesa	1 Hz	5 Hz	10 Hz	15 Hz	20 Hz	25 Hz
∅ 200	35,7	28,3	25,0	23,4	22,5	22,1
∅ 250	27,0	21,4	19,2	18,2	17,5	16,9
∅ 270	15,8	13,4	12,5	12,5	12,3	12,6

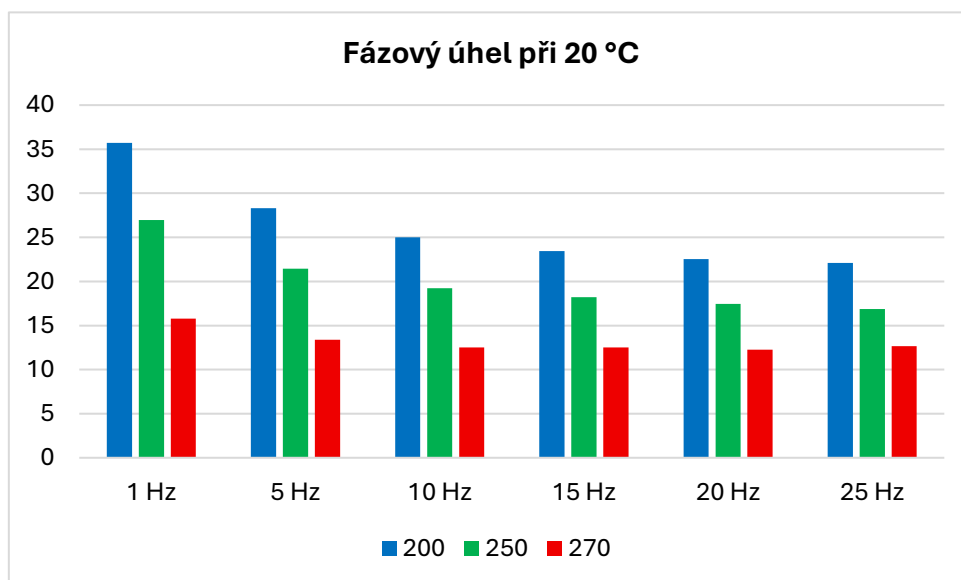
Tabulka 15 Fázový úhel při teplotě 20 °C

V grafu č. 16 jsou graficky porovnány výsledné naměřené tuhosti asfaltových směsí při různých frekvencích za stálé teploty 20 °C.



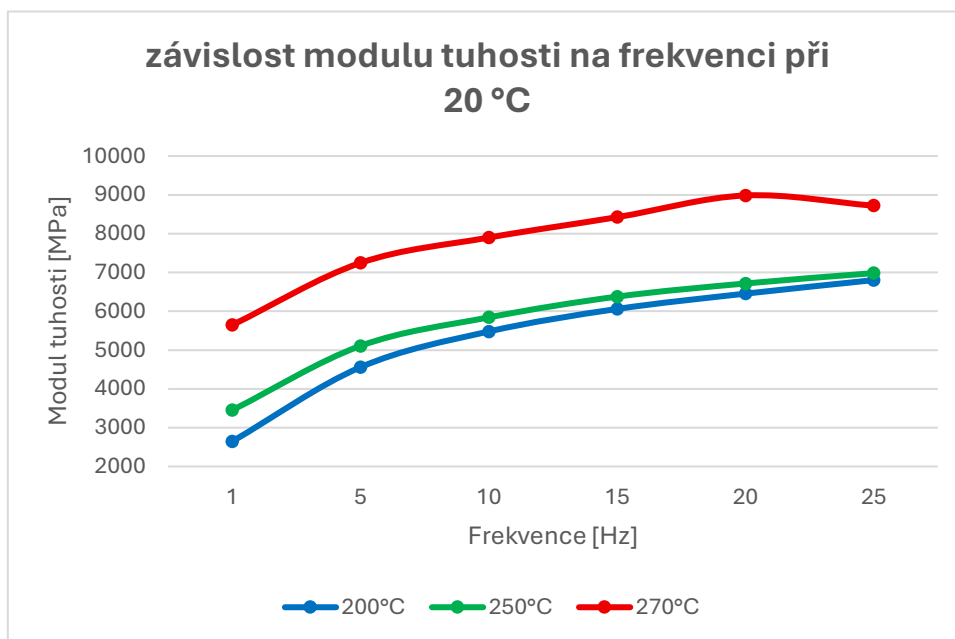
Graf 16 Výsledné naměřené tuhosti při teplotě 20 °C

V grafu č.17 jsou graficky porovnány výsledné naměřené fázové úhly při různých frekvencích za stálé teploty 20 °C.



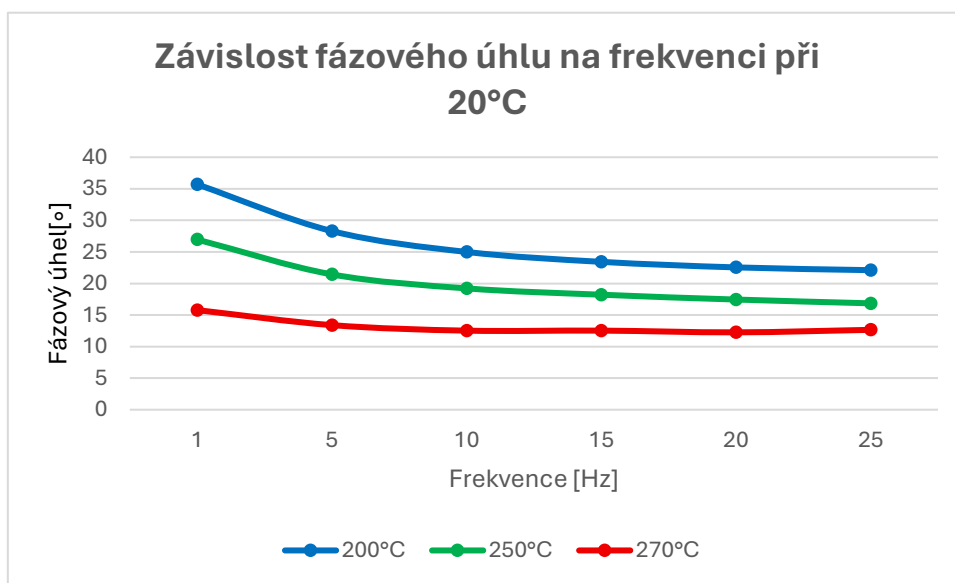
Graf 17 Výsledné naměřené fázové úhly při teplotě 20 °C

V grafu č. 18 je Závislost modulu tuhosti na frekvenci jednotlivých těles při teplotě 20 °C.



Graf 18 Závislost modulu tuhosti na frekvenci při teplotě 20 °C

V grafu č. 19 je Závislost fázového úhlu na frekvenci při teplotě 20 °C.



Graf 19 Závislost fázového úhlu na frekvenci při teplotě 20 °C

7.2.5. Modul tuhosti a fázový úhel při teplotě 25 °C

V tabulce č. 16 jsou naměřené výsledky aritmetických průměrů modulů tuhosti asfaltových směsí. V tabulce č. 17 jsou naměřeny aritmetické průměry fázových úhlů asfaltových směsí.

