

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

### I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Dočkalová Jméno: Alena Osobní číslo: \_\_\_\_\_  
Zadávající katedra: katedra silničních staveb  
Studijní program: Stavební inženýrství  
Studijní obor: Konstrukce a dorpava

### II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce: Vliv stárnutí asfaltových směsí na jejich tuhost a šíření trhliny  
Název diplomové práce anglicky: Influence of Ageing of the Asphalt Mixes on Stiffness and Crack propagation

Pokyny pro vypracování:

Rešerše problematiky stárnutí asfaltových směsí, tuhosti asfaltových směsí, odolnosti asfaltových směsí vůči vzniku trhlin, praktické stanovení modulů tuhosti metodou IT-CY, stanovení šíření trhliny na půlválcovém zkušebním tělese na minimálně desítky vybraných typech směsí

Seznam doporučené literatury:

Jméno vedoucího diplomové práce: Ing. Petr Mondschein, Ph.D.

Datum zadání diplomové práce: 20.2.2017 Termín odevzdání diplomové práce: 21.5.2017  
*Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku*

Podpis vedoucího práce

Podpis vedoucího katedry

### III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

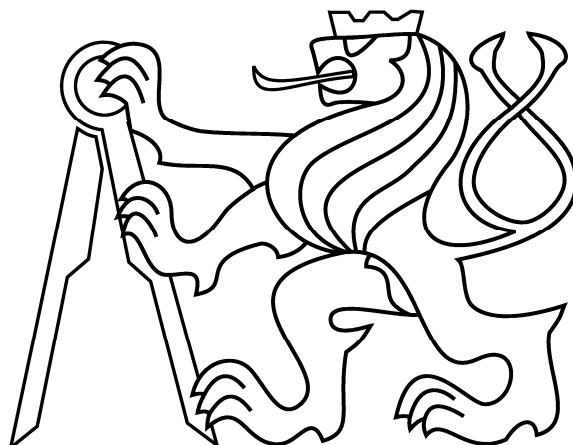
*Beru na vědomí, že jsem povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je nutné uvést v diplomové práci a při citování postupovat v souladu s metodickou příručkou ČVUT „Jak psát vysokoškolské závěrečné práce“ a metodickým pokynem ČVUT „O dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací“.*

20.2.2017

Datum převzetí zadání

Podpis studenta(ky)

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE  
FAKULTA STAVEBNÍ  
KATEDRA SILNIČNÍCH STAVEB  
2017



## **DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**Vliv stárnutí asfaltových směsí na jejich  
tuhost a šíření trhliny**

Vypracovala: Bc. Alena Fejtová

Vedoucí práce: Ing. Petr Mondschein, Ph.D.

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem zadanou diplomovou prací na téma „Vliv stárnutí asfaltových směsí na jejich tuhost a šíření trhliny“ vypracovala samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací vedoucího diplomové práce a uvedla jsem veškerý seznam použité literatury a informačních zdrojů. Vše v souladu s Metodickým pokynem č. 1 /2009 O dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských státních závěrečných prací. Dále prohlašuji, že nemám námitek proti užití této diplomové práce, či její části.

V Praze dne .....

.....

Alena Fejtová

## **Poděkování**

Tímto bych chtěla poděkovat svému vedoucímu práce, Ing. Petru Mondscheinovi, Ph.D. za jeho cenné rady a trpělivost během zpracovávání této diplomové práce. Dále bych chtěla poděkovat také Ing. Janu Valentinovi, Ph.D., Ing. Pavle Vackové, Ing. Tereze Valentové, Ing. Lucii Benešové a Ing. Jakubu Šedinovi za ochotu a pomoc při práci v silniční laboratoři.

## **Abstrakt**

Diplomová práce je věnována sledování vlivu stárnutí asfaltových směsí na změnu jejich tuhosti a chování směsi při zkoušce šíření trhliny. V první části je práce zaměřena na problematiku stárnutí asfaltových pojiv a směsí, modul tuhosti a jeho měření v laboratoři a šíření trhliny na půlválcovém tělese, včetně zahraničních zkušeností s využitím této zkoušky. Hlavní část je věnována praktickému ověření účinků laboratorní simulace stárnutí asfaltových směsí na jejich vybrané vlastnosti, kterými jsou modul tuhosti a odolnost vůči lomu za specifických podmínek, které by mohly odpovídat podmínkám pro stanovení únavových vlastností. Použité metody stárnutí byly uložení zkušebních těles při teplotě 85°C po dobu 5, 10 a 15 dní a metoda PAV. Výsledky potvrdily předpoklad, že vlivem stárnutí asfaltové směsi dochází k navýšení její tuhosti. Zároveň však u sledovaných směsí došlo k navýšení odolnosti vůči lomu, což bylo opakem očekávání. Vysvětlením by mohly být procesy probíhající během umělé simulace stárnutí, kdy je směs dlouhodobě vystavena teplotě vyšší, než je bod měknutí asfaltového pojiva.

**Klíčová slova:** stárnutí asfaltových směsí, metody laboratorní simulace stárnutí, modul tuhosti, šíření trhliny, odolnost vůči lomu, mezerovitost asfaltových směsí

## **Abstract**

This thesis is devoted to observing the influence of the aging of the asphalt mixtures on stiffness and crack propagation. The first part of the thesis is focused on issues of aging of the asphalt binders and mixtures, their stiffness and its determination in laboratory and also the crack propagation on the semi-circular test specimens, including abroad experiences with the usage of this method. The main part of this thesis is focused on the verification of the influence of laboratory aging of the asphalt mixtures on their properties which are stiffness and fraction toughness during special conditions, which could be used to simulate the fatigue behavior of the asphalt mixtures. To simulate the asphalt aging, asphalt mixtures specimens were put to the climatic box with 85°C during 5, 10 and 15 days and also the PAV method was used. Results proved the expectation that the asphalt mixtures stiffness rises because of the aging. But at the same time the fraction toughness increased and it wasn't expected. The explanation could be the processes during the simulation of aging, because the asphalt mixtures specimens are exposed to the temperature higher than the softening point of the asphalt binder.

**Key word:** aging of the asphalt mixtures, laboratory methods of aging, stiffness modulus, crack propagation, fraction toughness, void ration of the asphalt mixtures

# Obsah

<b>1</b>	<b>ÚVOD.....</b>	<b>9</b>
<b>2</b>	<b>CÍL PRÁCE.....</b>	<b>10</b>
<b>3</b>	<b>TEORETICKÉ POZNATKY O STÁRNUTÍ ASFALTOVÝCH SMĚSÍ, JEJICH TUHOSTI A ODOLNOSTI VŮČI ŠÍŘENÍ TRHLIN.....</b>	<b>11</b>
3.1	STÁRNUTÍ ASFALTOVÉHO POJIVA.....	11
3.1.1	Termooxidační stárnutí.....	12
3.1.2	Destilační stárnutí.....	12
3.1.3	Migrační procesy.....	12
3.1.4	Strukturální stárnutí (tvrdnutí).....	13
3.2	STÁRNUTÍ ASFALTOVÝCH SMĚSÍ.....	13
3.2.1	Metody laboratorního stárnutí asfaltových směsí.....	14
3.2.1.1	Vídeňská metoda.....	15
3.2.1.2	PAV – Pressure Aging Vessel.....	17
3.3	TUHOST ASFALTOVÝCH SMĚSÍ.....	19
3.3.1	Modul tuhosti.....	19
3.3.2	Metody pro stanovení tuhosti směsi.....	19
3.3.2.1	Dvoubodová zkouška ohybem na vetknutém komolém klínu (2PB-TR) nebo na tělesech tvaru trámečku (2PB-PR).....	20
3.3.2.2	Zkouška tříbodovým ohybem (3PB-PR) nebo čtyřbodovým ohybem (4PB-PR) na tělesech tvaru trámečku.....	21
3.3.2.3	Zkouška v příčném tahu na válcových zkušebních tělesech (IT-CY).....	22
3.3.2.4	Zkouška jednoosým tahem a tlakem na válcových zkušebních tělesech (DTC-CY).....	24
3.3.2.5	Zkouška v přímém tahu na válcových zkušebních tělesech (DT-CY) nebo na tělesech tvaru trámečku (DT-PR).....	25
3.3.2.6	Zkouška opakovaným namáháním v příčném tahu na válcových zkušebních tělesech (CIT-CY).....	26
3.3.3	Vliv stárnutí asfaltové směsi na její modul tuhosti.....	27
3.4	ODOLNOST ASFALTOVÝCH SMĚSÍ VŮČI ŠÍŘENÍ TRHLINY – ZKOUŠKA OHYBEM NA	

PŮLVÁLCOVÉM TĚLESE .....	27
3.4.1 Zkouška šíření trhliny na půlválcovém tělese dle ČSN EN 12697 – 44.....	27
3.4.2 Další využití zkoušky ohybem na půlválcových tělesech – zahraniční zkušenosti.....	28
3.4.2.1 Vliv vybraných parametrů na výsledky SCB testu.....	30
3.4.3 Lomová energie .....	32
3.4.3.1 Lomová houževnatost a lomová energie .....	33
<b>4 PRAKTICKÉ OVĚŘENÍ POZNATKŮ O STÁRNUTÍ NA VYBRANÝCH ASFALTOVÝCH SMĚSÍCH .....</b>	<b>34</b>
4.1 POUŽITÉ ASFALTOVÉ SMĚSI .....	34
4.2 ZKUŠEBNÍ METODY A POSTUPY .....	37
4.2.1 Měření modulu tuhosti.....	38
4.2.2 Stárnutí asfaltových směsí .....	40
4.2.3 Zkouška šíření trhliny na půlválcovém tělese.....	41
4.3 VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ.....	43
4.3.1 Změny objemové hmotnosti a mezerovitosti v důsledku stárnutí .....	43
4.3.2 Modul tuhosti .....	46
4.3.2.1 Změny modulů tuhostí směsí při zkušební teplotě 15°C v důsledku stárnutí	46
4.3.2.2 Změny modulů tuhostí směsí v závislosti na metodě stárnutí při různých zkušebních teplotách.....	53
4.3.2.3 Změny modulů tuhosti po stárnutí 5 dnů v závislosti na zkušební teplotě	55
4.3.3 Šíření trhliny na půlválcovém tělese.....	58
4.3.3.1 Odolnost vůči lomu na tělesech zestárých metodou 5d@85°C.....	58
4.3.3.2 Porovnání vlivu druhu stárnutí na odolnost vůči lomu.....	62
<b>5 ZÁVĚR .....</b>	<b>65</b>
<b>REFERENCE.....</b>	<b>68</b>
<b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>	<b>71</b>
<b>SEZNAM TABULEK.....</b>	<b>73</b>



**SEZNAM GRAFŮ ..... 74**

**PŘÍLOHY ..... 75**

# 1 ÚVOD

Konstrukce vozovek jsou vždy navrhovány s danou životností. Během této životnosti jsou použité materiály vystavovány různým negativním vlivům, které mohou významně ovlivnit jejich vlastnosti – materiály stárnou. Měly by nás tedy zajímat charakteristiky materiálu nejen před jeho použitím ve vozovce, ale zejména změna těchto charakteristik během užívání a před koncem životnosti. Jedině tak můžeme správně předvídat, jak se bude použitý materiál v konstrukci vozovky chovat během jejího užívání.

U asfaltových netuhých vozovek bychom se měli snažit porozumět změnám chování asfaltových směsí v čase. Jak se například změní tuhost asfaltové směsi během jejího používání ve vozovce? Na čem tato změna závisí a lze ji nějak ovlivnit či řídit? Na tyto a mnoho dalších otázek bychom se měli snažit najít odpověď, abychom mohli navrhovat vozovkové konstrukce efektivněji.

Pokud mluvíme o změnách vlastností asfaltových směsí v čase, jedná se o jejich degradaci a stárnutí. Snahou by mělo do budoucna být používání asfaltových směsí, které vykazují lepší odolnost vůči stárnutí. Tyto směsi zvyšují trvanlivost konstrukce vozovky, ale i příznivě ovlivňují náklady životního cyklu vozovky. Trendem je v současnosti také recyklace asfaltových směsí a použití recyklátu jako určitý procentuální podíl do nové směsi. Dochází tím k ekonomičtějším využití materiálu z neobnovitelných přírodních zdrojů. Vysoká schopnost recyklovatelnosti asfaltové směsi a její použití v nových asfaltových vrstvách je podmíněná zvýšenou odolností směsi vůči stárnutí. Jedině tehdy se dá směs využít dále s přidanou hodnotou, tedy do nových asfaltových směsí, a nejen jako podřadný materiál do nestmelených vrstev vozovky. Využití odpadních stavebních materiálů je také součástí principů rámcové odpadové směrnice 2008/98/EC. Ta udává, že pokud nelze zamezit vzniku odpadů, je prioritou jeho opětovné využití. [1]

Problematika stárnutí asfaltových směsí je tedy tématem velmi aktuálním a je nutné se jí v rámci trvale udržitelného rozvoje výstavby silniční infrastruktury zabývat.

## 2 CÍL PRÁCE

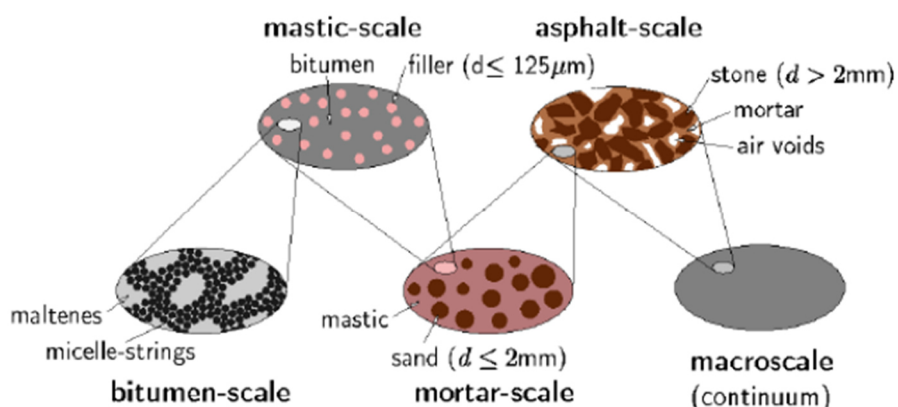
Tato práce je rozdělena na dvě části. První část je věnována teoretickým poznatkům. Zde je cílem seznámení s problematikou stárnutí asfaltových směsí a poživ, tuhosti asfaltových směsí a její změnou v návaznosti na stárnutí směsí. Teoretická část má také informovat o zkoušce šíření trhliny na půlválcových tělesech. V druhé části bude cílem práce praktické ověření teoretických poznatků o stárnutí asfaltových směsí. U vybraných asfaltových směsí bude určen modul tuhosti dle ČSN EN 12697 – 26 a následně budou tělesa rozdělena do skupin dle metody stárnutí. U zestárlých těles bude opět zjištěn modul tuhosti, který se porovná s modulem tuhosti před stárnutím. Předpokladem je navýšení tuhosti směsí vlivem stárnutí. U vybraných směsí bude také sledována změna objemové hmotnosti (ČSN EN 12697 – 6) a mezerovitosti vzhledem ke stárnutí. Následně budou tělesa rozdělena a provede se zkouška odolnosti proti šíření trhliny. Zde je předpoklad, že zestárlá tělesa budou vlivem navýšení tuhosti křehčí a odolnost vůči lomu bude nižší. Výsledky zkoušek jednotlivých směsí se porovnají a budou vyvozeny závěry.

### 3 TEORETICKÉ POZNATKY O STÁRNUTÍ ASFALTOVÝCH SMĚSÍ, JEJICH TUHOSTI A ODOLNOSTI VŮČI ŠÍŘENÍ TRHLIN

Stárnutí asfaltových směsí představuje obecně přirozený jev. Při výrobě, dopravě a pokládce je směs vystavena velmi vysokým teplotám, ve vozovce na ni poté působí další negativní vlivy, jako jsou například srážky, dopravní zatížení, ale i vystavení chemickým účinkům. V dnešní době je již velmi dobře známo, že stárnutí asfaltových směsí je způsobeno stárnutím použitého asfaltového pojiva. Zestárlé asfaltové pojivo způsobuje změnu tuhosti asfaltové směsi, náchylnost ke vzniku trhlin a má vliv také na únavové vlastnosti směsi. V následující části práce bude uvedeno, čím je stárnutí asfaltového pojiva způsobeno, jak můžeme dělit stárnutí asfaltových směsí a jaké existují nejběžnější metody jeho laboratorní simulace.

#### 3.1 Stárnutí asfaltového pojiva

Jak již bylo zmíněno, stárnutí asfaltové směsi je způsobeno stárnutím asfaltového pojiva. Asfaltové pojivo je organická směs uhlovodíků se zastoupením až tisíce různých sloučenin. Rozlišujeme zde dvě hlavní skupiny sloučenin, a to tekuté složky – tzv. maltény a pevné částice – asfaltény. [2] Na obrázku 1 můžeme vidět schématické znázornění asfaltové směsi od makrostruktury (macroscale) až po znázornění právě mikrostruktury (bitumen-scale) samotného asfaltového pojiva (vlevo dole), kde můžeme vidět rozdělení na tekuté maltény a pevné micely tvořené asfaltény.



Obrázek 1 : Schématické znázornění asfaltové směsi [1]

Stárnutí asfaltového pojiva je děj, který se odehrává právě na základě chemického složení a vnitřní struktury asfaltu. Například nárůstem podílu asfalténů se současným nárůstem interakce celých asfaltových micel dochází k výraznému tvrdnutí pojiva. [1] Celkově je stárnutí děj velmi složitý a v následujícím textu budou zjednodušeně popsány čtyři jeho hlavní formy.

### **3.1.1 Termooxidační stárnutí**

Prvním a v podstatě nejvýznamnějším způsobem stárnutí asfaltového pojiva je tzv. termooxidační stárnutí. Jedná se o stárnutí způsobené přístupem vzdušného kyslíku za zvýšené teploty. Kyslíkové atomy jsou zabudovány do uhlovodíkových molekul, ze kterých následně vznikají sloučeniny, které významně ovlivňují fyzikální vlastnosti pojiva (pružnost, modul tuhosti, křehkost).

Termooxidační stárnutí se nejvíce projevuje již při výrobě, dopravě a pokládce asfaltové směsi. Při těchto procesech je asfaltové pojivo vystaveno velmi vysokým teplotám, což urychluje a usnadňuje působení vzdušného kyslíku. Proces oxidačního stárnutí však provází asfaltovou směs po celou dobu její životnosti. Jak moc se projeví, je však závislé na dalších faktorech, jako je například tloušťka asfaltového filmu, mezerovitost směsi (plocha asfaltového pojiva, na kterou může kyslík působit) a také tloušťka konstrukce. [3]

### **3.1.2 Destilační stárnutí**

Tento jev můžeme nazvat také jako odpařování, které vzniká zejména při působení velkých teplot. Při delším působení zvýšené teploty dochází u asfaltů s podílem lehkých olejovitých podílů k jejich odpařování. Destilační stárnutí je závislé hlavně na teplotě, velikosti povrchu a na penetraci asfaltu. Dochází díky němu také ke změnám vlastností pojiva, avšak ne tak významným jako při oxidačním stárnutí. [4]

### **3.1.3 Migrační procesy**

Jedná se o jev téměř shodný s destilačním stárnutím. Probíhá však za běžných teplot a s menší rychlostí. Nastává v případě, že jsou do asfaltového pojiva přimíchány malé podíly fluxačních olejů. Tento jev také vzniká, pokud jsou při výrobě použité nedostatečně výkonné destilační kolony. Výsledkem je, že pojivo křehne. [3]

### 3.1.4 Strukturální stárnutí (tvrdnutí)

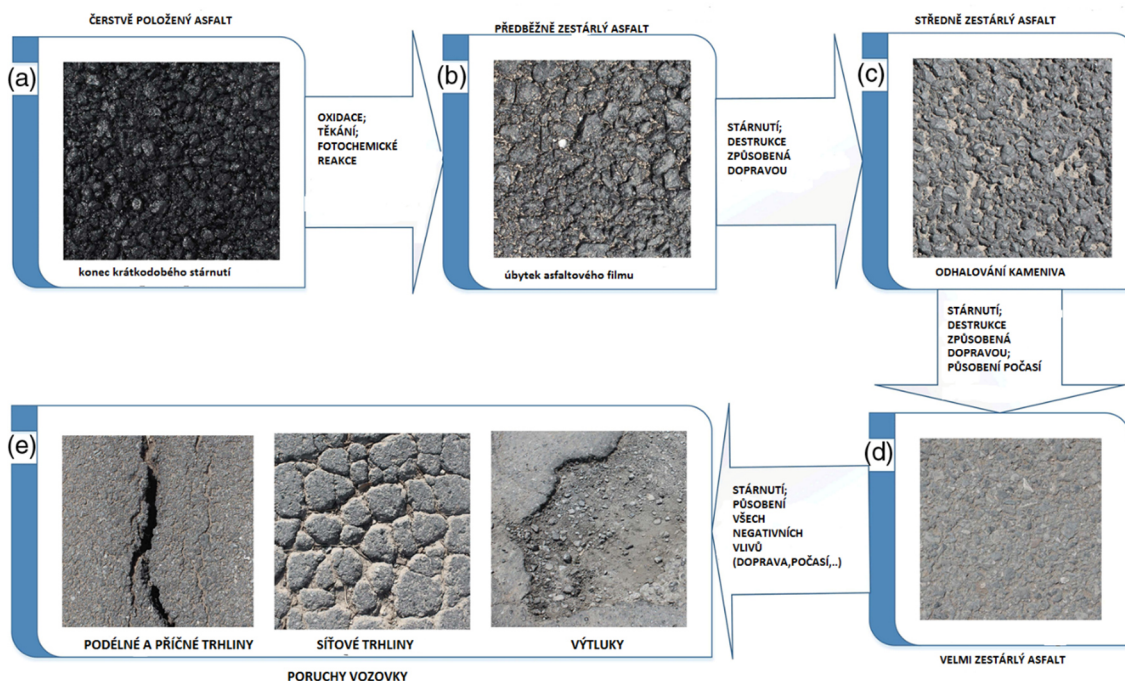
Jedná se o převážně vratný děj, kdy je pojivo dlouhodobě vystaveno nižším nebo pokojovým teplotám a dochází k reorganizaci a zafixování molekul. Tento děj není spojen s chemickými změnami. Přesto dochází ke zdánlivému nárůstu tvrdosti pojiva. [4]

## 3.2 Stárnutí asfaltových směsí

Obecně můžeme stárnutí asfaltových směsí rozdělit na krátkodobé a dlouhodobé. Krátkodobé stárnutí probíhá v řádu několika hodin během výroby, dopravy a pokládky asfaltové směsi. Během těchto dějů je asfalt vystaven velmi vysokým teplotám a přísunu vzdušného kyslíku. Dochází tak ke zmíněnému termooxidačnímu stárnutí. Pokud se zvolí a dodrží vhodné technologické postupy, je možné krátkodobé stárnutí redukovat na minimum. Jedním z možných řešení tohoto problému je například již běžné využití produktů a technologií pro nízkoteplotní asfaltové směsi. Další možností je výroba asfaltové směsi v ochranné atmosféře – např. v dusíku. [1]

Dlouhodobé stárnutí asfaltové směsi probíhá v řádu několika let, kdy je směs uložena ve vozovce a působí na ni vnější vlivy. Zde hraje velkou roli například mezerovitost směsi. Směsi s vysokou mezerovitostí umožňují přístup kyslíku (ale i jiných atmosférických plynů – ozon, oxidy dusíku, atd.) k asfaltovému pojivu, které tak stárne rychleji. Důležitou roli také hraje tloušťka asfaltového filmu, kterým jsou obalena zrna kameniva. Pokud je obsah pojiva ve směsi vyšší, je asfaltový film silnější. Tím pádem je spodní část vrstvy v okolí zrn kameniva v podstatě chráněna před účinky negativních vlivů. Dalšími negativními vlivy jsou poté například atmosférické srážky, střídání teplot, dopravní zatížení, zimní údržba vozovek nebo UV záření.

Jak již bylo zmíněno, vlivem stárnutí dochází u asfaltu, potažmo asfaltové směsi, ke zvýšení tuhosti. Mohlo by se zdát, že jde o pozitivní jev. Vyšší tuhost směsi by znamenala vyšší únosnost. Směs s vyšší tuhostí je odolnější vůči vzniku trvalých deformací v podobě vyjetých kolejí a také lépe roznáší zatížení. S nárůstem tuhosti však dochází ke zkřehnutí směsi. To vede k náchylnosti ke vzniku trhlin a zhoršení únavových vlastností směsi.



Obrázek 2: Proces dlouhodobého stárnutí a vznik poruch vozovky

Kombinací těchto změn dochází ke snížení životnosti vozovky a znehodnocení asfaltové směsi, která se nadále jen těžko může využít jako plnohodnotný produkt po odebrání z konstrukce. [5]

### 3.2.1 Metody laboratorního stárnutí asfaltových směsí

V současné době existuje více jak 30 různých metod pro simulaci stárnutí asfaltových směsí. [1] Některé metody je možné nalézt například v normě prEN 12697-52 [6] nebo americké normě AASHTO R 30-02 [7]. Další metody jsou uvedeny v různých výzkumných projektech. Většina metod je založená na uložení ztuhnutých asfaltových těles, či volně ložené směsi po určitou dobu do vyhřevného boxu se zvýšenou teplotou. Takto je možné simulovat jak krátkodobé, tak dlouhodobé stárnutí. Během laboratorní simulace stárnutí se může dobře využít proces superpozice času a teploty. Platí zde, že proces stárnutí při nižší teplotě po delší čas odpovídá stárnutí při vyšší teplotě po čas kratší. To je velmi příznivá zpráva, protože se proces hlavně dlouhodobého stárnutí může velmi urychlit. Pro ještě větší urychlení procesu stárnutí se často využívá dodatečně vnesený přetlak, který zvýší rychlost oxidativních procesů.

V americké studii SHRP [8] byla provedena řada testů na simulaci krátkodobého i dlouhodobého stárnutí. Z těchto testů byla vyvozena některá doporučení, která dala

vzniknout současným nejvíce používaným metodám laboratorního stárnutí. Přehled vybraných metod je na obrázku č. 3.

VOLNĚ LOŽENÁ ASFALTOVÁ SMĚS			ZHUTNĚNÁ TĚLESA Z ASFALTOVÉ SMĚSI		
Metody	Krátkodobé stárnutí	Dlouhodobé stárnutí	Metody	Krátkodobé stárnutí	Dlouhodobé stárnutí
Vain Gooswillingen	/	160 °C / 16 h	Mugler	/	163 °C / 5 h
LCPC	135 °C / 4 h	100 °C / 24 h	EMPA	135 °C / 3 h	110-120°C / 16 h
ISBS	/	80 °C / 4 dny	SATS	/	85 °C / 65 h (nasyčeno, 2,1 Mpa)
RILLEM	135 °C / 4 h	85 °C / 7-9 dní	AASHTO R30-02	135 °C / 2-4 h	85 °C / 5 dní
			Tia'	/	60 °C / 90 dní
kombinace s UV zářením					

Obrázek 3: Přehled vybraných metod pro simulaci laboratorního stárnutí [21]

Nastává zde však několik okolností, kterým je třeba věnovat pozornost. Například při stárnutí volně ložené směsi může docházet k velmi nepříznivým jevům. Přesto, že u této metody dochází k homogennímu stárnutí, naskytá se otázka, zda změny vyvolané termooxidačním stárnutím neovlivní následnou zhutnitelnost směsi. Pokud by tomu tak bylo, výsledky dalších měření na nedostatečně zhutněných tělesech by byly zavádějící.

Dalším problémem je, že používané vysoké teploty u některých metod mohou zapříčinit vznik jevů a chemických reakcí, které by s největší pravděpodobností v reálné konstrukci vozovky nenastaly. Jedná se především o vypařování snadno těkavých sloučenin. [1]

Problémem u stárnutí již zhutněných těles spojeným s vysokou teplotou je také to, že může docházet k poškození původního tvaru tělesa. Na zdeformovaném tělese se již těžko správně naměří například modul tuhosti.

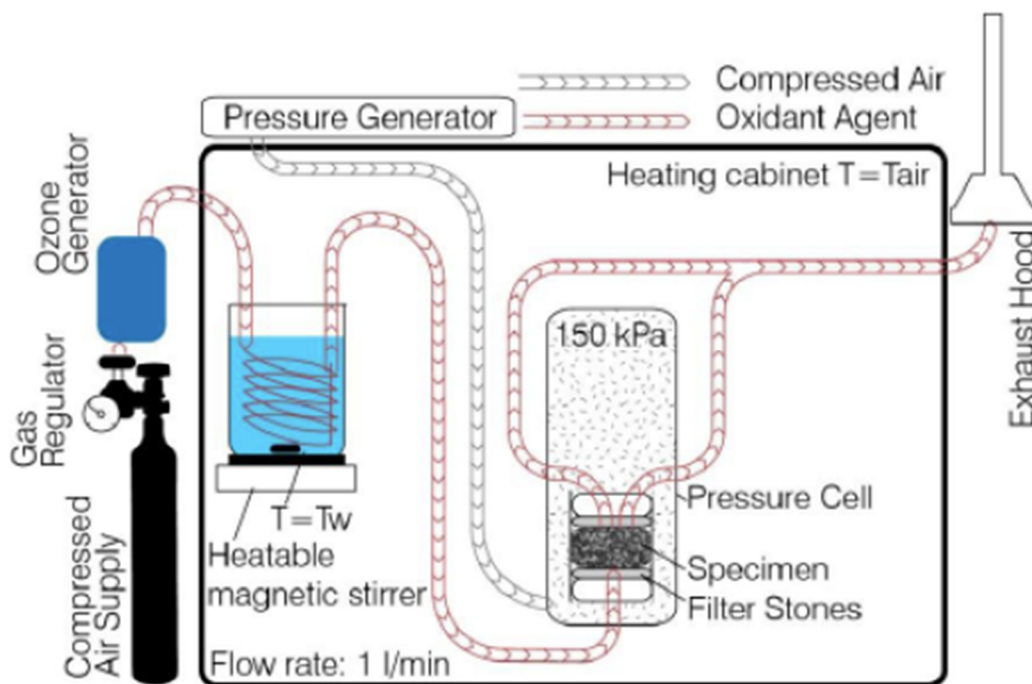
V současnosti existují metody, které se snaží vyřešit nedostatky metod uvedených výše. Dvě z nich budou stručně popsány v následujícím textu.

### 3.2.1.1 Vídeňská metoda

Tato metoda vznikla na základě jednoho z projektů SHRP [8] v rámci interdisciplinárního výzkumného projektu „Ökophalt“ [1] na vídeňské univerzitě. Tato metoda byla vyvinuta pro simulaci dlouhodobého stárnutí u zhutněných těles z asfaltových směsí. Během několika dní dokáže vyvolat stav dlouhodobého stárnutí způsobený hlavně oxidativními



jevy. Účinky stárnutí se porovnávají nejčastěji pomocí sledování změny tuhosti asfaltové směsi, potažmo asfaltového pojiva. Jak již bylo uvedeno, během stárnutí totiž dochází k navyšování tuhosti asfaltu. Pro potřeby simulace se používá triaxiálová komora, která je běžně užívaná pro zkoušky zemin a nestmelených vrstev. Schéma uspořádání zkoušky je na obrázku č. 4.



Obrázek 4: Schéma vídeňské metody simulace dlouhodobého stárnutí [1]

Celá triaxiální komora se po celou dobu nachází v klimatizační komoře, ve které je udržována teplota  $45^{\circ}\text{C} - 85^{\circ}\text{C}$  pro urychlení oxidačních procesů. Ve válcové komoře je s využitím oxidačního činidla vytvořen lehký přetlak. Oxidační činidlo tak proudí rovnoměrně okolo zkušební tělesa a působí na něj. Jako oxidační činidlo se používá buďto čistý kyslík, nebo ozonem obohacený kyslík. Tím se výrazně zvýší koncentrace činidla oproti běžnému vzduchu, který působí na reálnou konstrukci vozovky, čímž dojde k podstatnému urychlení stárnutí. Oxidační činidlo je navíc průběžně ohříváno v průtokovém ohříváči, což celý proces stárnutí také urychluje. [1]

Pro ověření, zda během simulace nedochází ke stárnutí vyvolanému pouze zvýšenou teplotou (termické stárnutí), byl proveden následující test. Uspořádání zkoušky bylo nastaveno stejně, jako je popsáno výše, jen místo oxidačního činidla byl do prostoru triaxiální komory vháněn dusík. Tím bylo zamezeno oxidativnímu stárnutí. Simulace

probíhala po dobu 4 dnů při teplotě 75°C. Pro ověření výsledků byl na zkušebních vzorcích změřen modul tuhosti před a po procesu stárnutí. Pokud by došlo k termickému stárnutí, modul tuhosti by vzrostl. Výsledky tohoto testu ukázaly, že k termickému stárnutí směsi nedošlo, protože hodnoty modulu tuhosti směsi před a po stárnutí byly srovnatelné. Tím se prokázalo, že u vídeňské metody dochází opravdu převážně k požadovanému oxidativnímu stárnutí. [9]

Výhodou této metody je, že se zkušební tělesa díky působení tlaku v triaxiální komoře nedeformují. Navíc působením všesměrného tlaku také dochází k rovnoměrnému stárnutí směsi. Velké plus této metody je i to, že lze jednoduše nastavit teplotu v klimatizační komoře, délku trvání, ale také koncentraci oxidačního činidla, což velmi dobře umožňuje přizpůsobení se reálným podmínkám stárnutí in-situ, které vždy závisí na klimatických a geografických podmínkách daného místa. [1]

### 3.2.1.2 PAV – Pressure Aging Vessel

Tato metoda vychází z platné normy ČSN EN 14769, která využívá přístroj PAV pro simulaci dlouhodobého stárnutí asfaltových pojiv. Uplatnění přístroje PAV je také uvedeno v evropské normě prEN 12697-52, kde se používá pro urychlení simulace dlouhodobého stárnutí volně ložené směsi. [10]



Obrázek 5: Těleso zajištěné proti nežádoucí deformaci [10]



Obrázek 6: Zdeformované těleso

U této metody se ztuhnutá tělesa uloží do přístroje PAV na dobu 20 hodin, při teplotě 85°C a tlaku 2,1 MPa. Bylo však zjištěno, že se tělesa díky působení tlaku a vyšší teploty v přístroji deformují (obr. 6). Proto je důležité zkušební tělesa nejprve obalit ocelovou sítí, která se zajistí montážními páskami (obr. 5). Takto připravená tělesa se uloží do

nástavce a v něm vloží do přístroje PAV (obr. 7). Po dosažení požadované teploty temperování (85°C) se postupně zvyšuje tlak na 2,1 MPa. Při tomto tlaku a teplotě probíhá simulace stárnutí 20 hodin.



Obrázek 7: Přístroj PAV

Výhodou této metody je její rychlost, ale také to, že díky zvýšenému tlaku dochází k rovnoměrnému stárnutí asfaltových těles. Nevýhodou je zde složitější příprava zkušebních těles (obalení ocelovou sítkou a stažení montážní pásky), bez které by se tělesa působením vyšší teploty a tlaku deformovala.

Obě uvedené metody jsou výsledkem snahy vyvíjet laboratorní simulace stárnutí tak, aby došlo mimo jiné i k úspoře času samotného umělého procesu stárnutí, což vede k ekonomickým úsporám.

### 3.3 Tuhost asfaltových směsí

Tuhost (modul tuhosti) je jedna ze základních charakteristik, která nás u asfaltové směsi zajímá. Čím tužší směs je, tím lépe roznáší zatížení a odolává vzniku deformací v podobě vyjetých kolejí. O tom, jakou bude mít směs tuhost, rozhoduje nejen typ použitého asfaltového pojiva, ale také jeho procentuální zastoupení ve směsi. Vliv může mít i použitý typ kameniva. Velmi důležité je zmínit to, že tuhost směsi by měla být vždy vztažena k dané zkušební teplotě. Asfaltové pojivo je totiž materiál, který se vyznačuje velkou teplotní citlivostí. Při nízkých teplotách se chová jako pružná látka, ale za vysokých teplot se jedná spíše o kapalinu, která je charakterizována svou viskozitou. Je to tedy materiál viskoelastický.

#### 3.3.1 Modul tuhosti

Modul tuhosti  $E$  vyjadřuje závislost mezi namáháním (napětím  $\sigma$ ) a tomu odpovídajícím přetvořením (deformací  $\varepsilon$ ).

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$$

Obrázek 8: Základní vzorec modulu tuhosti

Můžeme rozlišovat komplexní modul tuhosti lineárně viskoelastického materiálu, kdy je zkušební těleso vystavováno harmonickému (sinusovému) zatížení v čase  $t$  (např.  $\sigma \cdot \sin(\omega \cdot t)$ ), jehož výsledkem je poté poměrné přetvoření  $\varepsilon \cdot \sin(\omega \cdot (t - \phi))$ , které má posun o fázový úhel  $\phi$  v porovnání s průběhem napětí a sečný modul. Sečný modul je vztah mezi napětím a přetvořením po dobu zatěžování v čase  $t$ , kdy je těleso zatěžováno konstantním přetvořením. [11]

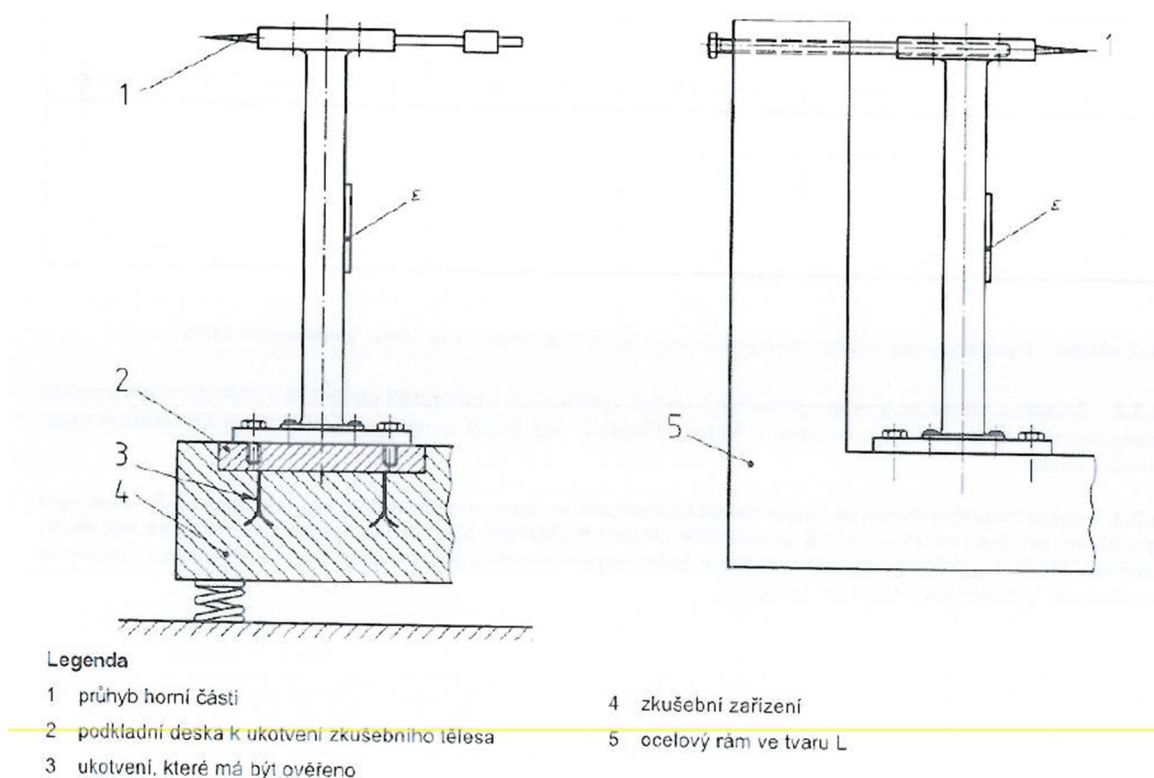
#### 3.3.2 Metody pro stanovení tuhosti směsi

V České republice je platná norma ČSN EN 12697 – 26 – Asfaltové směsi – Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka – Část 26: Tuhost. Jak bylo zmíněno, hodnota modulu tuhosti by měla být vždy vztažena ke zkušební teplotě. Norma udává, že zkušební tělesa musí být před samotnou zkouškou uložena do klimatizované komory po dobu nejméně 4 hodin, aby došlo k jejich správnému vytemperování na zkušební teplotu. Rozměry zkušebních těles musí být stanoveny dle normy ČSN EN 12697 – 29 [12].

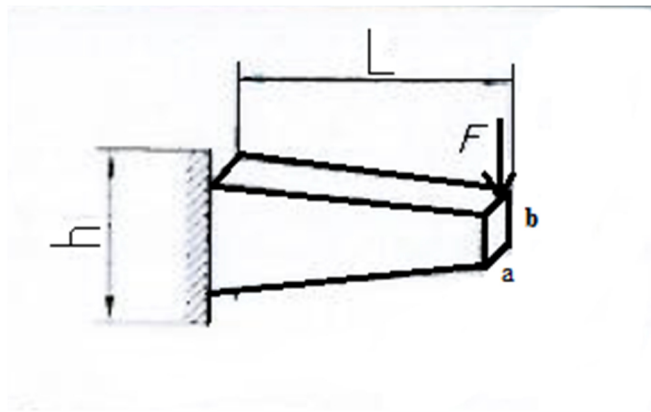
V následujícím textu bude stručně popsáno 6 zkušebních metod pro stanovení modulu tuhosti, které jsou uvedeny v normě.

### 3.3.2.1 Dvoubodová zkouška ohybem na vetknutém komolém klínu (2PB-TR) nebo na tělesech tvaru trámečku (2PB-PR)

Při této zkušební metodě je těleso přilepeno spodní základnou k podkladní desce upevněné na pevném ocelovém rámu (obr. č. 9). Na volný konec poté působí sinusová síla  $F$  nebo sinusový průhyb  $z$  takový, aby přetvoření v nejvíce namáhané části zkušební vzorku bylo  $\varepsilon \leq 50 \cdot 10^{-6}$ . Komplexní modul tuhosti při různých teplotách a frekvencích je poté možno spočítat pomocí síly, přetvoření a fázového úhlu  $\phi$ . Zkušební zařízení musí umožnit vyvodit při frekvencích 3 – 30 Hz na vrcholu zkušebního tělesa sinusový dynamický průhyb. [11] Stručné schématické uspořádání zatížení zkušebního tělesa je na obrázku č. 10.