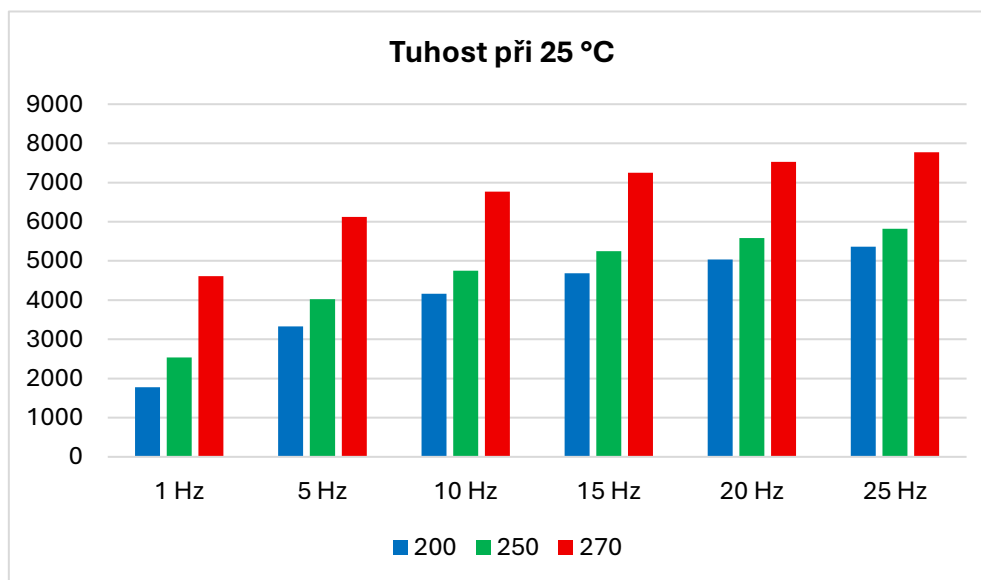
Tuhost při 25 °C						
tělesa	1 Hz	5 Hz	10 Hz	15 Hz	20 Hz	25 Hz
∅ 200	1781	3327	4166	4689	5040	5361
∅ 250	2535	4026	4752	5251	5583	5822
∅ 270	4612	6125	6766	7254	7526	7772

Tabulka 16 Modul tuhosti při teplotě 25 °C

Fázový úhel při 25 °C						
tělesa	1 Hz	5 Hz	10 Hz	15 Hz	20 Hz	25 Hz
∅ 200	41,4	33,8	30,2	28,5	27,5	27,1
∅ 250	31,7	25,3	22,9	21,7	20,9	20,3
∅ 270	18,6	15,8	14,6	14,5	14,1	14,2

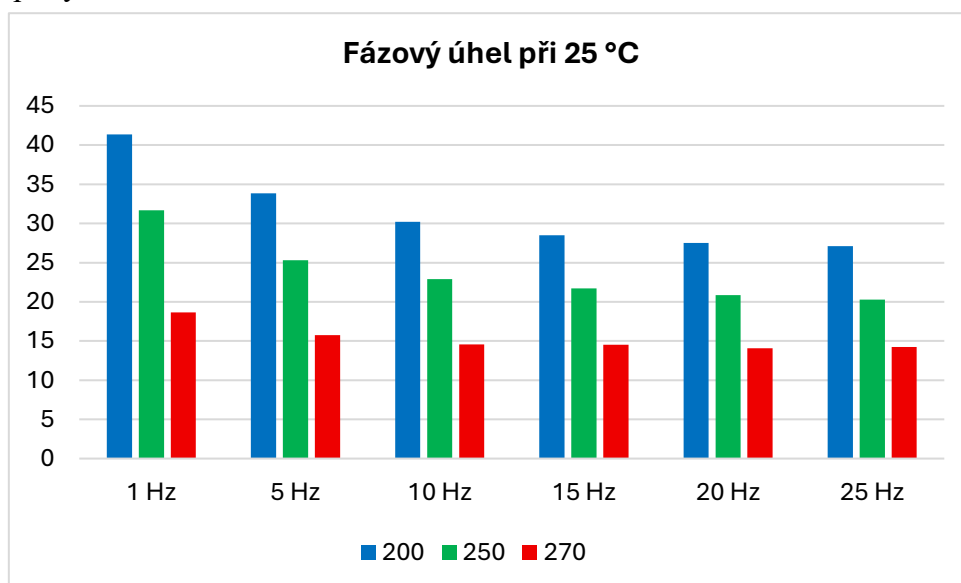
Tabulka 17 Fázová úhel při teplotě 25 °C

V grafu č. 20 jsou graficky porovnány výsledné naměřené tuhosti asfaltových směsí při různých frekvencích za stálé teploty 25 °C.



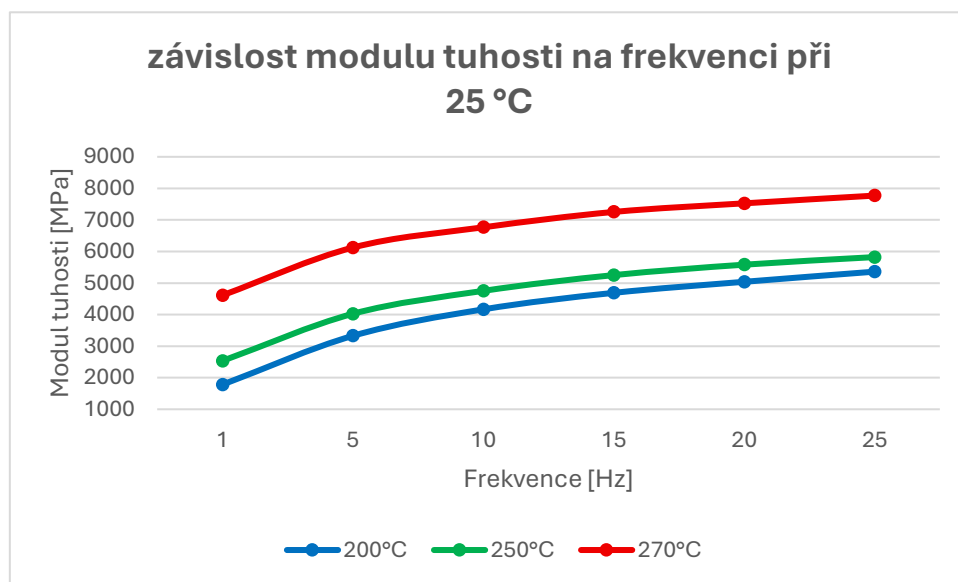
Graf 20 Výsledné naměřené tuhosti při teplotě 25 °C

V grafu č. 21 jsou graficky porovnány výsledné naměřené fázové úhly při různých frekvencích za stálé teploty 25 °C.



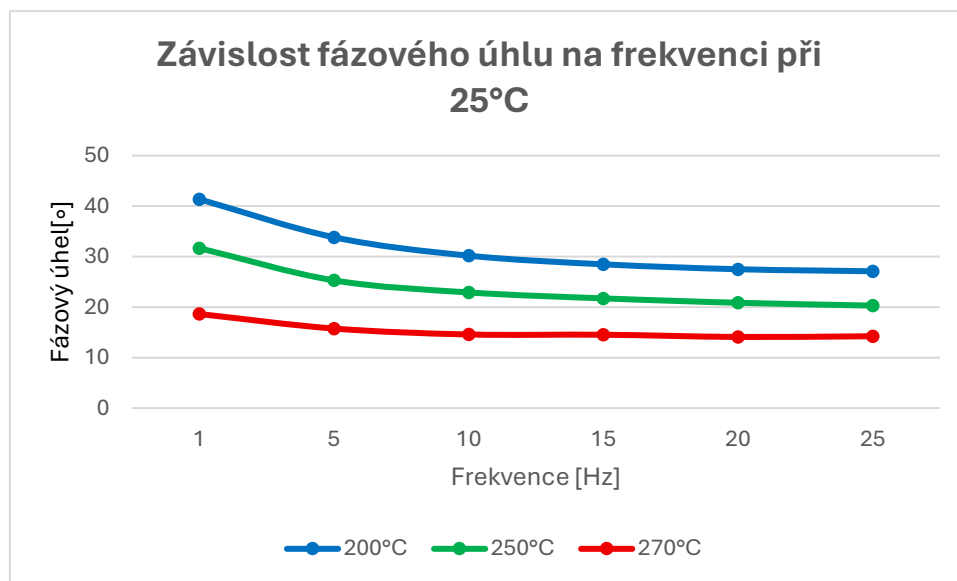
Graf 21 Výsledné naměřené fázové úhly při teplotě 25 °C

V grafu č. 22 je Závislost modulu tuhosti na frekvenci jednotlivých těles při teplotě 25 °C



Graf 22 Závislost modulu tuhosti na frekvenci při teplotě 25 °C

V grafu č. 23 je Závislost fázového úhlu na frekvenci při teplotě 25 °C



Graf 23 Závislost fázového úhlu na frekvenci při teplotě 25 °C

7.2.6. Modul tuhosti a fázový úhel při teplotě 40 °C

V tabulce č. 18 jsou naměřené výsledky aritmetických průměrů modulů tuhosti asfaltových směsí. V tabulce č. 19 jsou naměřeny aritmetické průměry fázových úhlů asfaltových směsí.