Obrázek 9: Ověření ukotvení [11]

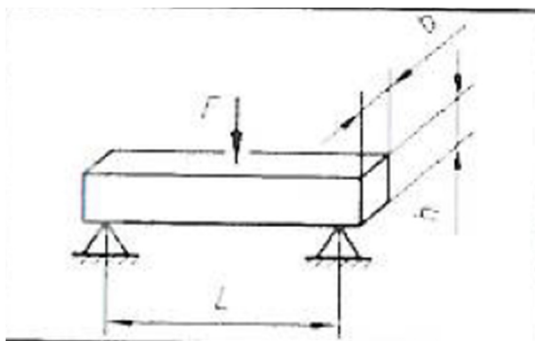


Obrázek 10: Stručné schéma zkoušky 2PB-TR [11]

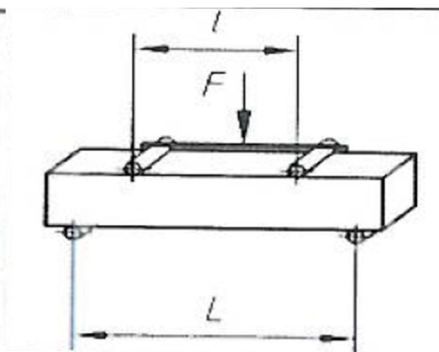
Postup je takový, že na volný konec tělesa působí harmonická (sinusová) síla požadované frekvence s tolerancí  $\pm 5\%$  po dobu min. 30 sekund a max. 2 minuty. Průhyb musí odpovídat přetvoření  $\varepsilon$  menšímu než již zmíněných 50 mikrostrain. Síla, průhyb i fázový úhel jsou zaznamenány po dobu posledních 10 sekund zkoušky. [11]

### 3.3.2.2 Zkouška tříbodovým ohybem (3PB-PR) nebo čtyřbodovým ohybem (4PB-PR) na tělesech tvaru trámečku

Během této zkoušky je zkušební těleso ve tvaru trámečku uloženo tak, aby všechny jeho podpěrné či zatěžovací body umožňovaly rotaci a horizontální posun. Těleso je vystavováno opakovanému ohybu pomocí středního zatěžovacího bodu (bodů v případě 4 PB) ve vertikálním směru a zároveň kolmo na podélnou osu tělesa. Vertikální posun dvou koncových bodů je nulový. Modul tuhosti se vypočítá ze síly potřebné k deformaci tělesa a fázového zpoždění mezi signálem síly a výchylky. Obě tyto veličiny (síla a fázové zpoždění) jsou měřeny jako funkce času. Na obrázku č. 11 a 12 je znázorněné schematické uspořádání zkoušek. [11]

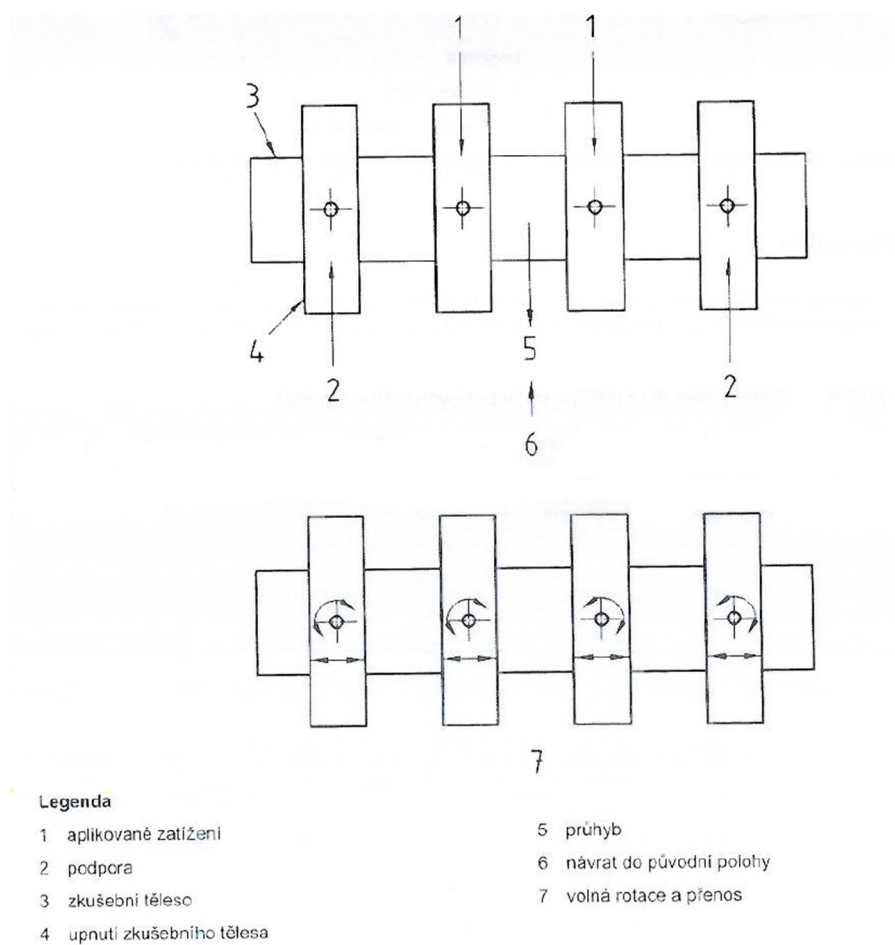


Obrázek 11: Schéma 3PB-PR



Obrázek 12: Schéma 4PB-PR

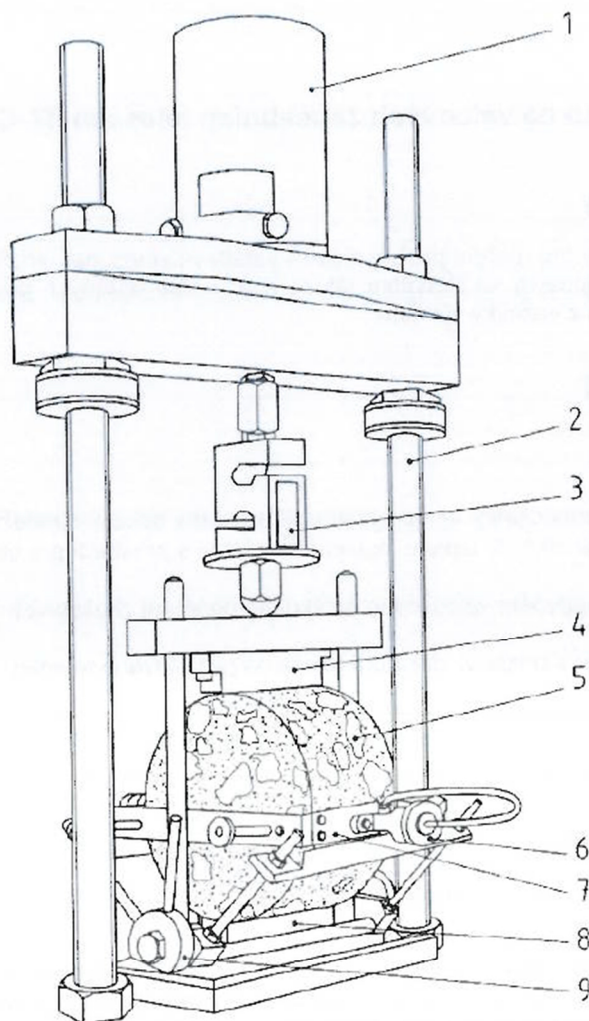
Zkušební těleso by mělo být upevněno v poloze otočené o 90° kolem své podélné osy vzhledem k jeho poloze v desce, ze které je trámeček získaný. Na těleso působí sinusová síla tak, aby byla dosažena požadovaná amplituda přetvoření ( $50 \pm 3$  mikrostrain). Zaznamenává se síla, průhyb, fázový úhel, zkušební teplota a frekvence. Modul tuhosti se stanovuje nejčastěji jako počáteční modul tuhosti a to v cyklu zatížení mezi 45. a 100. opakovaným zatížením, kdy jsou parametry jako např. amplituda přetvoření v daném cyklu konstantní. [11]



Obrázek 13: Princip zkoušky 4PB-PR

### 3.3.2.3 Zkouška v příčném tahu na válcových zkušebních tělesech (IT-CY)

Tato metoda je jednou z nejběžnějších pro zjištění modulu tuhosti asfaltových směsí. Provádí se na tělesech tvaru válce s odlišnými průměry a tloušťkami. Geometrické parametry (tloušťka tělesa) jsou poté součástí výpočtu hodnoty modulu tuhosti společně s naměřenou maximální hodnotou svislého zatížení a Poissonovým číslem, které je různé pro různé zkušební teploty. Na obrázku 14 je uspořádání této zkoušky.



#### Legenda

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

**Obrázek 14: Zkouška IT-CY [11]**

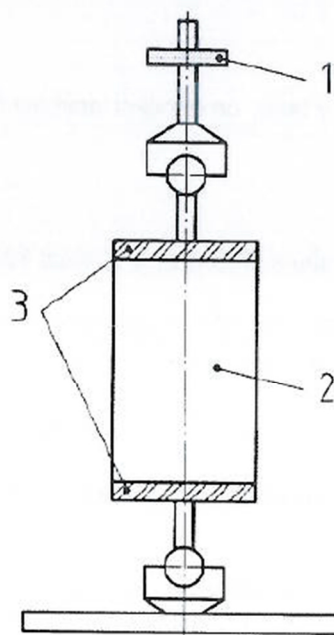
Postup zkoušky je takový, že se zkušební těleso umístí do kovového rámečku na spodní zatěžovací pás a upne se na stranách pomocí šroubů. Na těleso se vloží horní zatěžovací pás a soustava se vloží pod zatěžovací trn. Ten se přiblíží k hornímu zatěžovacímu pásu. Pomocí počítačového programu se zkontroluje kontakt obou snímačů posunu a tím je těleso připraveno ke zkoušení. V programu se nastaví teplota zkoušení a té odpovídající Poissonovo číslo, výška a průměr tělesa a spustí se zkouška. Nejprve proběhne 10 zkušebních měření, aby se ustálila síla, potřebná k vyvolání předepsané deformace.



Během těchto 10 měření také sledujeme tvar křivky zatěžovacího pulzu. Pokud odpovídá tvaru podle normy, je vše v pořádku a test může pokračovat. Spustí se 5 zaznamenávaných měření a zaznamená se průměrná hodnota modulu tuhosti z těchto pěti měření. Poté se těleso otočí o zhruba 90° okolo horizontální osy a provede se druhé měření. Výsledný modul tuhosti tělesa je průměrem hodnot ve dvou na sebe kolmých směrech, pokud je hodnota z druhého měření v rozmezí +10 % až -20 %.<sup>1</sup>

### 3.3.2.4 Zkouška jednoosým tahem a tlakem na válcových zkušebních tělesech (DTC-CY)

Zkušební těleso ve tvaru válce je přilepené na dvě ocelové desky, které jsou přilepené k zatěžovacímu zařízení. Na takto upevněné těleso je vyvozováno sinusové přetvoření, jehož amplituda má být menší nebo rovna  $25 \cdot 10^{-6}$ . Tato hodnota nemá být překročena, aby docházelo k namáhání asfaltových směsí v lineární oblasti. Komplexní modul při různých teplotách a frekvencích se vypočte z naměřené síly a fázového úhlu. Schéma zkoušky je na obrázku č. 15. [11]



#### Legenda

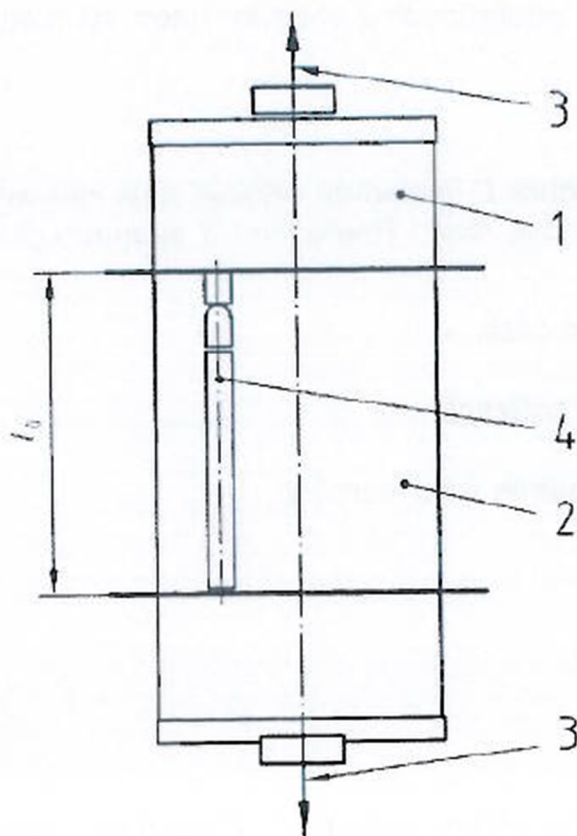
- 1 snímač síly
- 2 zkušební těleso
- 3 nalepené ocelové desky

Obrázek 15: Schéma upevnění zkoušky DTC-CY [11]

<sup>1</sup> Převzato z bakalářské práce [22]

### 3.3.2.5 Zkouška v přímém tahu na válcových zkušebních tělesech (DT-CY) nebo na tělesech tvaru trámečku (DT-PR)

Zkušební těleso je vystavováno jednoosému zatížení v tahu při daných teplotách a dobách zatěžování dle zákona o monotónním zatěžování a nárůstu poměrné deformace.



#### Legenda

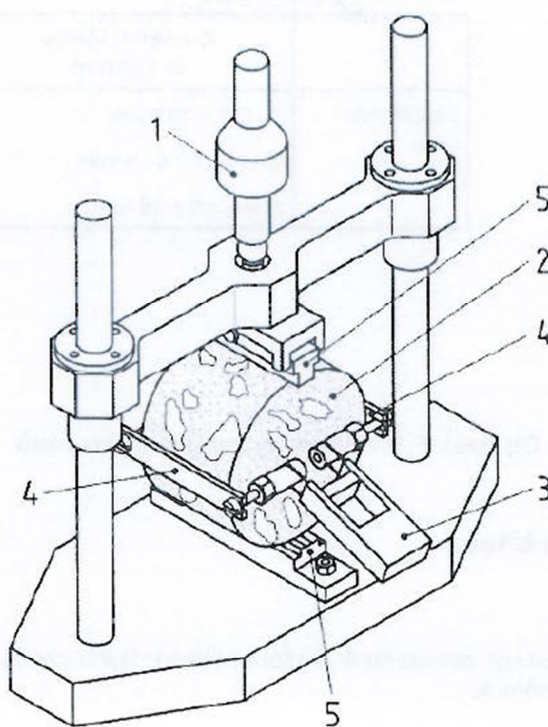
- |                 |                         |
|-----------------|-------------------------|
| 1 vzorek        | 4 snímač (jeden ze tří) |
| 2 oblast měření |                         |
| 3 síla          |                         |

Obrázek 16: Podstat zkoušky DT-CY [11]

Zkušební tělesa jsou osazena do zkušebního zařízení, přičemž se vyvodí zatížení, které nesmí překročit 100 N. Poté jsou tělesa ponechána bez působení napětí nejméně 30 minut. Samotná zkouška tělesa je definovaná zkušební teplotou, úrovní relativní deformace a dobou zatěžování. Zkouška se provede při napětí působícím pro danou dobu zatěžování odpovídající stanovené deformaci. Z výsledků měření se poté sestaví hlavní křivka závislosti modulu tuhosti na době zatěžování pro danou teplotu.

### 3.3.2.6 Zkouška opakovaným namáháním v příčném tahu na válcových zkušebních tělesech (CIT-CY)

Při této metodě je těleso opakovaně namáháno v příčném tahu sinusovým zatížením. Uspořádáním a průběhem je zkouška podobná metodě IT-CY. Během zkoušky je těleso zatěžováno konstantní silou s různými zatěžovacími frekvencemi. Dle použité frekvence zatěžování je potřeba provést daný počet zatěžovacích cyklů. Spektrum frekvencí a tomu odpovídající počet cyklů je uveden v normě. [11]



#### Legenda

- 1 zatěžovací píst
- 2 zkušební těleso
- 3 extenzometr
- 4 deformační pásek
- 5 zatěžovací pásy

Obrázek 17: Schéma uspořádání zkoušky CIT-CY [11]

Z výsledků měření je poté stejně jako u předešlé metody sestavena hlavní křivka, která má sloužit ke stanovení modulu tuhosti pro libovolnou kombinaci zatěžovací frekvence a zkušební teploty. [11]

### 3.3.3 Vliv stárnutí asfaltové směsi na její modul tuhosti

Jak již bylo zmíněno, stárnutí asfaltové směsi (potažmo asfaltového pojiva) má na její tuhost nezanedbatelný účinek. Během procesu stárnutí dochází k navyšování tuhosti směsi, ale také k jejímu křehnutí. To má za následek větší náchylnost směsi ke vzniku trhlin nejen způsobených výkyvy teplot, ale také únavových.

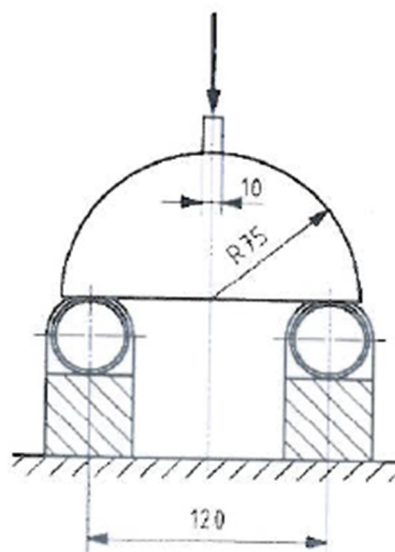
V praktické části této práce bude snahou zjistit a dát do souvislosti, jak velký význam má například typ použitého pojiva či typ asfaltové směsi na to, jak moc proces stárnutí tuhost směsi změní.

## 3.4 Odolnost asfaltových směsí vůči šíření trhliny – zkouška ohybem na půlválcovém tělese

Další důležitou vlastností sledovanou u asfaltových směsí je odolnost vůči šíření trhliny charakterizovaná odolností vůči lomu (nebo také lomovou houževnatostí). Běžně se tato vlastnost řadí do nízkoteplotních vlastností asfaltové směsi, protože zkouška probíhá nejčastěji při 0°C až -10°C, kdy je asfaltové pojivo vlivem nízké teploty tuhé a křehké. Zkouškou odolnosti vůči lomu se v ČR zabývá norma ČSN EN 12697 – 44: Šíření trhliny zkouškou ohybem na půlválcovém tělese.

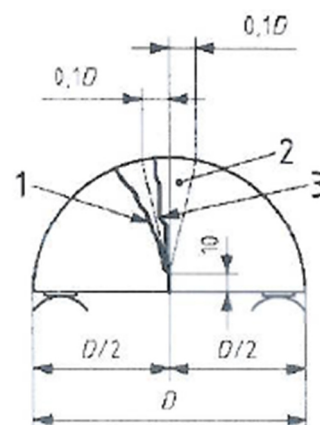
### 3.4.1 Zkouška šíření trhliny na půlválcovém tělese dle ČSN EN 12697 – 44

Podstatou zkoušky je zatížení půlválcového tělesa ohybem ve třech bodech tak, aby byl střed spodního líce zkušební tělesa vystaven napětí v tahu (obr. 18). Zatěžování probíhá konstantní rychlostí 5 mm/min. Během zatěžování je sledována zatěžovací síla a vyvolaná svislá deformace. Zaznamenává se maximální hodnota síly  $F_{max}$  s přesností na 1 N a jí odpovídající svislá deformace s přesností na 0,01 mm. Síla  $F_{max}$  odpovídá síle potřebné ke vzniku a následnému šíření trhliny na půlválcovém tělese. Tělesa mají uprostřed spodního líce vyříznutou drážku, která definuje místo vzniku trhliny. [13]



Obrázek 18: Schéma zkoušky šíření trhliny na půlválcovém tělese [13]

Aby byla zkouška považovaná za platnou, musí být vzniklá trhlina v oblasti  $\pm 10\%$  průměru zkušebního tělesa od středu zatěžovacího pásku (obr. 19). Pokud je trhlina mimo tuto oblast, měl by být výsledek vyloučen a mělo by být zkoušeno jiné těleso. Pro určení platnosti zkoušky může být použito pomocné doplňkové zařízení, ve kterém je vyříznuta výseč pro rychlé určení, zda je trhlina v platné oblasti.



LEGENDA:

- 1 neplatná zkouška
- 2 oblast platnosti zkoušky
- 3 platná zkouška

Obrázek 19: Oblast platnosti zkoušky

Z naměřených výsledků se poté spočítá přetvoření  $\varepsilon_{\max}$  jako poměr maximální naměřené

svislé deformace a výšky zhuštěného zkušebního tělesa. Dále se stanoví maximální napětí při porušení  $\sigma_{\max}$ , závislé na maximální naměřené síle, průměru a tloušťce zkušebního tělesa. Nakonec je stanovena odolnost vůči lomu  $K_{ic,i}$ . Ta je závislá na maximálním napětí při porušení, výšce zkušebního tělesa a hloubce drážky zkušebního tělesa. Výška tělesa a hloubka drážky se do výpočtu promítnou pomocí tzv. geometrického faktoru  $f$ . Vzorec pro výpočet odolnosti vůči lomu pro jednotlivá zkušební tělesa je pak  $K_{ic,i} = \sigma_{\max, i} * f_i$ . Výsledná hodnota odolnosti vůči lomu pro danou směs je prostým průměrem naměřených hodnot pro jednotlivá tělesa.

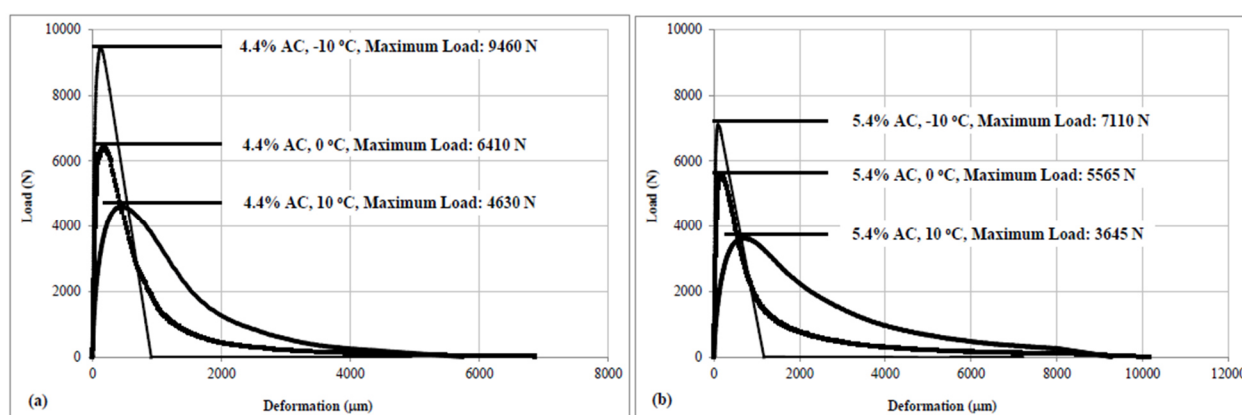
### 3.4.2 Další využití zkoušky ohybem na půlválcových tělesech – zahraniční zkušenosti

Využití tzv. SCB metody (Semi Circular Bend test – zkouška ohybem na půlválcovém tělese) bylo zkoumáno již v mnoha výzkumných projektech. Zkouška je zajímavá zejména díky své jednoduchosti, efektivitě a opakovatelnosti.

Ve studii z roku 1997 [14] se objevilo využití metody SCB nejen pro získání hodnot odolnosti vůči lomu (lomové houževnatosti)  $K_{ic}$ , ale také pro zjištění pevnosti v tahu asfaltové směsi. Bylo zjištěno, že oproti jiným metodám pro zjištění pevnosti v tahu se výsledky příliš neliší a tato metoda je tedy také jednou z možností, jak tuto vlastnost asfaltové směsi zkoumat. Ověření použitelnosti metody z hlediska napjatosti zkušebních těles bylo provedeno pomocí výpočtů metodou konečných prvků.

V roce 2004 se ve výzkumném projektu [15] zkoumalo využití metody SCB pro zjištění lomové energie<sup>2</sup> u tří asfaltových směsí. Použité kamenivo, obsah pojiva i výsledná mezerovitost směsi byla shodná. Směsi se od sebe lišily pouze gradací asfaltového pojiva. Zkouška byla provedena při teplotách -30°C a -40°C. Vyhodnocením zkoušky byly získány hodnoty tuhosti, lomové houževnatosti a lomové energie. Výsledky ukázaly, že typ použitého pojiva ovlivnil zejména hodnoty lomové houževnatosti a energie.

V roce 2012 následovala další studie zaměřená na využití metody SCB pro zjištění lomové houževnatosti a energie [16]. Tentokrát byly zkoušeny dvě asfaltové směsi s obsahem 4,4 % pojiva a 5,4 % pojiva. Test byl proveden při zkušební teplotě 10°C (teplota typická pro zkoušení únavových charakteristik ve Švédsku), 0°C a -10°C a zatěžování proběhlo rychlostí 1mm/min. Předpokladem a jistou vizí tohoto projektu byla možnost využití metody SCB pro zhodnocení únavových charakteristik asfaltových směsí a použití metody jako jeden z možných indikátorů zbytkové životnosti konstrukce netuhé asfaltové vozovky během její návrhové životnosti. Výsledky ukázaly, že směs s vyšším obsahem pojiva dosahovala nižších hodnot lomové houževnatosti, což přeneseně znamená nižší odolnost vůči vysokému dopravnímu zatížení. Nicméně právě směs s vyšším obsahem pojiva se ukázala jako odolnější z hlediska získaných hodnot lomové energie. Směs s nižším obsahem pojiva je dle této studie křehčí a tím pádem náchylnější ke vzniku únavových trhlin. Na obrázku 20 je znázorněn záznam vývoje svislé deformace a zatížení během zkoušky SCB.



Obrázek 20: Závislost svislé deformace ve směru zatížení a aplikovaného zatížení (směs s 4,4 % pojiva vlevo, směs s 5,4 % pojiva vpravo) [16]

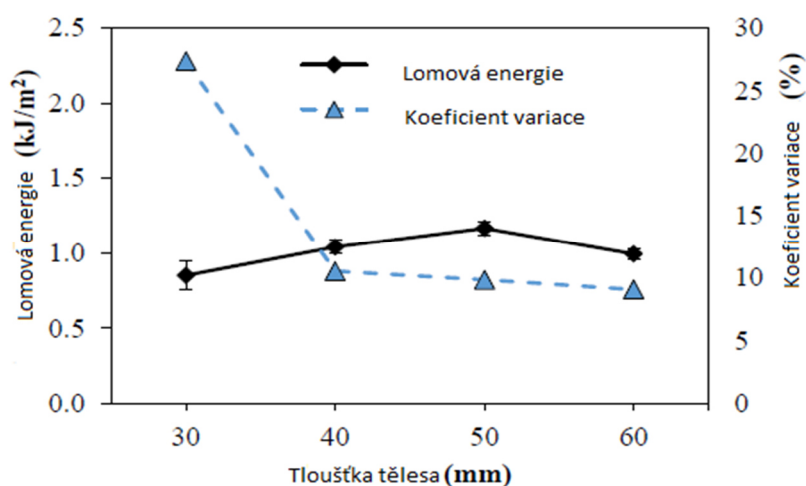
<sup>2</sup> Více o lomové energii v kapitole 3.4.3

### 3.4.2.1 Vliv vybraných parametrů na výsledky SCB testu

Jak je patrné z obrázku 20, velký vliv na výsledky této zkoušky má zkušební teplota. To, jakým způsobem mohou výsledky zkoušky ovlivnit další vybrané parametry, bylo ověřováno v disertační práci studenta G. Nsengiyumva z univerzity v Nebrasce [17]. V této práci bylo cílem zjistit minimální počet zkušebních těles, jejich optimální tloušťku, hloubku vyříznuté drážky (viz str. 26), rychlost zatěžování a zkušební teplotu pro co nejpřesnější a nejvíce odpovídající výsledky s co nejmenším variačním koeficientem (tzn. s malým rozptylem naměřených hodnot v rámci měření s konstantními parametry). Zkouška probíhala opakovaně tak, že vždy čtyři z pěti parametrů zůstávaly konstantní, pátý byl proměnný a byla sledována změna získaných výsledků v závislosti na sledovaném proměnném parametru. Vyhodnocovanou vlastností asfaltová směs byla hodnota lomové energie.

Jako optimální počet pro získání kvalitních výsledků měření bylo statistickou analýzou zjištěno 5-6 zkušebních těles. Nutno dodat, že celkově byla tato analýza provedena pro 18 zkušebních těles. Při počtu 5-6 těles už však byly výsledky dostatečně shodné a tím pádem byl tento počet vyhodnocen jako spolehlivý. S vyšším počtem zkušebních těles se již celkový výsledek měření téměř nezměnil.

Další sledovaný parametr byla tloušťka zkušebního tělesa. Byly zkoušeny 4 různé rozměry a to 30 mm, 40 mm, 50 mm a 60 mm. Výsledky ukázaly (obr. 21), že s rostoucí tloušťkou zkušebního tělesa klesá koeficient variace, tzn. výsledky jsou přesnější.



Obrázek 21: Vliv tloušťky tělesa na výsledky SCB testu [17]

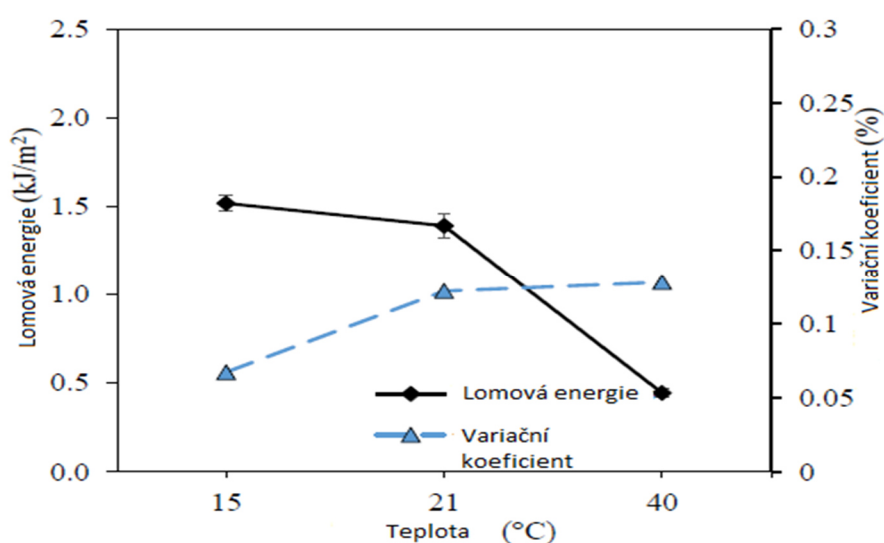
Zároveň bylo zjištěno, že při tloušťce 50 mm byla naměřená největší hodnota lomové energie. Tato tloušťka byla použita pro sledování dalších parametrů.

Dále byla sledována různá hloubka drážky (0 – 40 mm) na spodní ploché straně zkušebního tělesa. Jako optimální byla vyhodnocena hloubka 15 mm.

Z hlediska rychlosti zatěžování byly zvoleny hodnoty 0,1;0,5;1;5;10 mm/min. Zkušební teplota byla 21°C. Ukázalo se, že při rychlejším zatěžování je dosaženo vyšších hodnot maximálního zatížení při porušení, ale hodnoty lomové energie jsou téměř srovnatelné při všech pěti zatěžovacích rychlostech. Nejlepší shody bylo dosaženo pro zatěžovací rychlost 1 a 5 mm/min. Také je nutné zmínit, že u všech rychlostí byl variační koeficient příznivě nízký. Jako optimální rychlost zatěžování byla nakonec stanovena hodnota 5mm/min.

Pátým sledovaným parametrem byla zkušební teplota. Ostatní parametry byly vybrány s ohledem na předešlé závěry (6 zkušebních těles tloušťky 50 mm, hloubka drážky 15mm, zatěžovací rychlost 5 mm/min). Zkouška probíhala při teplotách 15°C,21°C a 40°C. Porovnání hodnot lomové energie a variačního koeficientu je na obr. 22.

Jako nejlepší se zde ukázala zkušební teplota 15°C, při které byl variační koeficient nejnižší a hodnoty lomové energie nejvyšší. V práci je však uvedeno, že jako velmi dobře použitelná je i teplota 21°C. Tato teplota je totiž nejbližší pokojovým teplotám. To znamená, že tělesa nemusí být dlouho před zkouškou temperována v klimatické komoře.



Obrázek 22: Vliv teploty na hodnoty lomové energie a variační koeficient [17]



Výsledkem práce je poté tabulka 1, ve které jsou shrnuta doporučení k vybraným parametrům při použití zkoušky SCB pro získání hodnot lomové energie asfaltových směsí. V závěru práce je poté uvedeno, že tato metoda bude dále zkoumána pro její možné využití při stanovení odolnosti vůči únavovým trhlinám asfaltových směsí. To odpovídá závěrům ze studie [16] z roku 2012. [17]

Tabulka 1: Doporučené parametry [17]

Parametr zkoušky	Doporučená hodnota
Tloušťka tělesa (mm)	40-50
Hloubka drážky (mm)	5-15
Zatěžovací rychlost (mm/min)	1-5
Zkušební teplota (°C)	15-40
Počet zkuš.těles	5-6

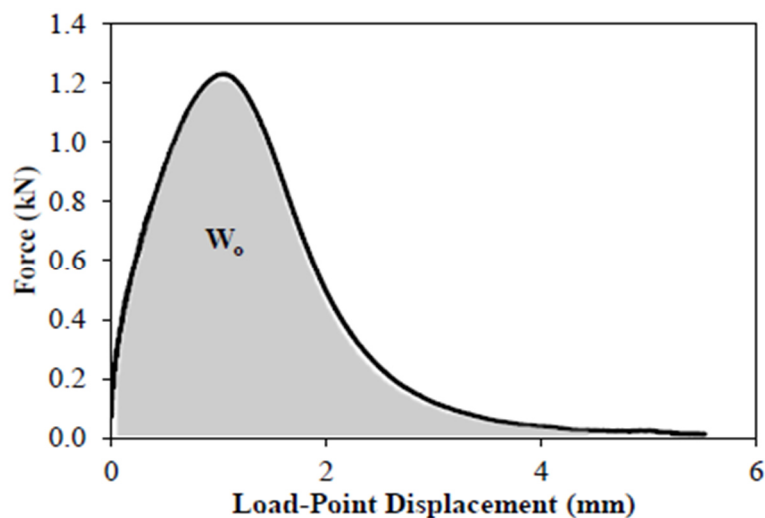
### 3.4.3 Lomová energie

V předešlém textu byl často používán pojem lomová energie. V následujícím textu bude tento pojem stručně vysvětlen a uveden do kontextu.

Pojem lomová energie je stejně jako lomová houževnatost (odolnost vůči lomu) pojmem z lomové mechaniky. Lomová mechanika je důležitým oborem, který se zabývá například podmínkami vzniku a šíření trhlin při namáhání různých materiálů.

Lomová energie je zjednodušeně energie potřebná ke vzniku trhliny, tudíž je to energie potřebná k vytvoření dvou nových povrchů. Jinak se dá lomová energie definovat také jako práce potřebná ke zvětšení povrchu vznikající trhliny. [16]

Jak již bylo uvedeno, hodnotu lomové energie lze získat také pomocí SCB testu. Průběh zkoušky je obdobný jako při stanovení odolnosti vůči lomu. Důležité však je, aby měřicí zařízení bylo schopné zaznamenávat průběh svislé deformace v závislosti na aplikovaném zatížení. Ze záznamu vznikne graf (obr. 23), ze kterého je možné vypočítat práci působícího zatížení jakožto obsah plochy pod křivkou.



Obrázek 23: Plocha pod křivkou = práce působícího zatížení [17]

Lomová energie je poté vypočítána jako podíl této práce a plochy vzniklé trhliny. Plocha trhliny je  $A = t \cdot (r - c)$ , kde  $t$  je tloušťka tělesa,  $r$  je poloměr tělesa a  $c$  je hloubka drážky.

Čím vyšší hodnoty lomové energie materiál dosáhne, tím je odolnější vůči vzniku a následnému šíření trhliny. [18]

#### 3.4.3.1 Lomová houževnatost a lomová energie

Hodnota lomové houževnatosti (odolnosti vůči lomu) udává hodnotu maximálního možného zatížení (respektive maximální přípustnou hodnotu napětí) před vznikem trhliny a jejím následujícím šířením. Hodnota lomové energie v sobě zahrnuje i chování materiálu po vzniku trhliny a během jejího šíření až do úplného kolapsu.

Obě tyto vlastnosti mohou být použity při porovnávání asfaltových směsí z hlediska zvýšené odolnosti vůči vzniku trhlin. [18]

V praktické části práce bude stanovena a porovnávána lomová houževnatost ( $K_{Ic}$ ) pro různě zestárlé či nezestárlé asfaltové směsi.

## 4 PRAKTICKÉ OVĚŘENÍ POZNATKŮ O STÁRNUTÍ NA VYBRANÝCH ASFALTOVÝCH SMĚSÍCH

Tato část práce bude věnována zejména ověřování účinků stárnutí na tuhost a odolnost vůči lomu vybraných asfaltových směsí. Zkoušené směsi byly převážně (kromě dvou) vyrobeny na obalovně. To znamená, že se jedná o směsi reálně použité v konstrukcích a nikoliv směsi laboratorně připravené a optimalizované pro účely zkoušek. U některých směsí bylo k dispozici více podrobnějších informací o jejich složení, včetně přesného typu použitého asfaltového pojiva, u jiných však jen základní označení směsi.

### 4.1 Použité asfaltové směsi

Pro účely této práce byly použity směsi jak pro obrusné, ložní, tak i podkladní asfaltové vrstvy. První dvě směsi byly vyrobeny přímo v laboratoři. Jedná se o směsi SMA a VMT. Směs SMA (asfaltový koberec mastixový) je používána v obrusných vrstvách vozovek s vysokým dopravním zatížením. Vyznačuje se zvýšenou odolností vůči vzniku trvalých deformací a odolností vůči vzniku mrazových trhlin. Tato konkrétní směs má označení SMA 11 50/70, což znamená, že jde o směs, ve které je použito kamenivo, jehož největší zrna jsou průměru 11 mm a jako pojivo je použit silniční asfalt 50/70. Číslo 50/70 značí desetinasobek hodnoty penetrace jehlou v mm při 25°C, v tomto případě tedy 5 – 7 mm. Směs VMT je naopak používána do ložních a podkladních vrstev. Jedná se o směs s vysokým modulem tuhosti, které se používají také do vozovek s vysokým dopravním zatížením. Vyznačují se odolností vůči vzniku trvalých deformací v podobě vyjetých kolejí, odolností vůči působení vody a mohou příznivě ovlivňovat životnost vozovky. Zde použitá směs má označení VMT 22 30/45. Význam symbolů v označení je stejný, jako u první směsi, tedy kamenivo s největším zrnem 22 mm a silniční asfalt s penetrací 3 – 4,5 mm. Od obou těchto směsí bylo k dispozici 15 zkušebních těles.

Další použité směsi byly vyrobeny v obalovně. Prvních šest z nich jsou směsi ACO, které jsou používány do obrusných vrstev asfaltových vozovek. První z nich je směs ACO11S PmB 45/80-65. Písmeno S značí u směsi zvýšenou odolnost vůči trvalým deformacím a vyšší tuhost. Jsou to směsi používané do vozovek s vysokým dopravním

zatížením. PmB značí polymerem modifikovaný asfalt, zde konkrétně s penetrací 4,5 - 8 mm. Číslo za pomlčkou označuje hodnotu bodu měknutí asfaltového pojiva ve stupních Celsia. Zde tedy 65°C. Další směsí je ACO11S PmB 45/80-55. Jediný rozdíl je tedy pouze v bodu měknutí použitého asfaltového pojiva, zde 55°C. Další dvě směsi mají shodné označení ACO11S PmB. Asfaltové pojivo je bez dalšího konkrétního označení. Dále byla použita směs ACO16S PmB. U této směsi byla použita větší frakce kameniva s největším zrnem průměru 16 mm. Poslední směsí typu ACO byla ACO11+. U této směsi nebyl k dispozici typ použitého pojiva. Znak + za označením směsi nahrazuje dřívější označení směsi pro kvalitativní třídu I. Tyto směsi se používají pro méně zatížené vozovky, kde není třeba využít směs s označením S (pro velmi vysoké dopravní zatížení).

Dalších 9 zkoušených směsí byly směsi ACL, tedy směsi používané pro ložní vrstvy asfaltových vozovek. První z nich byla směs ACL16S 50/70, tedy směs pro vysoké dopravní zatížení se silničním asfaltem 50/70. Druhá směs byla ACL16S PmB 25/55-55. Rozdílem oproti první ACL směsi je pouze typ použitého pojiva, v tomto případě polymerem modifikovaného s bodem měknutí 55°C. Třetí směsí byla ACL16S PmB 25/55-55+Forta FI. U této směsi byla navíc použita vlákna Forta FI. Ta by měla zvýšit odolnost směsi vůči vzniku trvalých deformací, ale také zlepšit chování směsi při nízkých teplotách (mrazové trhliny). Další zkoušenou směsí byla ACL16+ používaná do středně zatížených vozovek. U této směsi nebyly k dispozici bližší informace. Dále byla zkoušena směs ACL16R(REMIX), tedy směs recyklovaná. Další zkoušenou směsí byla ACL16S PmB 45/80-55, tedy další směs pro vysoké dopravní zatížení, tentokrát s jiným modifikovaným pojivem. Další dvě směsi byly ACL16+, obě bez specifikace použitého pojiva a obě pro využití ve středně zatížených vozovkových konstrukcích. Poslední ACL směsí byla ACL22S PmB.

K dispozici byly dále 3 směsi využívané zejména pro podkladní asfaltové vrstvy. První z nich byla směs ACP22+ s 50% recyklátu. Druhou směsí byla VMT22 s tvrdým silničním asfaltem 20/30 a třetí směs byla ACP22+ bez další bližší specifikace.