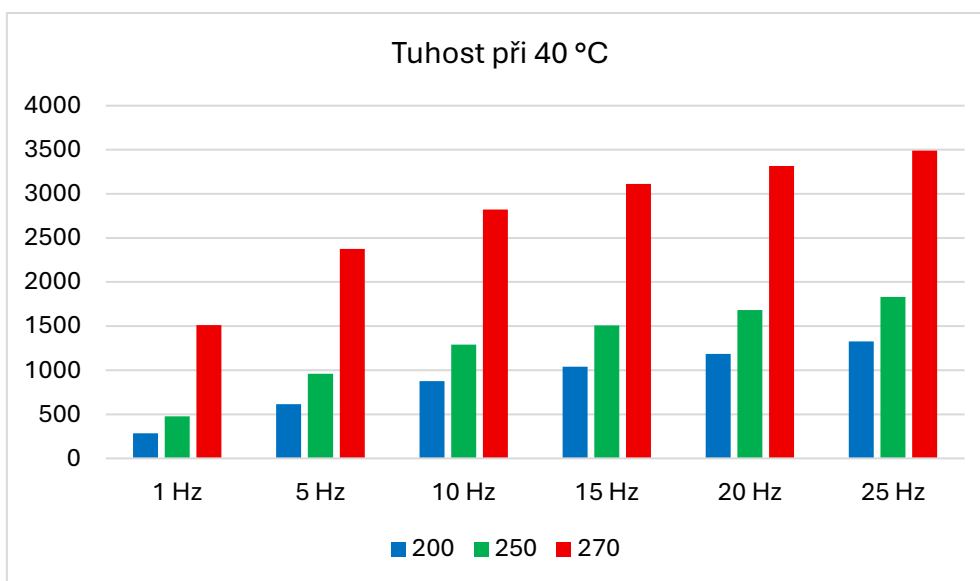
Tuhost při 40 °C						
tělesa	1 Hz	5 Hz	10 Hz	15 Hz	20 Hz	25 Hz
∅ 200	286	616	876	1040	1187	1328
∅ 250	477	960	1292	1507	1681	1830
∅ 270	1511	2376	2823	3114	3315	3489

Tabulka 18 Modul tuhosti při teplotě 40 °C

Fázový úhel při 40 °C						
tělesa	1 Hz	5 Hz	10 Hz	15 Hz	20 Hz	25 Hz
∅ 200	46,3	50,3	49,5	49,9	51,0	52,2
∅ 250	45,9	44,3	42,5	41,8	41,7	42,5
∅ 270	30,0	27,0	25,8	25,6	25,6	26,1

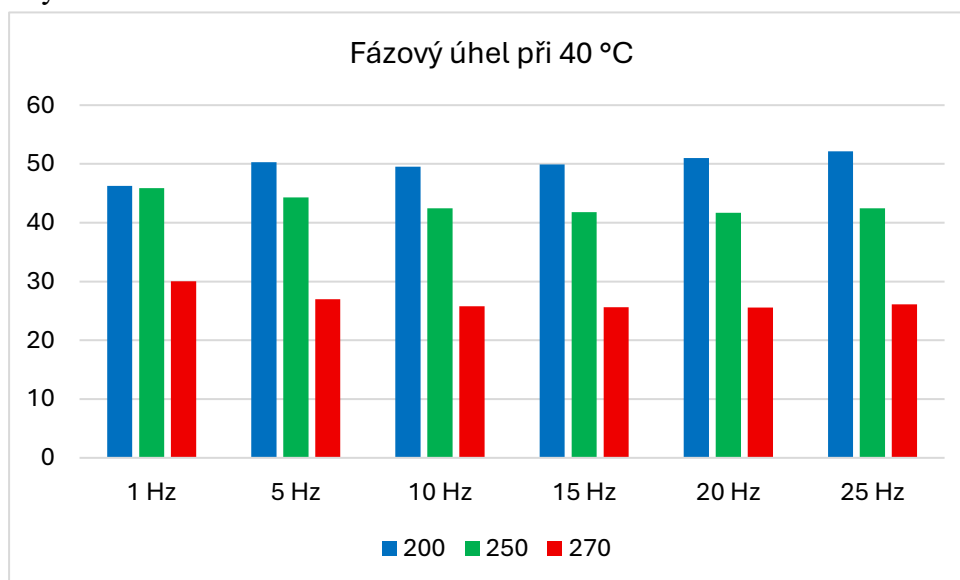
Tabulka 19 Fázový úhel při teplotě 40 °C

V grafu č. 24 jsou graficky porovnány výsledné naměřené tuhosti asfaltových směsí při různých frekvencích za stálé teploty 40 °C.



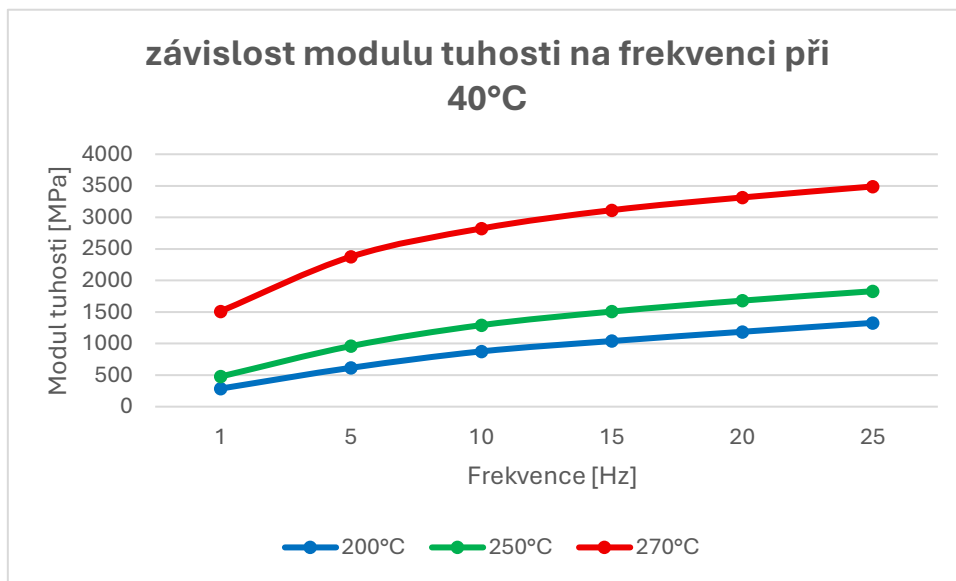
Graf 24 Výsledné moduly tuhosti při teplotě 40 °C

V grafu č. 25 jsou graficky porovnány výsledné naměřené fázové úhly při různých frekvencích za stálé teploty 40 °C.



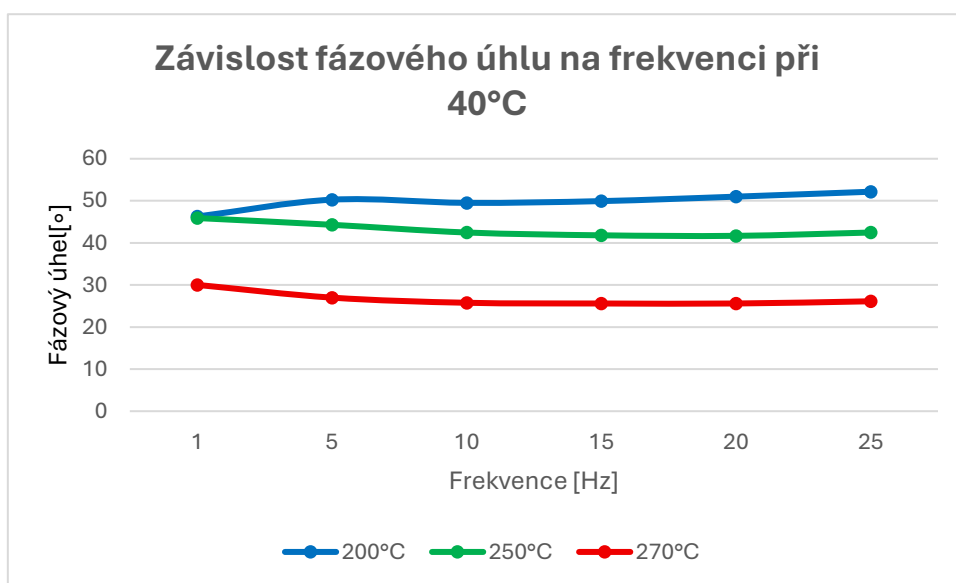
Graf 25 Výsledné naměřené fázové úhly při teplotě 40 °C

V grafu č. 26 je Závislost modulu tuhosti na frekvenci jednotlivých těles při teplotě 40 °C.



Graf 26 Závislost modulu tuhosti na frekvenci při teplotě 40 °C

V grafu č. 27 je Závislost fázového úhlu na frekvenci při teplotě 40 °C.



Graf 27 Závislost fázového úhlu na frekvenci při teplotě 40 °C

V tabulkách č. 8, 10, 12, 14, 16 a 18 jsou naměřené výsledné moduly tuhosti při sledovaných teplotách a frekvencích. V tabulkách 9, 11, 13, 15, 17 a 19 jsou zapsány odpovídající fázové úhly. Pro dané naměřené hodnoty byly vytvořeny, pro grafické porovnání, sloupcové grafy 4, 5, 8, 9, 12, 13, 16, 17, 20, 21, 24 a 25. Z grafů je patrné, že s narůstající teplotou, dochází u všech směsí k poklesu tuhosti. Zajímavé je, že u směsi vyrobené s teplotou kameniva 200 °C je při nižších teplotách (-5, 10, 15 °C) naměřený modul tuhosti vyšší, než u směsi s teplotou kameniva o výrobní teplotě 250 °C. Ovšem s rostoucí zkušební teplotu už dochází ke „schodovitému“ efektu v grafech a směsi o nižší výrobní teplotě kameniva vykazují výrazně nižší tuhost než směsi o vysoké výrobní teplotě kameniva. Tenhle rozdíl tuhosti je markantní v porovnání směsí 250 a 270.

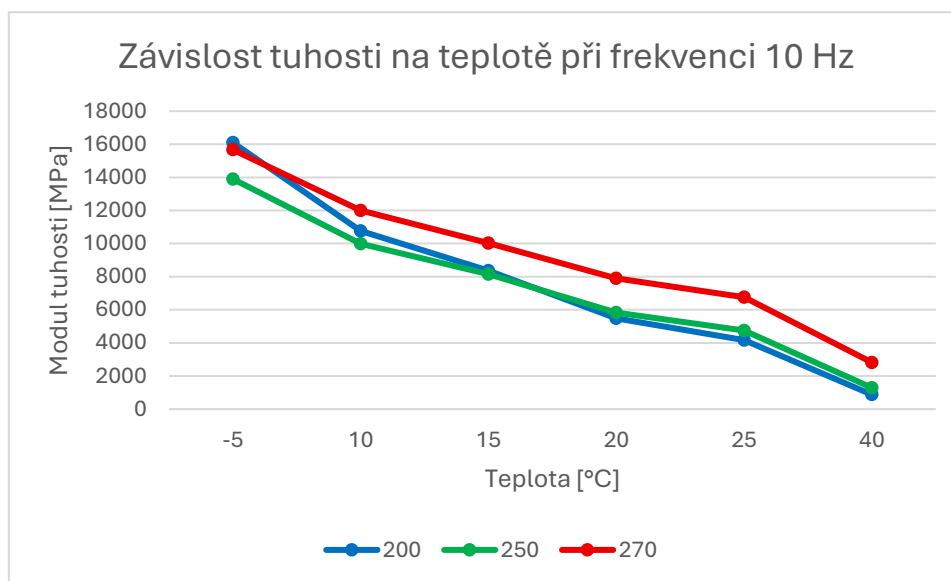
U fázových úhlů je se zvyšující se zkušební teplotou pozorován opačný trend, přičemž jeho naměřené hodnoty se snižující se teplotou klesají. Hodnoty fázového úhlu při vyšších zkušebních teplotách jednoznačně ukázaly, že směs vyrobená při teplotě kameniva 200 °C projevuje výrazně vyšší hodnoty fázového úhlu v porovnání se směsmi vyrobenými při teplotě kameniva 250 a 270 °C. Ovšem při nižších teplotách zkoušky dochází k výraznému rozptylu naměřených hodnot, z nichž nelze identifikovat jednoznačný trend.

Závislost modulu tuhosti na frekvenci jednoznačně ukazuje, jak vyšší frekvence zatěžování těles má za důsledek nárůst modulu tuhosti. A opačně, pokles fázového úhlu s narůstající frekvencí zatěžování. Velmi konzistentních a očekávaných výsledků bylo dosaženo opět při vyšší zkušební teplotě, a to teplotě 20 °C a vyšší. Při zkušební teplotě -5 °C vykazuje směs vyráběná při teplotě kameniva 200 °C při daných frekvencích dokonce vyšší hodnoty modulu tuhosti než ostatní dodané směsi. Nejednoznačná je také závislost fázového úhlu na frekvenci při zkušební teplotě -5 °C. Zatímco při všech ostatních zkušebních teplotách vykazuje směs 200. fázový úhel nejvyšší a směs 270 nejnižší, při zkušební teplotě -5 °C se fázový úhel hodnotově dostává pod směsi 250. a 270.

Z naměřených hodnot a jejich porovnání je jasně vidět trend, kdy směsi o výrobní teplotě kameniva 200 °C a 250 °C nevykazují zřetelné rozdíly v hodnotách, zatímco směsi o výrobní teplotě kameniva 270 °C se svými hodnotami násobně vzdalují od ostatních směsí.