Přehled všech zkoušených směsí je v tabulce 2. V této tabulce jsou směsi roztríděny dle využití v konstrukci, je zde uveden název směsi a použité pojivo, objemová hmotnost směsi, mezerovitost a počet zkušebních těles, která byla k dispozici. Pro snazší pozdější orientaci v grafech a výsledcích je v tabulce také sloupec s označením směsí (A1-A7, B1-B9, C1-C4).

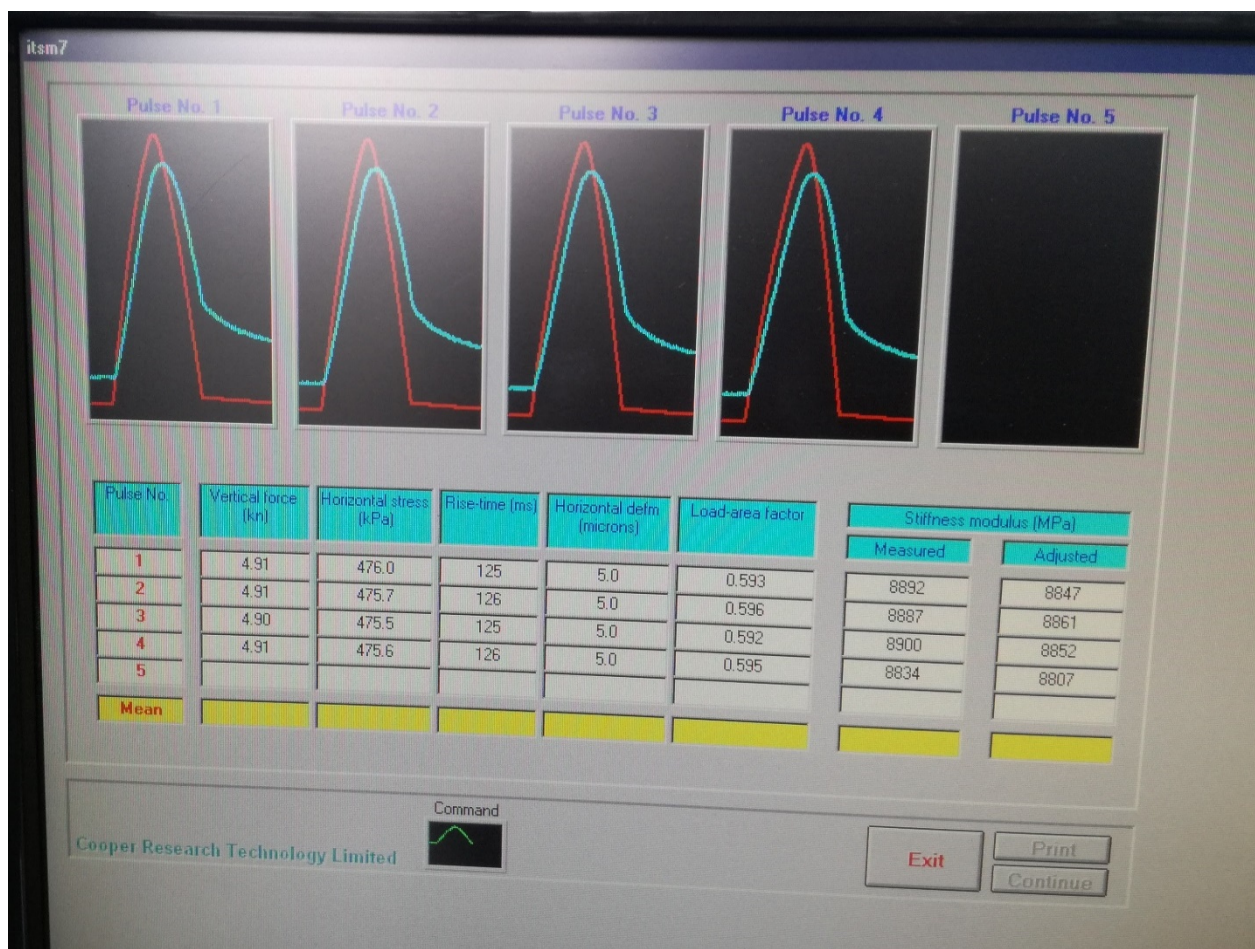
Tabulka 2: Přehled použitých směsí a jejich základních vlastností

Konstrukční vrstva	Směs	Pojivo	Označení	Objemová hmotnost [g*cm <sup>-3</sup> ]	Mezerovitost [%]	Počet těles
OBRUSNÁ	SMA 11	50/70	A1	2,481	4,0	15
	ACO11S	PmB 45/80-65	A2	2,419	2,1	6
	ACO11S	PmB 45/80-55	A3	2,408	4,9	4
	ACO11S	PmB	A4	2,403	2,8	3
	ACO11S	PmB	A5	2,391	3,2	4
	ACO16S	PmB	A6	2,408	4,1	4
	ACO11+		A7	2,463	3,6	3
LOŽNÍ	ACL 16S	50/70	B1	2,443	3,3	3
	ACL 16S	PmB 25/55-55	B2	2,433	3,4	3
	ACL 16S	PmB 25/55-55+Forta	B3	2,405	4,7	3
	ACL16+		B4	-	-	4
	ACL16R	REMIX	B5	2,413 - 2,457	1,37 - 3,08	7
	ACL16S	PmB 45/80-55	B6	2,477	3,2	8
	ACL16+		B7	2,427	3,4	4
	ACL16+		B8	2,493	5,1	4
	ACL22S	PmB	B9	2,373	7,4	4
PODKLADNÍ	VMT 22	30/45	C1	2,530	3,4	15
	ACP22+	50%RA	C2	2,360	8,1	3
	VMT 22	20/30	C3	2,378	3,1	6
	ACP22+		C4	2,433	9,7	3

Z tabulky je patrné, že u směsi B4 nebyla známa ani objemová hmotnost, ani mezerovitost. U směsi B5, což je směs recyklovaná, byla tělesa natolik nehomogenní, že se hodnota mezerovitosti i objemové hmotnosti pro jednotlivá tělesa výrazně liší. Z toho vyplývá, že výsledky u směsi B5 budou pravděpodobně velmi nejednotné a nespolehlivé, na což je potřeba při vyhodnocení pamatovat, aby nebyly odvozeny nepravdivé závěry.

## 4.2 Zkušební metody a postupy

Všechna zkušební tělesa byla nejdříve přeměřena, a to v souladu s normou ČSN EN 12697 – 29: Stanovení rozměrů asfaltových zkušebních těles [12]. Rozměry těles a podrobnější výsledky měření jsou uvedeny v příloze. Následně byl u všech zkušebních válcových těles stanoven modul tuhosti při zkušební teplotě 15°C. U některých těles byl stanoven modul tuhosti také při teplotách 0°C, 27°C a 40°C pro možnost pozdější podrobnější analýzy změn chování směsi v důsledku stárnutí. Dále byla tělesa rozříděna do skupin určených pro simulaci stárnutí, a to zejména dle počtu dostupných těles. U zestárlých těles byl opět měřen modul tuhosti při 15°C (u vybraných směsí opět i při teplotách 0°C, 27°C a 40°C). U některých směsí byla navíc zjišťována objemová hmotnost těles po stárnutí a následně vyhodnocena jejich mezerovitost. Poté byla tělesa rozřezána na půlválce, na kterých probíhala zkouška šíření trhliny ohybem.



Obrázek 24: Záznam průběhu měření modulu tuhosti

#### 4.2.1 Měření modulu tuhosti

Moduly tuhosti pro všechny směsi byly stanoveny v souladu s normou ČSN EN 12967 – 26:

Tuhost [11], a to zkouškou v příčném tahu na válcových tělesech. Princip zkoušky byl popsán v kapitole 3.3.2.3. Měřicí zařízení a názorné uspořádání zkoušky je na obrázku 25. Pro názornost je na obrázku 24 zobrazen výstup z programu při měření modulu tuhosti. Je zde vidět průběh 5 zaznamenávaných měření, včetně zatěžovacích křivek.



Obrázek 25: Zařízení pro měření modulu tuhosti

Základní zkušební teplota

byla zvolena 15°C. Při této teplotě byly stanoveny moduly tuhosti pro všechny směsi. Jak bylo zmíněno, u některých směsí byl stanoven modul tuhosti také při teplotách 0°C, 27°C a 40°C. Přehled je v tabulce 3.

Zkušební teplota 15°C je běžně používaná pro stanovení modulu tuhosti asfaltových směsí. Je to teplota běžně se vyskytující v asfaltovém souvrství. Zde byla zvolena také proto, že druhá sledovaná veličina odolnost vůči lomu byla na základě teoretických poznatků měřena právě při teplotě 15°C.

Ostatní zkušební teploty mohou posloužit k porovnání změn tuhosti směsi v závislosti na změně teploty. U všech směsí byl stanoven modul tuhosti pro uvedené teploty jak před stárnutím, tak i po něm.

Tabulka 3: Měření modulu tuhosti při různých teplotách

STANOVENÍ MODULU TUHOSTI PŘI TEPLOTĚ:						
Směs	Pojivo	Označení	0°C	15°C	27°C	40°C
SMA 11	50/70	A1	ANO	ANO	ANO	
ACO11S	PmB 45/80-65	A2		ANO		
ACO11S	PmB 45/80-55	A3		ANO		
ACO11S	PmB	A4		ANO		
ACO11S	PmB	A5		ANO		
ACO16S	PmB	A6		ANO		
ACO11+		A7		ANO		
ACL 16S	50/70	B1	ANO	ANO	ANO	ANO
ACL 16S	PmB	B2	ANO	ANO	ANO	ANO
ACL 16S	PmB+Forta	B3	ANO	ANO	ANO	ANO
ACL16+		B4	ANO	ANO	ANO	ANO
ACL16R	REMIX	B5		ANO		
ACL16S	PmB 45/80-55	B6		ANO		
ACL16+		B7		ANO		
ACL16+		B8		ANO		
ACL22S	PmB	B9		ANO		
VMT 22	30/45	C1	ANO	ANO	ANO	
ACP22+	50%RA	C2	ANO	ANO	ANO	ANO
VMT 22	20/30	C3	ANO	ANO	ANO	ANO
ACP22+		C4		ANO		



#### 4.2.2 Stárnutí asfaltových směsí

Zkušební asfaltová tělesa byla rozdělena do skupin určených pro různé druhy stárnutí, a to podle dostupného počtu (tabulka 4). Pokud byl počet těles dostatečný, nechala se některá tělesa úplně bez procesu stárnutí, nařezala se na půlválce a byla stanovena odolnost vůči lomu na nezestárlém tělese.

Tabulka 4: Přehled metod stárnutí u jednotlivých směsí

Směs	Pojivo	Označení	Počet těles	5d@85°C	10d@85°C	15d@85°C	PAV
SMA 11	50/70	A1	15	ANO	ANO	ANO	ANO
ACO11S	PmB 45/80-65	A2	6	ANO	ANO		
ACO11S	PmB 45/80-55	A3	4	ANO	ANO		
ACO11S	PmB	A4	3	ANO			
ACO11S	PmB	A5	4	ANO	ANO		
ACO16S	PmB	A6	4	ANO	ANO		
ACO11+		A7	3	ANO			
ACL 16S	50/70	B1	3	ANO			
ACL 16S	PmB 25/55-55	B2	3	ANO			
ACL 16S	PmB 25/55-55+Forta	B3	3	ANO			
ACL16+		B4	4	ANO			
ACL16R	REMIX	B5	7	ANO			
ACL16S	PmB 45/80-55	B6	8	ANO	ANO		
ACL16+		B7	4	ANO	ANO		
ACL16+		B8	4	ANO	ANO		
ACL22S	PmB	B9	4	ANO	ANO		
VMT 22	30/45	C1	15	ANO	ANO	ANO	ANO
ACP22+	50%RA	C2	3	ANO			
VMT 22	20/30	C3	6	ANO			
ACP22+		C4	3	ANO			

Pro laboratorní simulaci dlouhodobého stárnutí bylo zvoleno několik metod. První z nich byla dle americké normy AASHTO R30-02 (kap. 3.2.1), která spočívá v uložení zkušebních těles do výhřevné komory po dobu 5 dní při teplotě 85°C. Další metoda je podobná metodě RILLEM (kap. 3.2.1). Zkušební tělesa však byla uložena do výhřevné komory na dobu 10 dní (RILLEM uvádí 7 – 9 dní) při teplotě 85°C. Třetí metodou byla určitá modifikace předchozích metod, která spočívala v uložení těles do výhřevného boxu po dobu 15 dní při teplotě také 85°C. Čtvrtou a závěrečnou metodou byla metoda PAV popsaná v kapitole 3.2.1.2. Během této metody jsou zkušební tělesa uložena do přístroje PAV na dobu 20 hodin při teplotě 85°C a tlaku 2,1 MPa.

U směsí A1, B5, B6, C1 a C3 byla některá tělesa ponechána bez stárnutí a byla na nich stanovena odolnost vůči lomu bez vlivu stárnutí. V tabulce 4 je také uvedeno, že některé směsi se čtyřmi tělesy prošly stárnutím jak po dobu 5, tak 10 dní. Na těchto tělesech byl nejprve změřen modul tuhosti před stárnutím, poté prošla tělesa procesem stárnutí 5 dní a byl na nich naměřen modul tuhosti po stárnutí. Následně byla tělesa rozřezána na půlválce. Na jedné půlce každého tělesa byla stanovena odolnost vůči lomu a druhá půlka byla uložena opět na 5 dní do vyhřevného boxu při teplotě 85°C. Tím pádem prošla druhá půlka každého tělesa celkově stárnutím po dobu 10 dní a mohla být stanovena odolnost vůči lomu i po 10 dnech stárnutí. Modul tuhosti po 10 dnech stárnutí však nebylo možné změřit.

#### 4.2.3 Zkouška šíření trhliny na půlválcovém tělese

Princip této zkoušky byl popsán v kapitole 3.4.1. Půlválcová tělesa pro tuto zkoušku byla vyrobena ze zkušebních těles tvaru válce (Marshallova tělesa), která byla použita pro stanovení modulů tuhosti. Tělesa byla upravena do podoby, kterou vyžaduje norma ČSN EN 12697 – 44: Šíření trhliny zkouškou ohybem na půlválcovém zkušebním tělese [13]. Tloušťka těles byla  $50 \pm 3$  mm. Ve středu spodního líce tělesa byla vyříznuta drážka o hloubce  $10 \pm 1$  mm. Tyto geometrické parametry těles odpovídají doporučením, která byla uvedena v tabulce 1 v kapitole 3.4.2.1.

Ostatní parametry zkoušky však již byly nastaveny jinak, než udává norma [13], a to na základě teoretických poznatků ze zahraničí [16], [17]. Jako zkušební teplota byla zvolena

hodnota 15°C a rychlost zatěžování byla stanovena na 1 mm/min. Tyto parametry také odpovídají tabulce 1 z kapitoly 3.4.2.1. V závěrech prací [16] a [17] byla uvedena myšlenka, že by takto nastavená zkouška mohla být využita pro stanovení odolnosti vůči



Obrázek 26: Zkušební zařízení pro zkoušku šíření trhliny na půlválcovém zkušebním tělese

únavovým trhlinám. Vyhodnocení této zkoušky by tedy mělo ukázat směsi, které jsou vůči vzniku takových poruch odolnější. Tím, že je zkouška prováděna zejména na zestárlých asfaltových směsích, můžeme pozorovat, jak je směs vůči „únavovým“ trhlinám odolná ke konci své životnosti ve vozovce.

Zkouška probíhá tak, že je zkušební těleso umístěno do zkušebního zařízení (obr. 26) a je vyvozováno zatížení předem nastavenou rychlostí. Zaznamená se nejvyšší dosažená hodnota zatížení a hodnota svislé deformace ve směru zatížení v mm. Poté je nutné zkontrolovat, zda je vzniklá trhlina v platné oblasti (obr. 27), aby mohla být zkouška prohlášena za platnou.



**Obrázek 27: Kontrola trhliny**

Při této zkoušce je nesmírně důležité, aby spodní plochá strana tělesa byla skutečně rovná, bez výstupků či hrbolků, zejména v oblasti, kde se těleso ukládá na zkušební zařízení. Pokud jsou na tomto místě tělesa výstupky, dojde s největší pravděpodobností nejprve k drcení právě tohoto místa (obr. 28) a výsledky jsou poté zkreslené. Takto porušená tělesa je také nutno vyřadit z vyhodnocení.



**Obrázek 28: Drcení tělesa v místě uložení na zkušební zařízení**

## 4.3 Vyhodnocení výsledků

V této části práce budou prezentovány výsledky provedených zkoušek, tedy hodnoty modulů tuhosti a odolnosti vůči lomu jednotlivých směsí ovlivněných stárnutím. U některých směsí bylo také provedeno stanovení objemové hmotnosti a mezerovitosti po stárnutí. Snahou bude porovnat chování jednotlivých typů směsí a zjistit, která směs byla vlivem stárnutí nejvíce či nejméně ovlivněna.

### 4.3.1 Změny objemové hmotnosti a mezerovitosti v důsledku stárnutí

V tabulce 5, 6 a 7 jsou uvedeny hodnoty objemových hmotností před a po stárnutí, mezerovitostí před a po stárnutí a změny těchto hodnot v procentech pro jednotlivé skupiny těles zkoušených směsí. Skupiny těles jsou vždy dle prováděné metody stárnutí.

Tabulka 5: Změny objemových hmotností a mezerovitostí u směsí ACO

SMĚS	TĚLESA	STÁRNUTÍ	Objemová hm. tělesa [g*cm <sup>-3</sup> ]	Objemová hm. zestárlá [g*cm <sup>-3</sup> ]	změna objemové hmotnosti	Mezerovitos _tělesa [%]	Mezerovitos _stárnutí [%]	změna mezerovitosti
A1	B4	5d@85°C	2,456	2,464	0,3%	4,96	4,64	-7%
	B5							
	B6							
	B7	10d@85°C	2,481	2,486	0,2%	4,02	3,80	-5%
	B8							
	B9							
	B10	15d@85°C	2,485	2,493	0,3%	3,83	3,52	-8%
	B11							
	B12							
B13	PAV	2,497	2,349	-5,9%	3,37	9,09	170%	
B14								
B15								
A2	1	5d@85°C	2,422	2,429	0,3%	1,78	1,52	-15%
	2							
	3							
	4	10d@85°C	2,416	2,423	0,3%	2,44	2,20	-10%
	5							
	6							
A3	29	5d@85°C	2,408	2,413	0,2%	4,92	4,73	-4%
	30							
	31							
	32							
A5	49	5d@85°C	2,391	2,393	0,1%	3,21	3,13	-3%
	50							
	51							
	52							
A6	53	5d@85°C	2,408	2,409	0,0%	4,07	4,03	-1%
	54							
	55							
	56							
A7	16	5d@85°C	2,463	2,467	0,1%	3,55	3,41	-4%
	17							
	18							

Tabulka 6: Změny objemových hmotností a mezerovitostí u směsí ACL

SMĚS	TĚLESA	STÁRNUTÍ	Objemová hm. tělesa [g·cm <sup>-3</sup> ]	Objemová hm. zestárlá [g·cm <sup>-3</sup> ]	změna objemové hmotnosti	Mezerovitos _tělesa [%]	Mezerovitos _stárnutí [%]	změna mezerovitosti
B6	35	5d@85°C	2,477	2,480	0,1%	3,29	3,17	-4%
	36							
	41							
	42	10d@85°C						
	43							
44								
B7	45	5d@85°C	2,427	2,432	0,2%	3,42	3,23	-6%
	46							
	47							
	48							
B8	37	5d@85°C	2,493	2,476	-0,7%	5,06	5,73	13%
	38							
	39							
	40							
B9	25	5d@85°C	2,373	2,371	-0,1%	7,44	7,52	1%
	26							
	27							
	28							

Tabulka 5 obsahuje hodnoty pro směsi ACO, tabulka 6 pro ACL a tabulka 7 pro ACP.

Ze všech tří tabulek je zřetelné, že až na dvě výjimky je změna objemové hmotnosti vyjádřená v procentech naprosto minimální v hodnotách do  $\pm 1$  %. Dvěma výjimkami jsou tělesa směsí A1 a C1 (tedy směsí SMA11 a VMT22 vyrobených v laboratoři), která byla vystavena procesu stárnutí v přístroji PAV. U těchto těles došlo k poměrně velkému úbytku objemové hmotnosti a zároveň k obrovské změně mezerovitosti. K tomuto výsledku je však velmi důležité poznamenat, že tělesa v přístroji PAV nebyla vyztužena ocelovou sítí (viz. kap. 3.2.1.2) a došlo k jejich velké deformaci (obr. 29). Z tohoto zjištění tedy vyplývá, že příprava těles před touto metodou stárnutí je stěžejní pro získání odpovídajících výsledků.