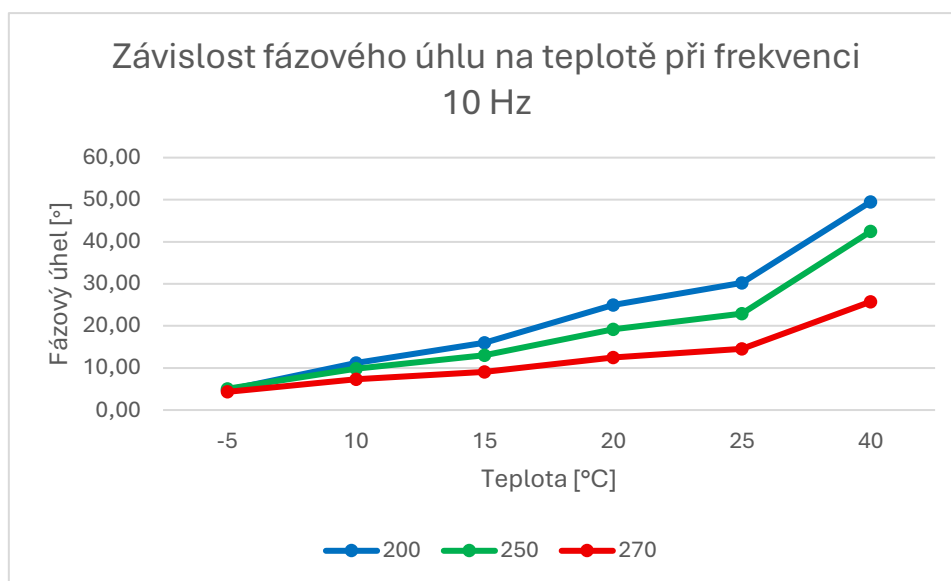
Tento poznatek je v souladu s normou ČSN 73 6121, která předepisuje maximální teplotu přidávaného R-materiálu na 250 °C.

V následujících grafech budou vyhodnoceny závislosti tuhosti a fázového úhlu na teplotě při frekvenci 10 Hz. Daná frekvence byla zvolena, protože se jedná o základní hodnotu podle technických podmínek TP170.



Graf 28 Závislost tuhosti na teplotě při frekvenci 10 Hz

Na grafu č. 28 je graficky znázorněna závislost tuhosti na teplotě při frekvenci 10 Hz všech tří zkoušených směsí. Směs s kamenivem o výrobní teplotě 200 °C, u které se předpokládala nejnížší tuhost vzhledem k nejméně zestárlému pojivu ve směsi, vykazuje při teplotě – 5 °C Nejvyšší tuhost ze všech tří směsí. Při vyšší zkušební teplotě (20 °C a více) směs s výrobní teplotou kameniva 200 °C vykazuje nižší modul tuhosti ze všech tří sledovaných směsí. Společně se směsí s výrobní teplotou kameniva 250 °C nabývá velmi podobných hodnot, zatímco směs s výrobní teplotou kameniva 270 °C vykazuje výrazně vyšší naměřené moduly tuhosti při všech teplotách (s výjimkou teploty -5 °C).



Graf 29 Závislost fázového úhlu na teplotě

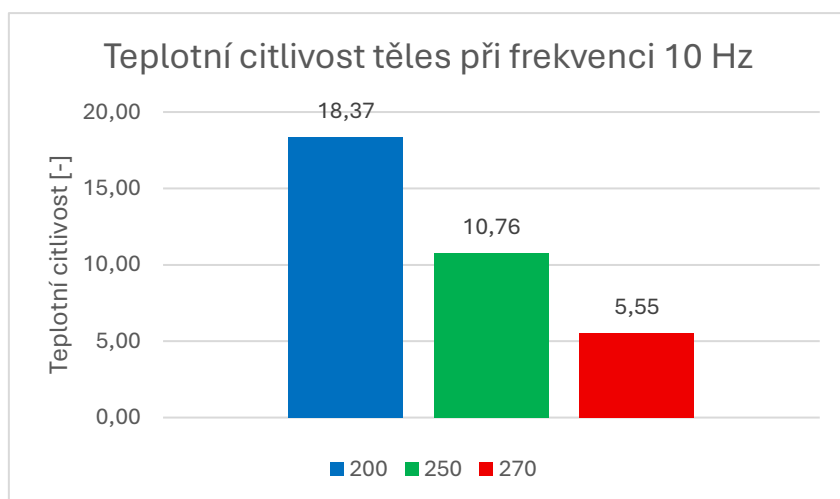
Na grafu č. 29 je graficky znázorněna závislost fázového úhlu na frekvenci všech tří zkoušených směsí. Všechny zkoušené směsi vykazovaly při teplotě -5 °C velmi podobné hodnoty fázových úhlů. S narůstající zkušební teplotou dochází ke zvyšování naměřeného fázového úhlu a poměrově velmi podobnému rozptylu naměřených hodnot.

7.3. Teplotní citlivost a frekvenční citlivost

Teplotní a frekvenční citlivost charakterizuje odchylku vlastností asfaltových směsí při změně teploty. Hodnotu citlivosti získáme podílem naměřených hodnot tuhosti a fázového úhlu při teplotě -5 °C a 40 °C. Hodnoty teplotní citlivosti při frekvenci 10 Hz jsou v tabulce č. 20 [28].

tělesa	Modul tuhosti [MPa]		Teplotní citlivost -5/40 [-]
	-5	40	
200	16096,25	876,00	18,37
250	13898,75	1291,75	10,76
270	15666,25	2823,00	5,55

Tabulka 20 Hodnoty teplotní citlivosti



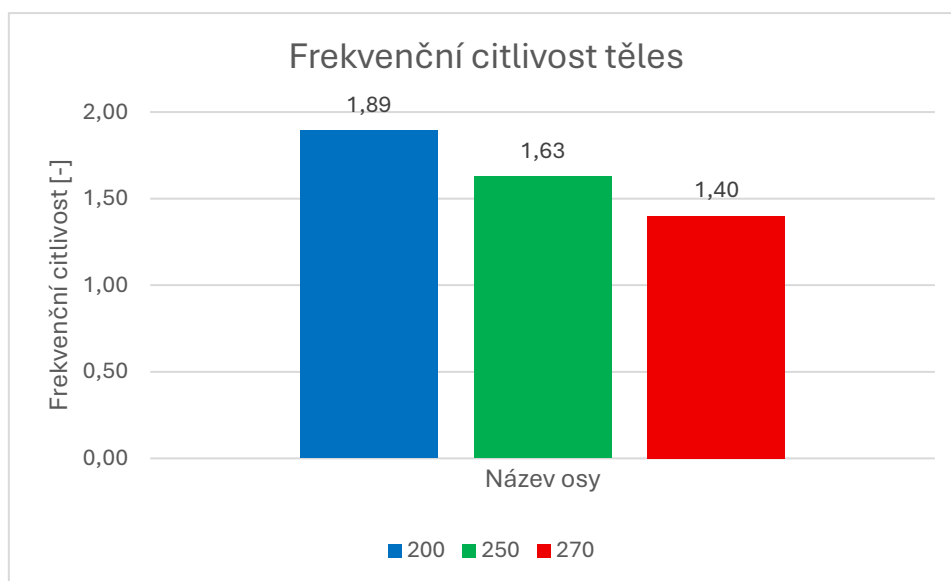
Graf 30 Teplotní citlivost při frekvenci 10 HZ

Z grafu č. 30 je zřejmé, že nejnižší teplotní citlivost vykazují směsi s výrobní teplotou kameniva 270 °C. Asfaltové směsi o výrobní teplotě kameniva 250 °C vykazují bezmála dvounásobnou teplotní citlivost oproti směsi 270 a asfaltová směs o výrobní teplotě kameniva 200 °C vykazuje více jak třínásobnou teplotní citlivost. Z toho vychází závěr, že asfaltové směsi s velmi zestárlejším pojivem, vykazují malou změnu vlastností při různých teplotách.

V tabulce č. 21 jsou zaznamenány hodnoty frekvenční citlivosti při frekvenci 10 Hz.

tělesa	Modul tuhosti [MPa]		Frekvenční citlivost 25/1 [-]
	25 Hz	1 Hz	
200	9789,50	5171,25	1,89
250	9210,25	5661,25	1,63
270	11058,00	7902,00	1,40

Tabulka 21 Hodnoty frekvenční citlivosti



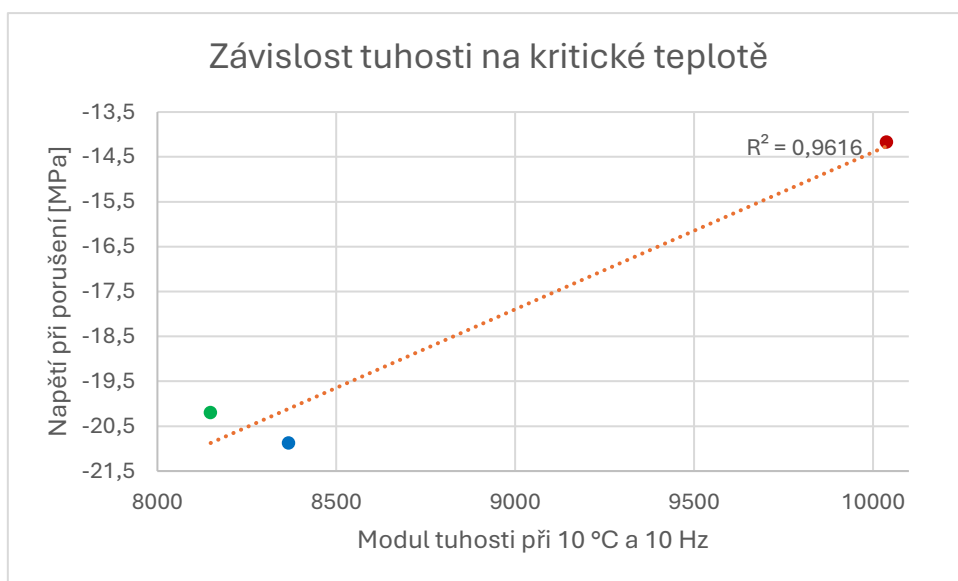
Graf 31 Frekvenční citlivost při frekvenci 10 Hz

Z grafu č. 31 je patrné, že nejvyšší frekvenční citlivosti dosahovala asfaltová směs s výrobní teplotou kameniva 200 °C a nejnižší frekvenční citlivosti asfaltová směs o výrobní teplotě 270 °C. Rozdíl ve frekvenční citlivost zkoušených asfaltových směsí už není tak velký, jako při teplotní citlivosti.

7.4. Korelace naměřených hodnot

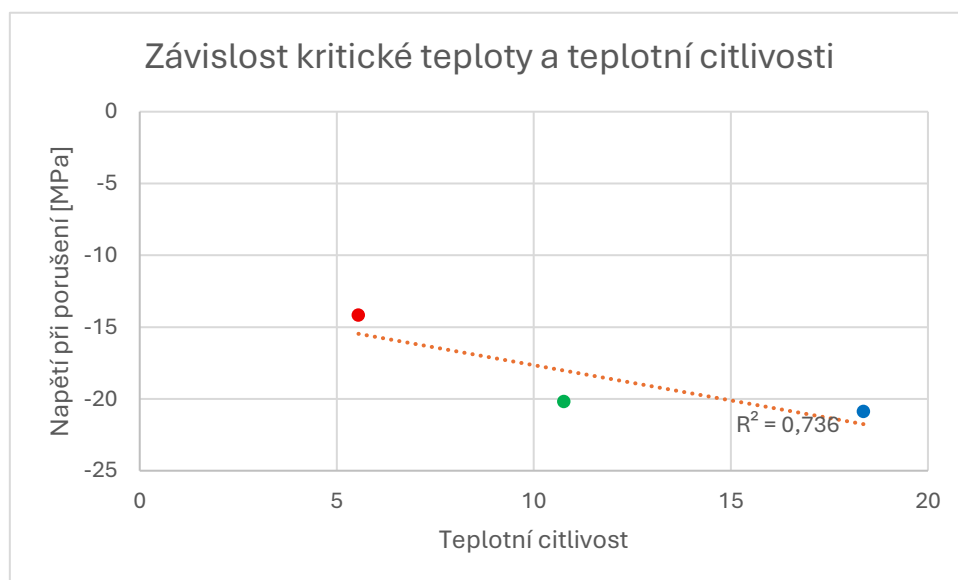
V následující kapitole budou porovnány naměřené hodnoty ze zkušební metody TSRST a 2PB-TR. Body v grafech vyjadřují jednotlivé asfaltové směsi. Pro porovnání bude využito koeficientu determinace, pomocí kterého lze vyjádřit hodnotu spolehlivosti R^2 . Při hodnotě koeficientu determinace R^2 hodnoty vyšší než 0,7, lze vztah mezi provedenými zkouškami považovat za silný. [29]

Pro zjištění závislosti modulu tuhosti na kritické teplotě, byly zvoleny hodnoty modulů tuhosti při teplotě 15 °C a frekvenci zatěžování 10 Hz.



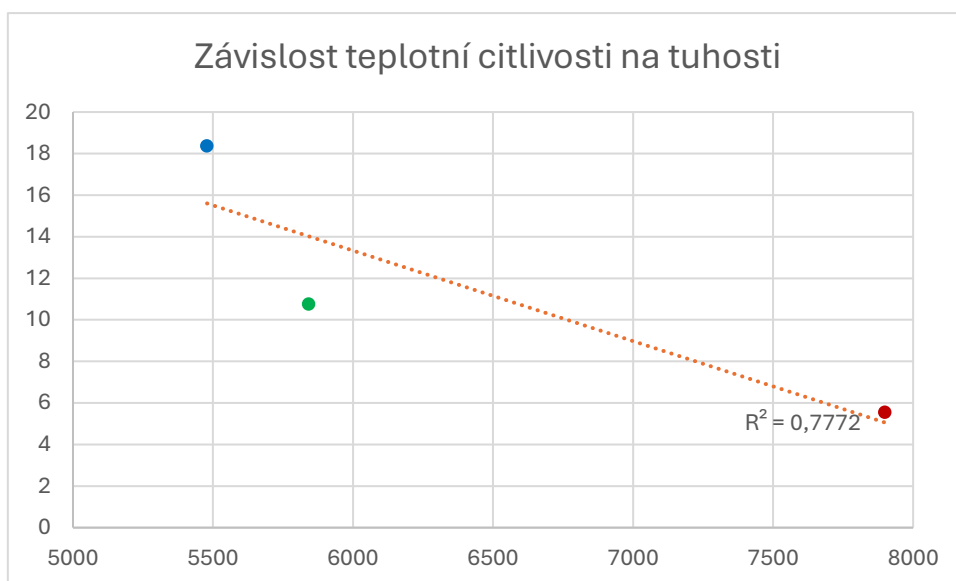
Graf 33 Závislost modulu tuhosti na kritické teplotě

Graf č. 32 ukazuje závislost modulu tuhosti na Kritické teplotě. Podle výsledné hodnoty koeficientu determinace $R^2 = 0,9616$ lze usoudit velmi silnou závislost mezi naměřenými hodnotami.



Graf 32 Závislost kritické teploty a teplotní citlivosti

Graf č. 33 ukazuje závislost kritické teploty, získané ze zkoušky TSRST na teplotní citlivosti. Podle výsledné hodnoty koeficientu determinace $R^2 = 0,736$ lze usoudit silnou závislost mezi naměřenými hodnotami.



Graf 34 Závislost teplotní citlivosti na tuhosti

Graf č. 34 ukazuje závislost teplotní citlivosti na tuhosti. Podle výsledné hodnoty koeficientu determinace $R^2 = 0,772$ lze usoudit silnou závislost mezi naměřenými hodnotami.

8. Závěr

Diplomová práce měla za úkol určit, do jaké míry se použití přehřátého kameniva při výrobě asfaltových směsí projeví na změně jejich mechanických vlastností. Na tělesech asfaltové směsi ACO 11+ dodané firmou COLAS CZ, a.s., vyrobené při teplotě kameniva 200 °C, 250 °C a 270 °C, byla provedena zkouška nízkoteplotních vlastností TSRST a dvoubodová zkouška ohybem metodou 2PB-TR.