Tabulka 7: Změny objemových hmotností a mezerovitostí u směsí ACP

SMĚS	TĚLESA	STÁRNUTÍ	Objemová hm. tělesa [g·cm <sup>-3</sup> ]	Objemová hm. zestárlá [g·cm <sup>-3</sup> ]	změna objemové hmotnosti	Mezerovitos _tělesa [%]	Mezerovitos _stárnutí [%]	změna mezerovitosti
C1	A6	5d@85°C	2,543	2,550	0,3%	2,88	2,60	-10%
	A7							
	A8							
	A9	10d@85°C						
	A10							
	A11							
	A15	15d@85°C						
	A16							
	A17							
	A12	PAV						
	A13							
	A14							

Z tabulky 5 je dále patrné, že u směsí ACO docházelo v důsledku simulace dlouhodobého stárnutí ke snížení mezerovitosti směsi. Tento jev by se dal vysvětlit tak, že vlivem působení teploty 85°C (teplota přesahující bod měknutí) se asfaltové pojivo stává méně viskozní, tedy tekutější a rozpíná se a může docházet k vyplnění některých drobných mezer pojivem. Nejvíce se změna mezerovitosti u směsí typu ACO projevila u směsi A2 (ACO11S PmB 45/80-65), která má ze všech směsí nejnižší mezerovitost. U této směsi a směsi A1 je také možné porovnat změnu mezerovitosti při stárnutí 5 a 10 dní. U obou těchto směsí je vidět, že větší úbytek mezerovitosti nastal při kratším procesu stárnutí.



Obrázek 29: Zdeformované těleso metodou PAV

V tabulce 6 jsou výsledky změn objemové hmotnosti a mezerovitosti pro směsi typu ACL. Směsi B6 a B7 potvrzují výsledky pozorované u směsí typu ACO. Směs B6 navíc obsahuje stejné pojivo jako směs A3 (PmB 45/80-55) a z výsledků se ukázalo, že je změna mezerovitosti po 5 dnech stárnutí u těchto směsí shodná, tedy -4 %. U směsí B8 a B9 (ACL16+ a ACL22S) však došlo vlivem stárnutí k navýšení mezerovitosti. Stejně tak se stalo u směsi C1 (VMT 22) typu ACP. Tento jev by mohl mít souvislost například s velikostí kameniva ve směsi. Tomu by odpovídal i výsledek u směsi A6 (ACO16S PmB), ve které je použito kamenivo s největším zrnem 16 mm. Oproti ostatním směsím ACO se u ní úbytek mezerovitosti projevil nejméně. Toto je však pouze domněnka, která by musela být dokázána dalšími měřeními. Nárůst mezerovitosti u těchto směsí mohl být způsoben také tím, že se asfaltové pojivo vlivem vysoké teploty částečně vpenetrovalo do struktury kameniva. To je však další zatím nepotvrzená domněnka.

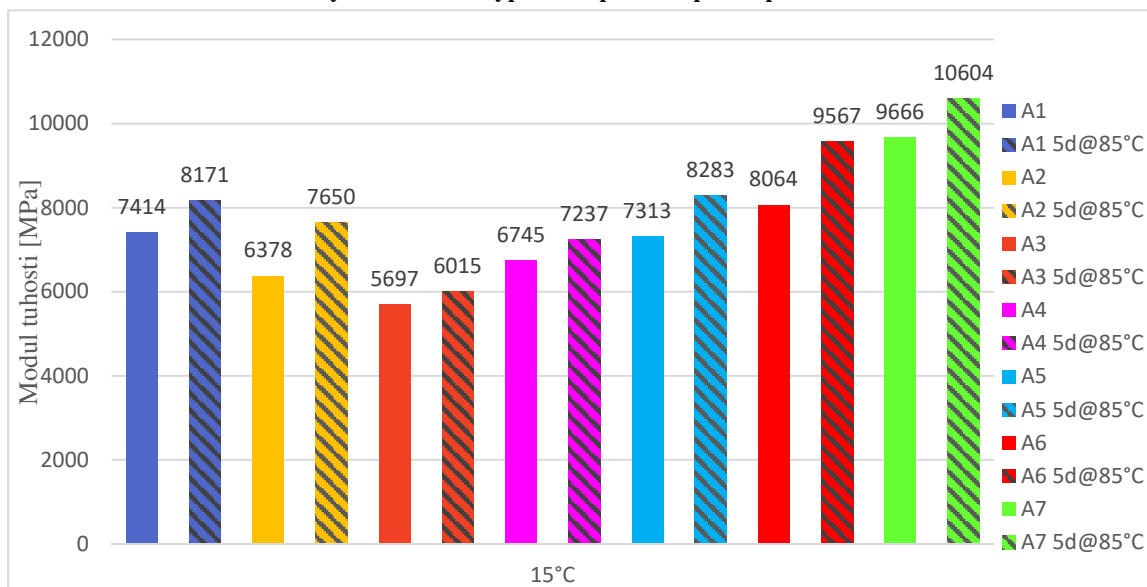
### 4.3.2 Modul tuhosti

V následujícím textu bude porovnání modulů tuhosti směsí a jejich změn v důsledku stárnutí. Změny budou porovnávány v rámci měnicích se parametrů, jako je například zkušební teplota či metoda stárnutí.

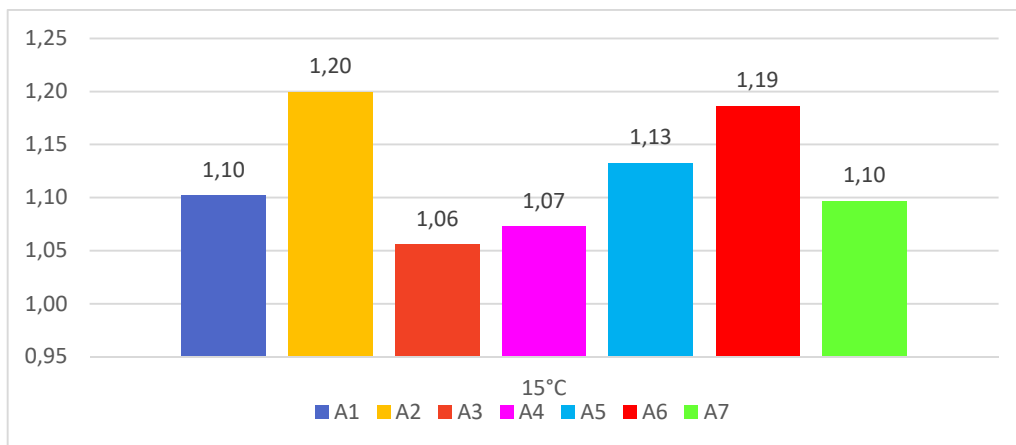
#### 4.3.2.1 Změny modulů tuhosti směsí při zkušební teplotě 15°C v důsledku stárnutí

V grafu 1 jsou zobrazeny hodnoty modulů tuhosti při zkušební teplotě 15°C jednotlivých směsí typu ACO před a po procesu stárnutí 5d@85°C (5 dní při teplotě 85°C). V grafu 2 jsou poté uvedeny hodnoty indexu stárnutí směsí typu ACO při zkušební teplotě 15°C. Hodnota indexu stárnutí je poměr hodnot modulu tuhosti po a před stárnutím. Pokud je hodnota indexu stárnutí větší než 1,0, došlo k navýšení tuhosti směsi v důsledku stárnutí.

Graf 1: Moduly tuhosti směsí typu ACO při 15°C před a po stárnutí 5d@85°C



Graf 2: Indexy stárnutí směsí typu ACO při zkušební teplotě 15°C po stárnutí 5d@85°C



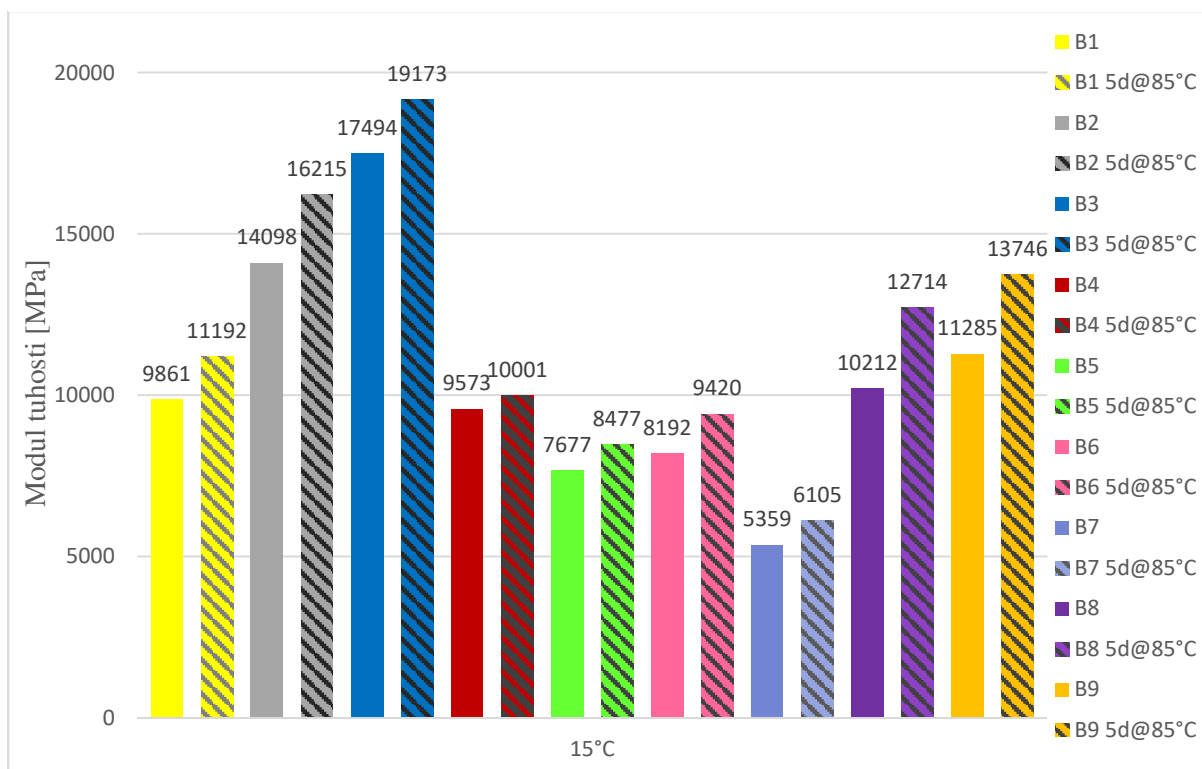
Jak je vidět z grafu 2, hodnoty indexu stárnutí jsou u všech směsí větší než 1. Tím pádem je u všech těchto směsí naplněn předpoklad navýšení tuhosti směsi v důsledku procesu stárnutí. Nejméně se vliv stárnutí projevil u směsi A3 (ACO11S PmB 45/80-55) a A4 (ACO11S PmB). Nejvíce se vliv stárnutí projevil u směsi A2 (ACO11S PmB 45/80-65), o které navíc z předchozí kapitoly víme, že u ní došlo k největší změně mezerovitosti v důsledku stárnutí 5d@85°C v rámci směsí ACO. Paradoxně srovnatelný index stárnutí se směsí A2 má však směs A6 (ACO16S PmB), u které naopak došlo k nejmenší změně mezerovitosti. Závislost mezi změnou mezerovitosti a hodnotou indexu stárnutí pro tento typ směsí tedy nebyla spolehlivě nalezena. Nutno poznamenat, že směs A6 má však ze všech směsí ACO největší mezerovitost. I když se tedy její mezerovitost v důsledku stárnutí příliš nezměnila, může právě vyšší mezerovitost směsi znamenat větší náchylnost směsi k projevům stárnutí (což by odpovídalo teoretickým poznatkům). Pokud porovnáme indexy stárnutí u směsí, u kterých je znám přesný typ pojiva (A1,A2,A3), můžeme vidět, že měkčí pojivo PmB 45/80-55 s nejnižším bodem měknutí je použito právě u směsi A3, jejíž hodnota indexu stárnutí je nejnižší.

Co se týká samotných hodnot modulů tuhosti, nejvyšší hodnoty dosáhla překvapivě směs A7 (ACO11+), která svým označením spadá do směsí užívaných pro střední dopravní zatížení. Naopak nejnižší hodnotu modulu tuhosti můžeme pozorovat u směsi A3, která by měla být užívána pro vysoká dopravní zatížení. To samé platí pro směs A2. U těchto dvou směsí je známo použité pojivo, které patří spíše mezi měkčí, což může mít za následek právě nižší hodnotu modulu tuhosti. Kompenzací k nižší tuhosti však mohou být lepší únavové vlastnosti směsi.

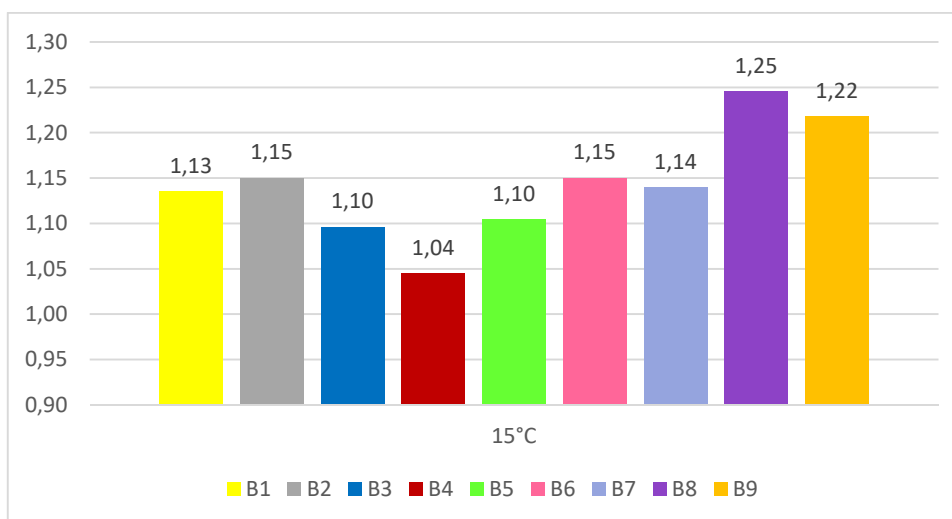
V grafu 3 jsou zobrazeny moduly tuhosti při zkušební teplotě 15°C jednotlivých směsí typu ACL před a po procesu stárnutí 5d@85°C. V grafu 4 jsou hodnoty indexu stárnutí těchto směsí. Všechny hodnoty indexů stárnutí jsou opět větší než 1, takže i pro tyto směsi se potvrdil předpoklad, že vlivem stárnutí dojde k navýšení tuhosti směsí. Nejvyšší tuhosti dosáhla dle předpokladu směs B3 (ACL16S PmB 25/55-55+Forta FI), která obsahuje jak tvrdší modifikované asfaltové pojivo, tak ještě navíc vlákna Forta FI, která mají u směsí zlepšovat odolnost vůči vzniku deformací, potažmo tedy zvyšovat tuhost. Velkou tuhost vykazala také směs B2, která oproti směsi B3 pouze neobsahuje vlákna.



Graf 3: Moduly tuhosti směsí typu ACL při zkušební teplotě 15°C před a po stárnutí 5d@85°C



Graf 4: Indexy stárnutí směsí typu ACL při zkušební teplotě 15°C po stárnutí 5d@85°C



Naopak nejnižší tuhost vykázala směs B7 (ACL16+). To odpovídá tomu, že je směs označena jako směs pro středně zatížené vozovky. Jinak jsou tuhosti směsí řádově srovnatelné.

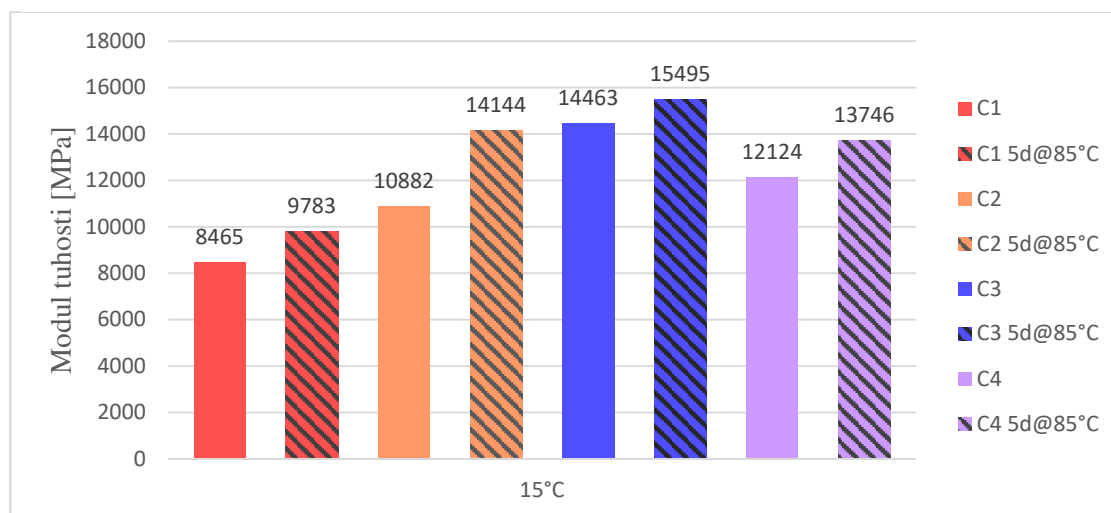
Při pohledu na graf 4 je zřejmé, že nejvyšší index stárnutí má směs B8 (ACL16+) a B9 (ACL22S PmB). U směsi B8 došlo k velké změně mezerovitosti, tentokrát však k jejímu

navýšení. Směs sama o sobě měla před stárnutím mezerovitost poměrně velkou (přes 5 %). Směs B9 měla také velmi velkou mezerovitost (přes 7 %). Zde by se tedy mohl potvrdit jev pozorovaný u směsi A6. Na základě těchto směsí by se dalo říci, že pokud má směs velkou mezerovitost, je směs k projevům stárnutí náchylnější. To by opět potvrdilo teoretické poznatky. Tato domněnka je však založena na pozorování poměrně malého spektra směsí a bylo by třeba jí potvrdit dalšími výsledky.

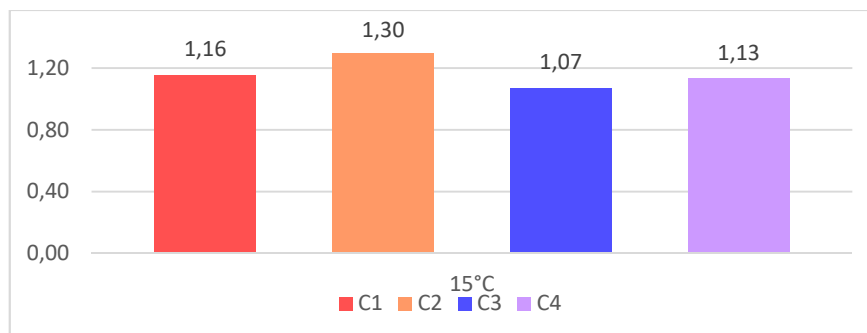
Hodnoty indexů stárnutí s ohledem na typ použitého pojiva ve směsi jsou v tomto případě téměř srovnatelné. Drobné rozdíly by se daly najít u směsi B3 s přidavkem vláken Forta. V porovnání se směsí B2, která má shodné složení pouze bez přidavku vláken, vykázala směs B3 větší odolnost vůči účinkům stárnutí (z hlediska změn tuhosti). Zajímavé je také porovnání indexů stárnutí směsí A1 a B1, které obsahují totožné pojivo 50/70. Hodnoty indexů stárnutí těchto dvou směsí jsou srovnatelné (1,10 a 1,13). U směsí A3 a B6 je také shodné pojivo a to PmB 45/80-55. Indexy stárnutí těchto dvou směsí však jsou již poměrně odlišné (1,06 a 1,15).

Graf 5 zobrazuje hodnoty modulů tuhosti při zkušební teplotě 15°C směsí typu ACP před a po stárnutí 5d@85°C. V grafu 6 jsou příslušné hodnoty indexu stárnutí těchto směsí.

**Graf 5: Moduly tuhosti směsí typu ACP při zkušební teplotě 15°C před a po stárnutí 5d@85°C**



**Graf 6: Indexy stárnutí směsí typu ACP při zkušební teplotě 15°C po stárnutí 5d@85°C**

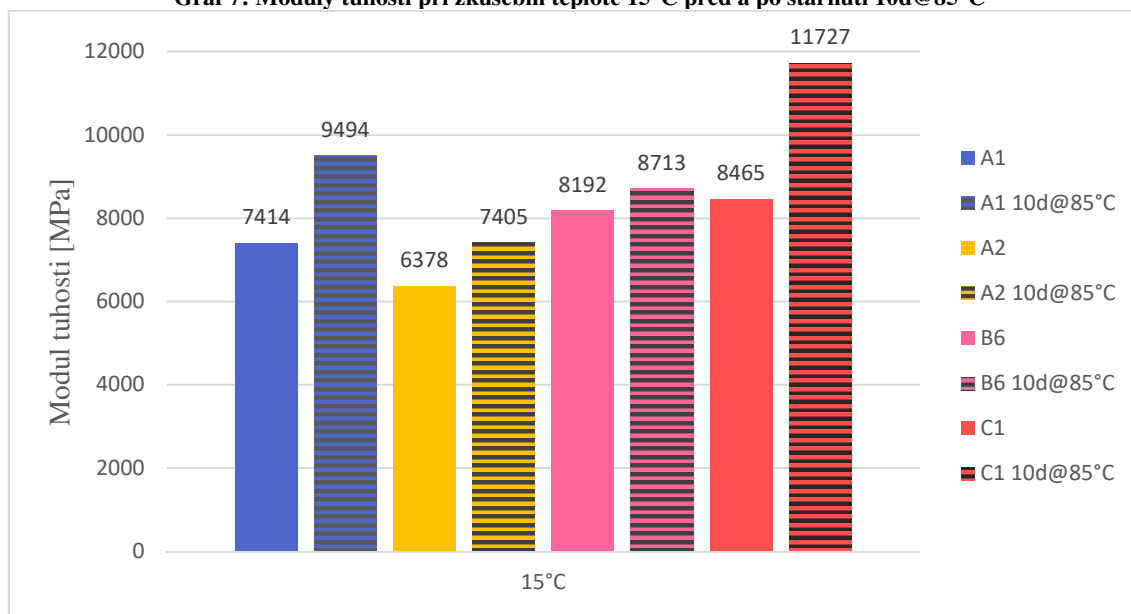


Z grafu 5 je patrné, že nejvyšší tuhosti dosáhla směs C3 (VMT22 20/30). To je naprosto v souladu s očekáváním, protože tato směs obsahuje velmi tvrdé silniční pojivo. Naopak nejnižší tuhosti dosáhla směs C1 (VMT22 30/45).