Asfaltová směs s výrobní teplotou kameniva 200 °C (označeno 200) dosahovala nejlepších nízkoteplotních charakteristik. Mezi směsí 200 a směsí s výrobní teplotou kameniva 250 °C (označeno 250) byl rozdíl naměřeného napětí při porušení 0,39 MPa a teploty při porušení 0,7 °C. Rozdíl daných hodnot mezi směsmi 250 a 270 (směs s kamenivem nahřátým na teplotu 270 °C) byl ale výrazně větší, a to 1,67 MPa a 7 °C. To jednoznačně poukazuje na fakt, že i mírné překročení normové limitní teploty kameniva (250 °C), má za následek výrazné zhoršení nízkoteplotních vlastností, pravděpodobně důsledkem termooxidační degradace asfaltového pojiva.

Dvoubodovou zkouškou ohybem metodou 2PB-TR byly všechny tři vzorky asfaltové směsi vystavovány opakujícímu se sinusovému zatížení v rozsahu od 1 Hz do 25 Hz při teplotách od -5 °C do 40 °C. Z výsledků zkoušky v rozsahu od -5 °C do 15 °C jsou naměřené moduly tuhosti směsi 200 a 250 srovnatelné při všech frekvencích zatěžování. Při teplotách 20 °C a vyšší už směsi 200 vykazují při všech frekvencích modul tuhosti nejnižší v porovnání s ostatními směsmi. Při stejných teplotách také dochází k výrazně vyššímu rozdílu tuhosti mezi směsmi 270 a 250, než mezi směsmi 200 a 250. Pro měřené fázové úhly tak výrazný trend nenastává. Rozdíly fázových úhlů mezi směsmi 270 a 250 jsou sice vyšší, než mezi směsmi 200 a 250, ale už ne tak výrazné. TP170 vyžaduje pro směsi ACO 11+ modul tuhosti 7500 MPa při teplotě 15 °C a frekvenci zatěžování 10 Hz dle ČSN EN 12697-26. S výjimkou těles 250.3 a 270.2, tomuto požadavku většina zkoušených těles vyhověla, tudíž lze považovat za splněný.

Nejvyšší teplotní citlivost vykazovala směs s výrobní teplotou kameniva 200 °C. Oproti tomu nejnižší teplotní citlivost vykazuje směs o výrobní teplotě kameniva 270 °C. Stejně tak i frekvenční citlivost vykazuje nejvyšší směs 200 a nejnižší směs 270.

Provedené zkoušky na asfaltových směsích prokázaly, že není vhodné použití teploty kameniva při výrobě asfaltových směsí vyšší, než 250 °C. Naměřené hodnoty modulu tuhosti a nízkoteplotních vlastností u vzorků 200 a 250 nabývaly podobných hodnot. A to i přes fakt, že rozdíl výrobní teploty mezi směsmi je dvou a půlnásobná, oproti směsi 270.

9. Použitá literatura

- [1] ZHANG, Tianyu; LIU, Xiang; LI, Xiao; LUO, Haoyuan a JIA, Jingpeng. Laboratory study on temperature loss behavior of asphalt mixture during transportation. *Case Studies in Construction Materials*. 2025, č. 22, s. 1-15. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214509525006941>)
- [2] H, Paul H a DIXON, Karen. *Highway Engineering*. 7. U.S.A.: John Wiley & Sons, Somerset, New Jersey, U.S.A., 2003. ISBN 9780471264613.
- [3] HERKUL a.s. Obalované živičné směsi [online]. Dostupné z: <https://www.herkul.cz/obalovna/obalovane-zivicne-smesi>
- [4] Obalovna Ostrava s.r.o. Obalovna Ostrava [online]. Dostupné z: <https://www.obalovna-osrava.cz>
- [5] SILASFALT S.R.O. *Výroba*. Online. 1995. Dostupné z: <https://www.silasfalt.cz/web/kontakty.html>. [cit. 2025-12-07].
- [6] Obalovna. *Wikipedie: Otevřená encyklopedie* [online]. [cit. 2025-12-03]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Obalovna>
- [7] STRABAG. *Jak probíhá výroba asfaltové směsi?* Online. 24. 10. 2022. 2022. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=PL4jO-KU2Xo>
- [8] ČSN EN 73 6121, *Stavba vozovek - Hutněné asfaltové vrstvy - Provádění a kontrola shody*. OPRAVA 1. Praha, 2023.
- [9] PRAŽSKÁ OBALOVNA HERINK S.R.O. *Zastřešení skládek*. Online. 2021. Dostupné z: <https://www.obalovnaherink.cz/technologie>. [cit. 2025-12-07].
- [10] BAEST MACHINES & STRUCTURES, A.S. *Studené dávkování*. Online. 2022, 2022. Dostupné z: <https://www.baest.cz/produkty/obalovny-zivicnych-smesi/studene-davkovani/#>. [cit. 2025-12-07].

- [11] D&G MACHINERY TECHNOLOGY CO., LTD. *Asphalt Batching Plant Burner Types*. Online. 2025. Dostupné z: https://www.dgmachinery.net/asphalt_batching_plant_burner_types/. [cit. 2025-12-07].
- [12] PRAŽSKÁ OBALOVNA HERINK S.R.O. *Šetrnější k životnímu prostředí*. Online. 2021. Dostupné z: <https://www.obalovnaherink.cz/technologie>. [cit. 2025-12-08].
- [13] BAEST MACHINES & STRUCTURES, A.S. *Sušící bubny*. Online. 2022, 2022. Dostupné z: <https://www.baest.cz/produkty/obalovny-zivicnych-smesi/susici-bubny/>. [cit. 2025-12-07].
- [14] ING. MALÁNÍK, Stanislav. *Využití polymerem modifikovaných asfaltů a oživovacích přísad v asfaltových směsích*. Diplomová práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2021.
- [15] United States. Federal Highway Administration. *Drum Plants*. [online]. Washington, D.C.: FHWA, 1997 [cit. 2025-12-01]. Dostupné z: <https://www.fhwa.dot.gov/pavement/recycling/98042/06.cfm>
- [16] MONITORING S.R.O. *Z čeho je asfalt a jak se vyrábí?* Online. 1995. Dostupné z: <https://www.moni.cz/aktuality/z-ceho-je-asfalt>. [cit. 2025-12-09].
- [17] KAUN Miroslav a František LUXEMBURK. *Pozemní komunikace 30. 3.*, přepracované vydání. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2002. ISBN 80-01-02486-5.
- [18] ING. COUFALÍK, Pavel. *Reologické vlastnosti asfaltových pojiv*. Dizertační práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2017.
- [19] Zhen, T., Kang, X., Liu, J., Zhang, B., Si, W. & Ling, T. *Multiscale evaluation of asphalt aging behaviour: a review*. Sustainability [online]. 2023, 15(4), 2953 [cit. 2025-12-03]. Dostupné z: <https://www.mdpi.com/2071-1050/15/4/2953>
- [20] GAMARRA, A. a E. A. OSSA. *Thermo-oxidative aging of bitumen*. International Journal of Pavement Engineering [online]. 2018, 19(7), 641–650. ISSN 1029-8436. Dostupné z: <https://doi.org/10.1080/10298436.2016.1199876>

- [21] ČSN EN 12697-46, *Asfaltové směsi - Zkušební metody - Část 46: Nízkoteplotní vlastnosti a tvorba trhlin pomocí jednoosé zkoušky tahem*. 2. Praha: Úřad pro technickou normalizaci a státní zkušebnictví, 2021.
- [22] ČSN EN 12697-26+A1, *Asfaltové směsi – Zkušební metody – Část 26: Tuhost*. 2. vydání. Praha: ÚNMZ, 2018.
- [23] ING. HOLUBEC, Matěj. *VLASTNOSTI ASFALTOVÝCH SMĚSÍ SE SYNTETICKÝMI POJIVY*. Online, Diplomová práce, vedoucí doc. Ing. Ondřej Dašek, Ph.D. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2025. Dostupné z: https://www.vut.cz/www_base/zav_prace_soubor_ve-rejne.php?file_id=276484. [cit. 2026-01-15].
- [24] HÝZL, Petr; VARAUS, Michal; COUFALÍKOVÁ, Iva; MONDSCHHEIN, Petr; VALENTIN, Jan et al. *Metodika aplikace R-materiálu do asfaltových směsí typu SMA (Stone mastix asphalt): Vlastní popis metodiky*. Online. 2017. 2017.
- [25] BOCÁK, Tomáš. *VLIV DÁVKOVÁNÍ R-MATERIÁLU ZA STUDENA NA VÝSLEDNOU TEPLITU ASFALTOVÉ SMĚSI*. Bakalářská práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2023.
- [26] AMMANN GROUP. *Ammann Recycling Technology: Creating value through re-use*. [online]. Langenthal: Ammann Group, [bez data]. Dostupné z: <https://www.ammann.com> [cit. 2026-01-03].
- [27] GENCER, Mehmet Nezir; GENCER, Selim Emre; KARAPAHIN, Mustafa; MEMIS, Mustafa a KUNDURACIOĞLU, Gülseren. *A NEW METHOD FOR HOT RECYCLING OF ASPHALT*. Online. 2012. Istanbul: Ýstanbul Üniversitesi Ýnþaat Mühendisliði Bölümü Ulaþtırma Anabilim Dalý 34320 Avcýlar/Ýstanbul, 2012. Dostupné z: <https://www.h-a-d.hr/pubfile.php?id=441>. [cit. 2026-01-03].

10. Seznam tabulek

Tabulka 1 Mezní teploty asfaltových směsí [8].....	13
Tabulka 2 Prosévací zkouška kameniva	25
Tabulka 3 Zkoušky kameniva.....	26
Tabulka 4 Sítový rozbor a vlastnosti R-materiálu	27
Tabulka 5 Teplota kameniva a směsi na obalovně	27
Tabulka 6 Minimální rozměry zkušebních těles.....	35
Tabulka 7 Výsledné naměřené hodnoty zkoušky TSRST	38
Tabulka 8 Modul tuhosti při teplotě -5 °C.....	42
Tabulka 9 Fázový úhel při teplotě -5 °C	42
Tabulka 10 Modul tuhosti při teplotě 10 °C	44
Tabulka 11 Fázový úhel při teplotě 10 °C.....	44
Tabulka 12 Modul tuhosti při teplotě 15 °C	47
Tabulka 13 Fázový úhel při teplotě 15 °C.....	47
Tabulka 14 Modul tuhosti při teplotě 20 °C	49
Tabulka 15 Fázový úhel při teplotě 20 °C.....	49
Tabulka 16 Modul tuhosti při teplotě 25 °C	52
Tabulka 17 Fázový úhel při teplotě 25 °C	52
Tabulka 18 Modul tuhosti při teplotě 40 °C	54
Tabulka 19 Fázový úhel při teplotě 40 °C	54

Tabulka 20 Hodnoty teplotní citlivosti.....	59
Tabulka 21 Hodnoty frekvenční citlivosti.....	60

11. Seznam obrázků

Obrázek 2 Dávkovací zásobníky studeného dávkování [10]	14
Obrázek 1 Skládka kameniva podle frakcí na obalovně Zádveřice	14
Obrázek 3 Sušící buben Jihočeské obalovny [13].....	15
Obrázek 4 Schéma obalovny se studeným dávkováním [27]	16
Obrázek 5 Schéma obalovny s paralelním bubnem [15].....	17
Obrázek 6 Schéma metody Drum-mix [16]	18
Obrázek 7 Schéma obalovny s nepřímým ohřevem [27]	19
Obrázek 8 Proces stárnutí asfaltových směsí[19]	20
Obrázek 9 Mikroskopická struktura asfaltu před stárnutím [20]	21
Obrázek 10 Mikroskopická struktura asfaltu po stárnutí [20].....	22
Obrázek 11 Čára zrnitosti kameniva	26
Obrázek 12 Řezání zkušebních těles	28
Obrázek 13 Podstata zkoušky TSRST [21]	29
Obrázek 14 Zatěžovací zařízení pro provádění zkoušky jednoosým tahem při nízkých teplotách [21]	30
Obrázek 15 Lepení vzorku v centrovacím rámu	31
Obrázek 16	32
Obrázek 17	32
Obrázek 18 Schéma ukotvení.....	34

Obrázek 19 Geometrie a upevnění zkušebních těles.....	35
Obrázek 20 Zkušební tělesa zkoušky tuhosti ve zkušebním zařízení	36

12. Seznam grafů

Graf 1 Maximální napětí při porušení	38
Graf 2 Teplota vzorku při porušení	39
Graf 3 Závislost napětí na teplotě	40
Graf 4 Výsledné naměřené tuhosti při teplotě -5 °C	42
Graf 5 Výsledné naměřené fázové úhly při teplotě -5 °C	43
Graf 6 Závislost modulu tuhosti na frekvenci při teplotě -5 °C	43
Graf 7 Závislost fázového úhlu na frekvenci při teplotě -5 °C	44
Graf 8 Výsledné naměřené tuhosti při teplotě 10 °C.....	45
Graf 9 Výsledné naměřené fázové úhly při teplotě 10 °C.....	45
Graf 10 Závislost modulu tuhosti na teplotě při 10 °C	46
Graf 11 Závislost fázového úhlu na frekvenci při teplotě 10 °C.....	46
Graf 12 Modul tuhosti při teplotě 15 °C	47
Graf 13 Výsledné Fázové úhly při teplotě 15 °C	48
Graf 14 Závislost modulu tuhosti při teplotě 15 °C	48
Graf 15 Závislost fázového úhlu na teplotě při 15 °C.....	49
Graf 16 Výsledné naměřené tuhosti při teplotě 20 °C.....	50
Graf 17 Výsledné naměřené fázové úhly při teplotě 20 °C.....	50
Graf 18 Závislost modulu tuhosti na frekvenci při teplotě 20 °C	51
Graf 19 Závislost fázového úhlu na frekvenci při teplotě 20 °C.....	51

Graf 20 Výsledné naměřené tuhosti při teplotě 25 °C.....	52
Graf 21 Výsledné naměřené fázové úhly při teplotě 25 °C.....	53
Graf 22 Závislost modulu tuhosti na frekvenci při teplotě 25 °C	53
Graf 23 Závislost fázového úhlu na frekvenci při teplotě 25 °C.....	54
Graf 24 Výsledné moduly tuhosti při teplotě 40 °C.....	55
Graf 25 Výsledné naměřené fázové úhly při teplotě 40 °C.....	55
Graf 26 Závislost modulu tuhosti na frekvenci při teplotě 40 °C	56
Graf 27 Závislost fázového úhlu na frekvenci při teplotě 40 °C.....	56
Graf 28 Závislost tuhosti na teplotě při frekvenci 10 Hz	58
Graf 29 Závislost fázového úhlu na teplotě.....	59
Graf 30 Teplotní citlivost při frekvenci 10 HZ.....	60
Graf 31 Frekvenční citlivost při frekvenci 10 Hz	61
Graf 32 Závislost kritické teploty a teplotní citlivosti.....	62
Graf 33 Závislost modulu tuhosti na kritické teplotě	62
Graf 34 Závislost teplotní citlivosti na tuhosti	63