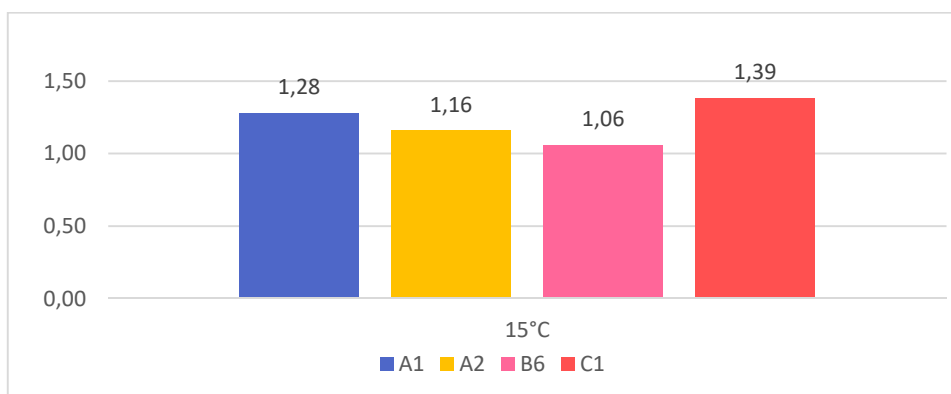
Z grafu 6 je vidět, že největší index stárnutí a tím pádem nejvíce ovlivněná stárnutím je směs C2 (ACP22+ s 50% recyklátu). Zde opět platí, že tato směs měla nejvyšší mezerovitost. Navíc byl v této směsi použit recyklát, který již sám o sobě obsahoval zestárlé asfaltové pojivo. Souvislost náchylnosti ke stárnutí a mezerovitosti směsi byla tedy opět potvrzena. Zároveň i v tomto případě platí, že vyšší index stárnutí má také směs, jejíž mezerovitost se v důsledku procesu stárnutí výrazněji změnila, což zde dokazuje směs C1 (VMT22 30/45). Z hlediska použitého pojiva ve směsi vykazala největší odolnost vůči účinkům stárnutí směs C3 (VMT22 20/30), což je v tomto případě směs s nejtvrdějším asfaltovým pojivem.

Další výsledky jsou zobrazeny v grafu 7. Jedná se o hodnoty modulů tuhosti při 15°C před a po stárnutí 10d@85°C (10 dní při teplotě 85°C). Vzhledem k omezenému počtu těchto směsí již nejsou výsledky rozděleny dle typu směsi. V grafu 8 jsou odpovídající hodnoty indexů stárnutí.

**Graf 7: Moduly tuhosti při zkušební teplotě 15°C před a po stárnutí 10d@85°C**

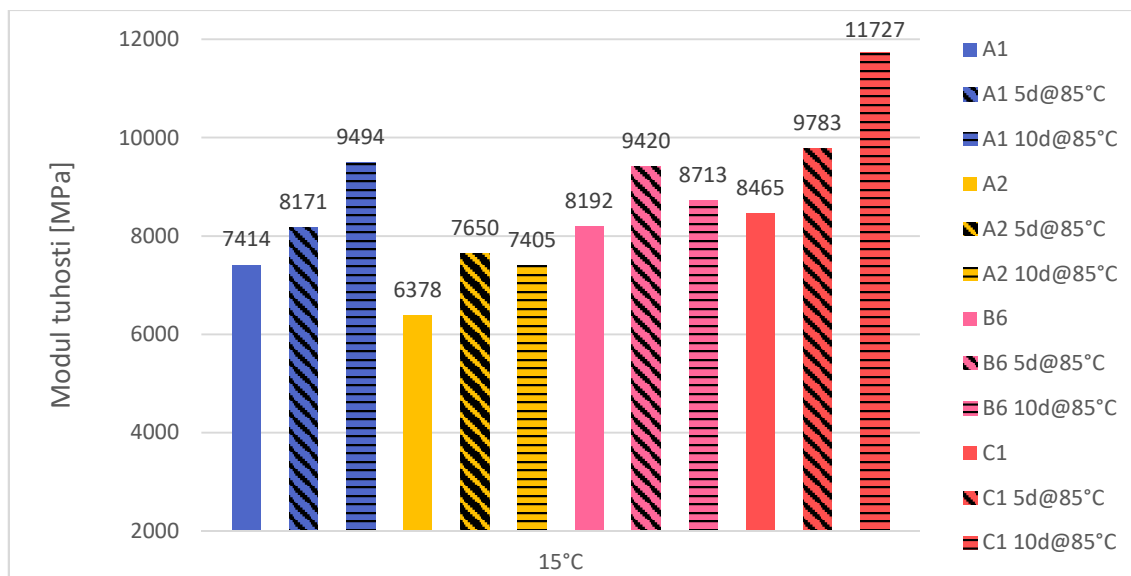


**Graf 8: Indexy stárnutí směsí při zkušební teplotě 15°C po stárnutí 10d@85°C**

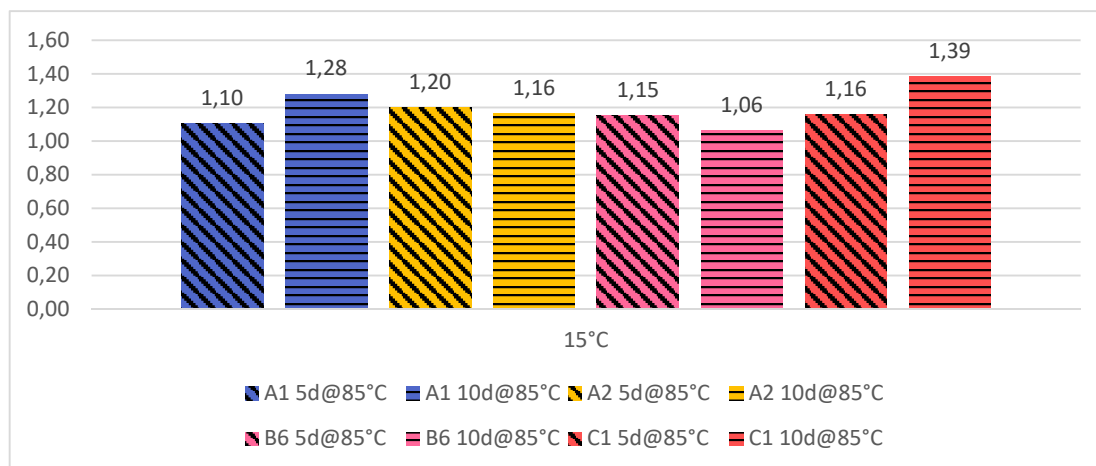


U všech směsí opět došlo k navýšení tuhosti v důsledku stárnutí. Nejnižší hodnoty indexu stárnutí pro tento typ stárnutí dosáhla směs B6 (ACL16S PmB 45/80-55). U této směsi byla také pozorována nejmenší změna mezerovitosti v důsledku stárnutí. Naopak směs C1 (VMT22 30/45) má hodnotu indexu stárnutí nejvyšší. U této směsi byl pozorován zajímavý jev, a to, že během stárnutí po dobu 5 dnů se mezerovitost směsi snížila, při stárnutí po dobu 10 i 15 dní se však mezerovitost zvýšila. Tato směs se tedy ukázala jako velmi citlivá na změny způsobené stárnutím. Zajímavé také je, že u směsí A2 a B6, které obě obsahují modifikované pojivo PmB, je index stárnutí při metodě 10d@85°C nižší, než u metody 5d@85°C. Naopak u směsí A1 a C1, které obsahují silniční pojiva, je tomu přesně naopak. To znamená, že obyčejná silniční pojiva jsou vlivům této metody stárnutí náchylnější.

**Graf 9: Moduly tuhosti směsí před stárnutím, po stárnutí 5d@85°C a 10d@85°C**



**Graf 10: Indexy stárnutí směsí po stárnutí 5d@85°C a 10d@85°C**

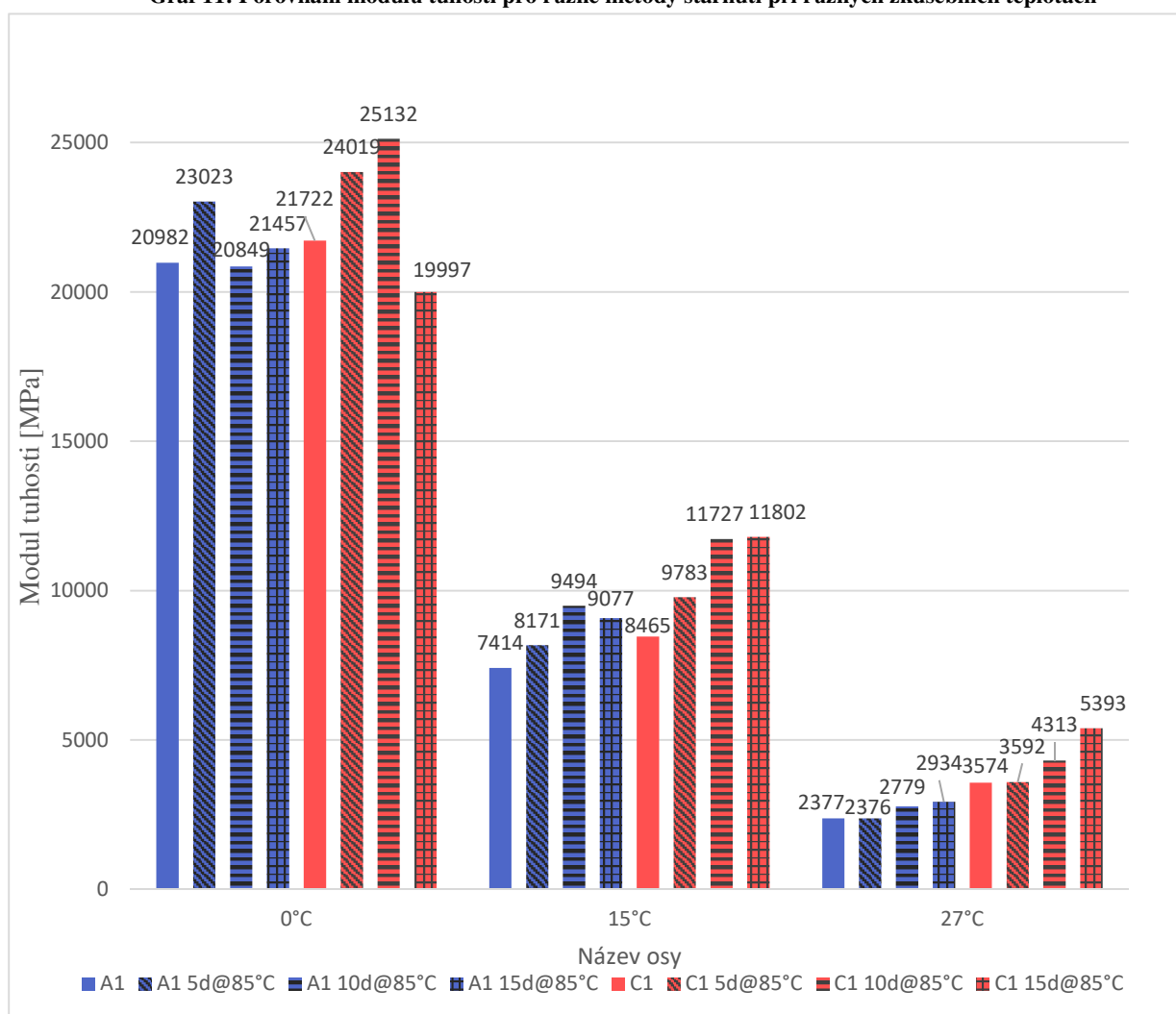


V grafech 9 a 10 jsou porovnány hodnoty modulů tuhostí směsí před stárnutím, po stárnutí 5d@85°C a 10d@85°C a tomu odpovídající indexy stárnutí. Zajímavý je zde již zmíněný vývoj hodnoty modulu tuhosti směsí A2 a B6 u stárnutí 10d@85°C oproti stárnutí 5d@85°C. Při delší simulaci stárnutí došlo u těchto směsí k menšímu nárůstu tuhosti. Mohlo by to znamenat, že směsi jsou vůči tomuto stárnutí odolnější. Dalším možným vysvětlením je však také to, že se dlouhodobějším působením vysoké teploty při simulaci stárnutí změnila struktura zkušebního tělesa. Zde je poté nutné se zamyslet, zda je tato laboratorní metoda simulace stárnutí vhodná pro získání odpovídajících výsledků.

### 4.3.2.2 Změny modulů tuhostí směsí v závislosti na metodě stárnutí při různých zkušebních teplotách

Vzhledem k tomu, že u směsi A1 (SMA11 50/70) a C1 (VMT22 30/45) bylo k dispozici velké množství těles, byly na nich zkoušeny různé metody stárnutí a měřeny moduly tuhosti při různých zkušebních teplotách. Výsledky měření modulů tuhosti jsou v grafu 11.

Graf 11: Porovnání modulů tuhostí pro různé metody stárnutí při různých zkušebních teplotách

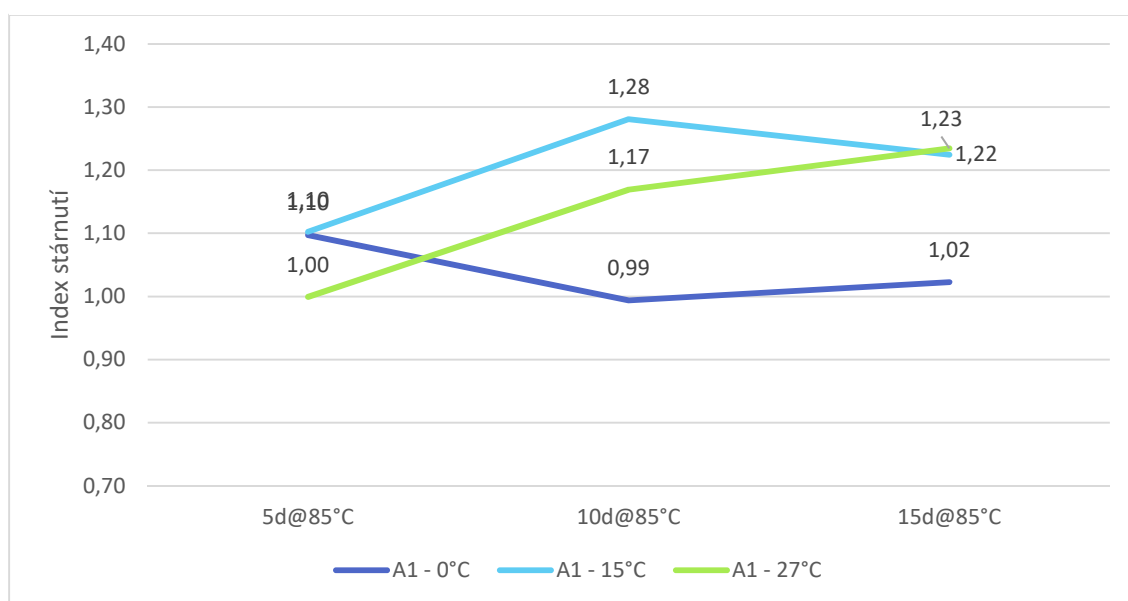


Jak je z grafu patrné, neobjevily se zde moduly tuhosti pro metodu stárnutí PAV. Zkušební tělesa byla bohužel natolik zdeformovaná (viz. obrázek 29, str.45), že na nich již nebylo možné modul tuhosti stanovit. Zkušební tělesa totiž nebyla před uložením do přístroje PAV obalena ocelovou sítkou a stažena montážní páskou. Pod vlivem vysoké teploty a tlaku se tělesa zdeformovala. To může sloužit jako výstražný příklad pro další provádění této metody stárnutí.

Z grafu 11 je patrné, že při zkušebních teplotách 15°C a 27°C v podstatě platí závislost, že čím delší je simulovaná doba stárnutí, tím více narůstá tuhost směsi. Nejlépe se tento jev projevil u zkušební teploty 27°C. U zkušební teploty 15°C je již však vidět, že u metody 15d@85°C (15 dní při teplotě 85°C) není nárůst tuhosti tak dramatický, u směsi A1 dochází dokonce k mírnému poklesu tuhosti oproti metodě 10d@85°C. Při zkušební teplotě 0°C může být u směsi C1 také pozorován pokles tuhosti po stárnutí metodou 15d@85°C, a to dokonce v porovnání s původní tuhostí na nezestárlé směsi. U směsi A1 je pokles dokonce již při metodě 10d@85°C. Pokles tuhosti směsí mohl být opět nejpravděpodobněji zapříčiněn změnou struktury zkušebního vzorku v důsledku laboratorní simulace stárnutí při vysoké teplotě. Obecně by se z grafu 11 dalo říci, že změny tuhosti způsobené stárnutím a jeho délkou se nejvíce projevují při vyšších zkušebních teplotách.

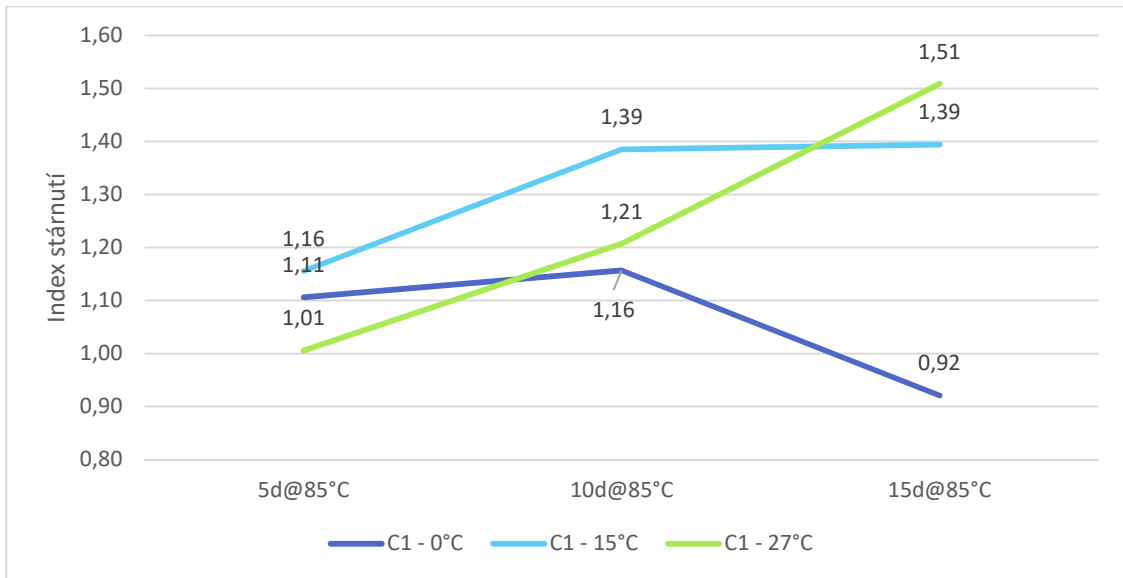
Vývoje indexů stárnutí v závislosti na použité metodě stárnutí pro jednotlivé zkušební teploty a směsi jsou zobrazeny v grafech 12 a 13.

**Graf 12: Vývoj indexu stárnutí dle metody stárnutí - směs A1**



U směsi A1 (SMA11 50/70) je poměrně dobře vidět trend popsáný výše, tedy to, že při zkušebních teplotách 15°C a 27°C se účinky stárnutí (z hlediska tuhosti směsi) projeví více s roustoucí dobou simulace stárnutí. U zkušební teploty 0°C jsou hodnoty tuhosti srovnatelné. Směs tedy při zkušební teplotě 0°C vykazuje obdobné tuhosti bez ohledu na předchozí proces stárnutí.

Graf 13: Vývoj indexu stárnutí dle metody stárnutí - směs C1



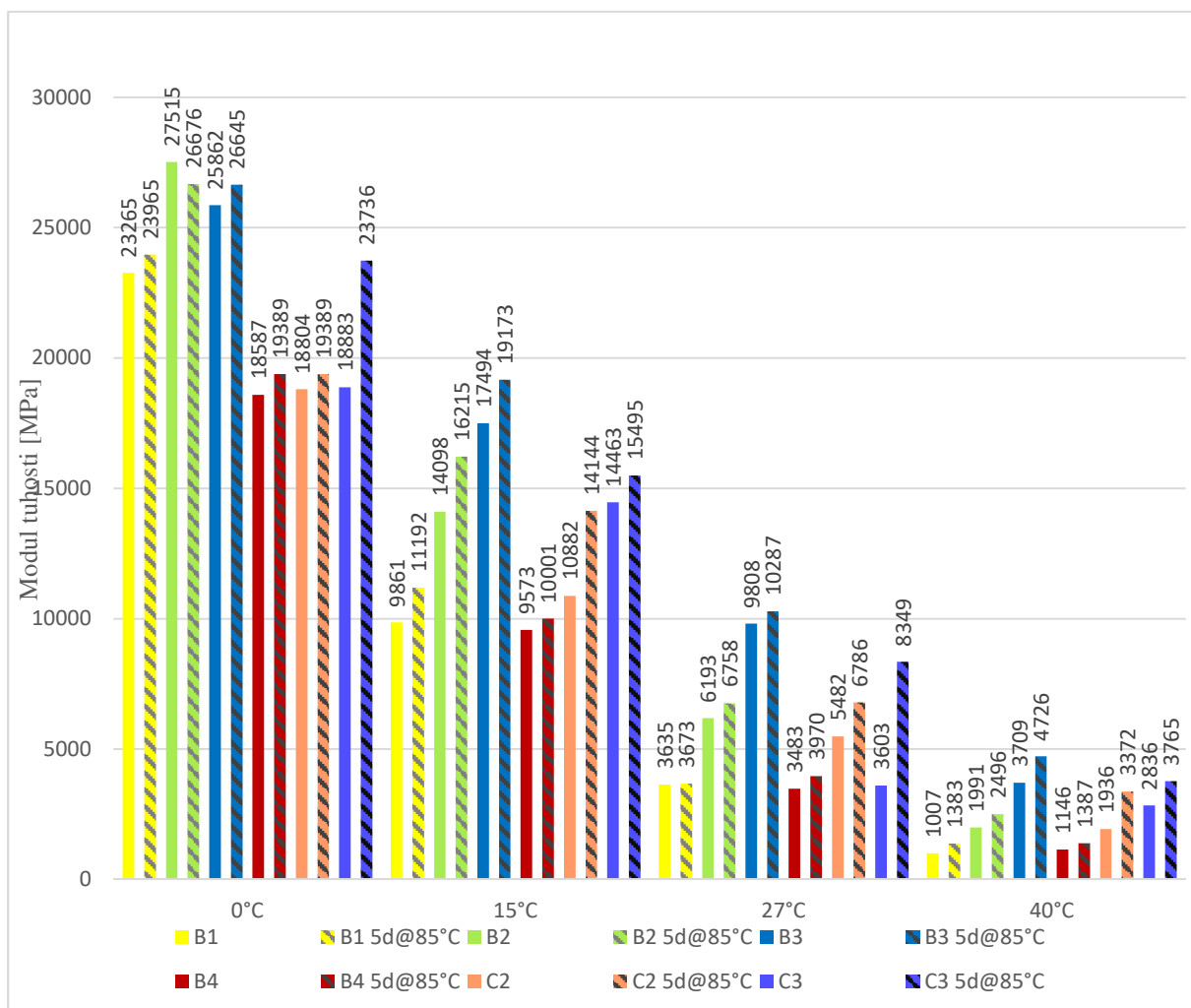
U směsi C1 (VMT22 30/45) můžeme pozorovat podobné chování jako u směsi A1. Opět zde platí, že při vyšších zkušebních teplotách se vliv délky stárnutí projeví v rámci zvýšení tuhosti směsi více než při zkušebních teplotách nižších. Nejvíce je zde vidět rozdíl u metody 15d@85°C, kdy došlo při zkušební teplotě 27°C k nárůstu tuhosti o 51 %, zatímco u zkušební teploty 0°C došlo k poklesu tuhosti o pouhých 8 %. Pokles tuhosti oproti původní hodnotě byl však nejspíše způsoben porušením struktury tělesa během simulace stárnutí.

#### 4.3.2.3 Změny modulů tuhosti po stárnutí 5 dnů v závislosti na zkušební teplotě

U následujících směsí byl zjišťován vliv zkušební teploty na hodnoty modulu tuhosti před a po stárnutí metodou 5d@85°C. Zkoušené směsi byly B1 (ACL16S 50/70), B2 (ACL16S PmB 25/55-55), B3 (ACL16S PmB 25/55-55+Forta FI), B4 (ACL16+), C2 (ACP22+ s 50 % recyklátu) a C3 (VMT22 20/30). Zkušební teploty byly 0°C, 15°C, 27°C a 40°C. Výsledky měření modulů tuhosti všech těchto směsí při všech zkušebních teplotách jsou uvedeny v souhrnném grafu 14.



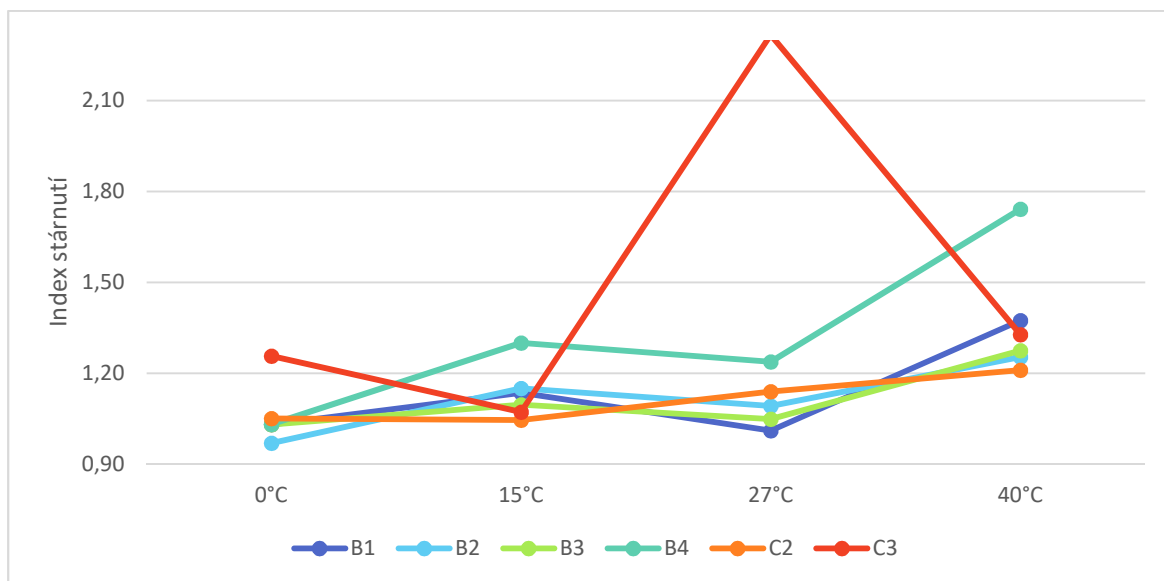
Graf 14: Moduly tuhosti před a po stárnutí 5 dní při různých zkušebních teplotách



Sloupce stejné barvy vždy odpovídají jedné směsi s tím, že šrafovaný sloupec odpovídá hodnotě modulu tuhosti po procesu stárnutí metodou 5d@85°C. Z grafu je patrné, že v převážné většině případů dosahuje nejnižší hodnoty modulu tuhosti směs B4 (ACL16+). Kromě zkušební teploty 0°C je však tato směs řádově srovnatelná se směsí B1 (ACL16S 50/70). U směsi B4 je tento výsledek v rámci těchto směsí předpokládán, protože se jedná o směs používanou pro střední dopravní zatížení. Směsi s označením S by měly vykazovat vyšší tuhost, protože jsou používány do nejvíce zatížených konstrukcí vozovek. Nejvyšší tuhosti dosahuje směs B3 (ACL16S PmB 25/55 - 55+Forta FI) s přidavkem vláken. Z tohoto grafu je také patrné, že se opět potvrdil předpoklad, že vlivem stárnutí asfaltové směsi dojde k navýšení její tuhosti.

Pro lepší sledování závislosti ovlivnění tuhosti směsi stárnutím na zkušební teplotě slouží graf 15.

Graf 15: Vývoj indexu stárnutí v závislosti na zkušební teplotě



Z grafu 15 je patrné, že u směsi C3 došlo při zkušební teplotě 27°C pravděpodobně k chybě měření, protože hodnota modulu tuhosti zestárlé směsi byla více jak dvojnásobná oproti nezestárlé. Mohlo to být způsobené například nedostatečným vytemperováním zkušebních těles na zkušební teplotu. Při zanedbání této odchylky můžeme v grafu sledovat určitý trend závislosti indexu stárnutí na zkušební teplotě. Čím vyšší je zkušební teplota, tím více se projevuje vliv stárnutí na tuhost asfaltové směsi. Odpovídá to výsledkům získaným v předchozí kapitole, kde byly porovnávány různé druhy stárnutí při různých zkušebních teplotách. To by samo o sobě mohlo znamenat jev poměrně příznivý, protože při vyšších teplotách je asfaltová směs obecně méně tuhá, ale během procesu stárnutí (životnosti ve vozce) by se její tuhost při vyšších teplotách o něco zvýšila. Zároveň zjištění, že u těchto směsí dochází k nejmenšímu ovlivnění tuhosti stárnutím při nízkých teplotách by mohlo být pozitivní, protože přílišný nárůst tuhosti většinou znamená také nárůst křehkosti. A křehkost je u nízkoteplotního chování směsí velmi nežádanou vlastností.

K těmto závěrům je však nutné dodat, že navýšení tuhosti směsi obecně neznamená jev pozitivní, ale je nutné brát v úvahu komplexní změnu chování a vlastností asfaltové směsi v důsledku stárnutí. Z hlediska stárnutí směsí by měly být sledovány převážně únavové vlastnosti, které se mohou v průběhu stárnutí velmi výrazně měnit.

### 4.3.3 Šíření trhliny na půlválcovém tělese

V následujícím textu budou prezentovány výsledky zkoušky ohybem na půlválcovém tělese za specifických podmínek, které by měly dle zahraničních zkušeností simulovat podmínky pro získání údajů o únavových vlastnostech asfaltových směsí. Zkouška probíhala při zkušební teplotě 15°C a zatěžování bylo rychlostí 1 mm/min. Takto nastavené parametry odpovídají doporučením z práce [17]. Hlavním výstupem této zkoušky bude odolnost vůči lomu  $K_{Ic}$  [N/mm<sup>3/2</sup>], podle které bude snahou rozpoznat směs odolnější účinkům nejen šíření trhliny, ale také stárnutí. Většina měření totiž proběhla na zestárlých tělesech. Odolnost vůči lomu by mohla být teoreticky v tomto případě a za daných podmínek průběhu zkoušky považována za odolnost vůči šíření únavové trhliny.

#### 4.3.3.1 Odolnost vůči lomu na tělesech zestárlých metodou 5d@85°C

V tabulkách 8, 9 a 10 jsou výsledky pro jednotlivé typy směsí získané zkouškou šíření trhliny ohybem na půlválcovém tělese. V prvním sloupci je hodnota maximální síly při porušení, která se zaznamenává přímo z měřicího přístroje. V druhém sloupci je relativní přetvoření (průměrná hodnota z jednotlivých zkušebních těles) při vzniku trhliny. Ve třetím sloupci je hodnota maximálního napětí při porušení, tedy ve chvíli kdy se začíná šířit trhlina. V posledním sloupci jsou hodnoty odolnosti vůči lomu (nebo také lomové houževnatosti), které byly spočteny z naměřených hodnot.

Tabulka 8: Výsledky zkoušky šíření trhliny na zestárlých tělesech 5d@85°C - směsi ACO

Označení	Max. síla při porušení	Relativní přetvoření	Max. napětí při porušení	Odolnost proti lomu
	F [kN]	$\epsilon$ [-]	$\sigma$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$K_{Ic}$ [N/mm <sup>3/2</sup> ]
A1	3,83	2,97	3,06	22,8
A2	4,01	3,03	3,33	24,6
A3	3,11	2,15	2,60	19,2
A4	4,72	2,90	3,63	26,9
A5	3,90	1,99	3,25	24,2
A6	4,24	2,08	3,54	26,3
A7	5,07	2,05	4,26	31,6

Tabulka 9: Výsledky zkoušky šíření trhliny na zestárých tělesech 5d@85°C - směsi ACL

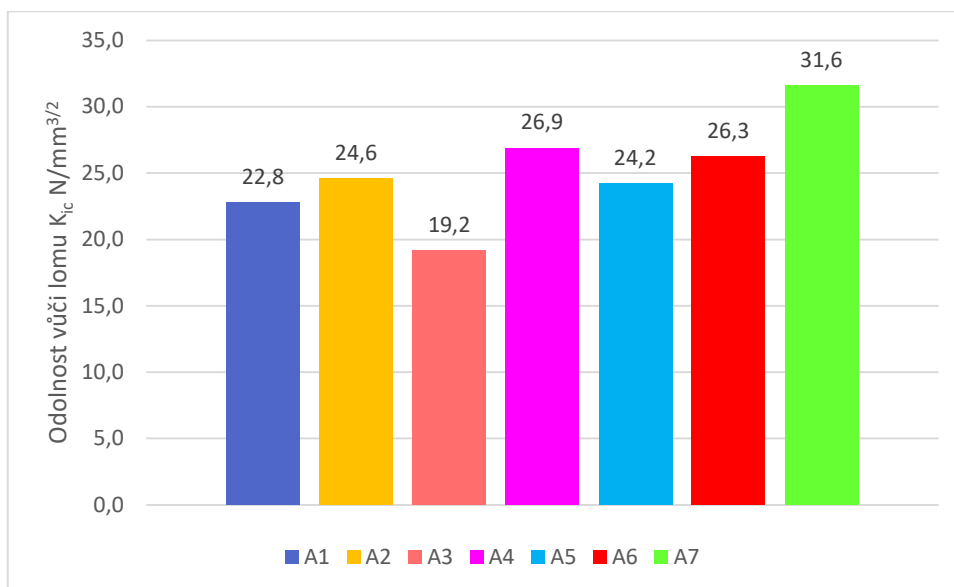
Označení	Max. síla při porušení	Relativní přetvoření	Max. napětí při porušení	Odolnost proti lomu
	F [kN]	$\epsilon$ [-]	$\sigma$ [N/mm <sup>2</sup> ]	K <sub>ic</sub> [N/mm <sup>3/2</sup> ]
B1	3,25	2,39	2,78	20,7
B2	5,15	2,14	4,34	32,3
B3	5,71	2,81	4,83	35,9
B4	3,02	1,68	2,58	19,2
B6	4,81	1,96	4,06	30,2
B7	4,05	2,54	3,42	25,4
B8	3,67	1,47	3,06	22,7
B9	4,82	2,34	4,04	30,1

Tabulka 10: Výsledky zkoušky šíření trhliny na zestárých tělesech 5d@85°C - směsi ACP

Označení	Max. síla při porušení	Relativní přetvoření	Max. napětí při porušení	Odolnost proti lomu
	F [kN]	$\epsilon$ [-]	$\sigma$ [N/mm <sup>2</sup> ]	K <sub>ic</sub> [N/mm <sup>3/2</sup> ]
C1	4,66	2,23	3,71	27,6
C2	4,59	2,42	3,83	28,4
C3	5,98	2,46	4,94	36,3
C4	3,50	1,42	2,76	20,5

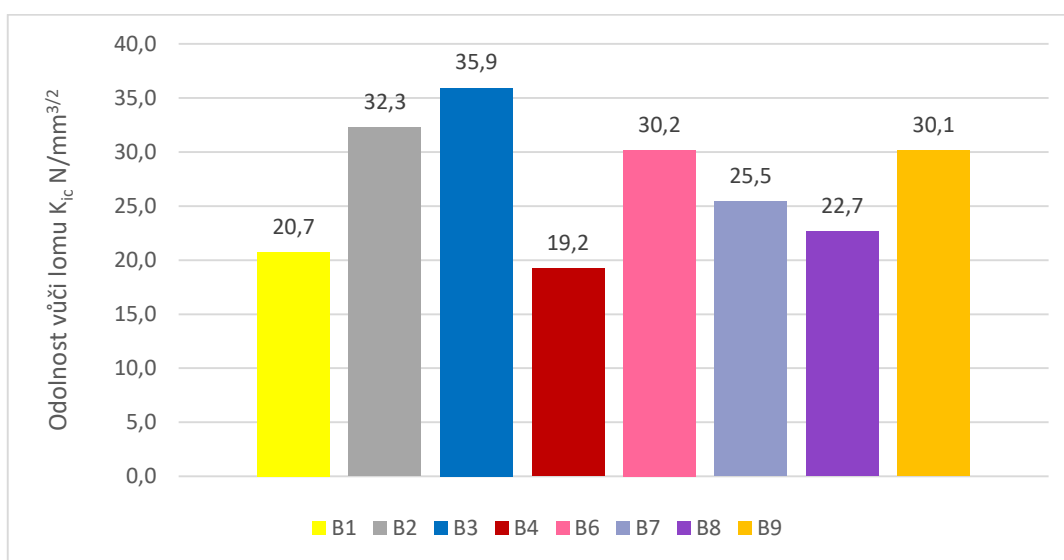
Pro přehlednější porovnání hodnot odolnosti vůči lomu jednotlivých směsí jsou uvedeny grafy 16, 17 a 18.

Graf 16: Odolnost vůči lomu při 15°C směsí typu ACO zestárých 5d@85°C



Z grafu 16 pro směsi typu ACO je patrné, že nejvyšší odolnost vůči lomu dosáhla směs A7 (ACO11+), která zároveň dosahovala nejvyšší tuhosti ze všech směsí ACO. Zároveň její index stárnutí byl 1,10 a patřil tak mezi nižší hodnoty. Směs A4 (ACO11S PmB), jejíž index stárnutí byl druhý nejnižší také dosáhla vysoké hodnoty odolnosti vůči lomu. Indexy stárnutí směsí A4 a A6 ovšem byly v rámci směsí ACO nejvyšší a i přes to dosáhly tyto směsi vysokých hodnot odolnosti vůči lomu. Nejhůře však překvapivě vyšla směs A3 (ACO11S PmB 45/80-55). Teoreticky by to mohlo být tím, že použité pojivo je poměrně měkké s nízkým bodem měknutí a i samotná tuhost této směsi byla ze všech směsí ACO nejnižší. Z těchto výsledků se tedy bohužel nedá jednoznačně určit závislost hodnoty odolnosti vůči lomu směsi na jejím indexu stárnutí. Funguje zde však poměrně dobře závislost, že čím má směs nižší mezerovitost, tím vyšší je její odolnost vůči šíření trhliny i po stárnutí.

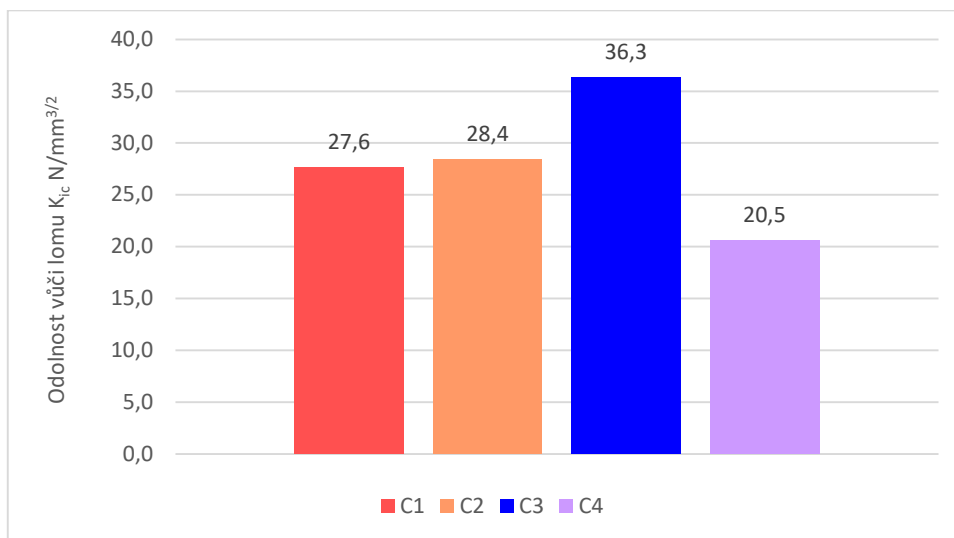
**Graf 17: Odolnost vůči lomu při 15°C směsí typu ACL zestárlych 5d@85°C**



V grafu 17 jsou uvedeny hodnoty odolnosti vůči lomu pro směsi typu ACL. Výsledky téměř kopírují porovnání výsledků modulů tuhostí směsí. Nejvyšší odolnosti vůči lomu dosáhla směs B3 s vlákny Forta FI, která také vykazovala nejvyšší tuhost, ale i poměrně nízký index stárnutí. Opět zde však můžeme pozorovat, že směs s nejnižším indexem stárnutí B4 dosáhla nejnižší hodnoty odolnosti vůči lomu. K tomu jevu došlo také u směsi A3. Zároveň se zde vyvrací tvrzení spojené s použitým pojivem u směsi A3, protože směs B6 obsahuje pojivo shodné (PmB 45/80-55) a její odolnost vůči lomu rozhodně nepatří mezi nejnižší. Z výsledků tedy vyplývá, že zde funguje spíše závislost mezi hodnotou

modulu tuhosti a odolností vůči lomu, než-li spojení s hodnotou indexu stárnutí. Dalo by se však říci, že směsi obsahující silniční pojivo 50/70 (A1 a B1) vykazují celkově po stárnutí nižší odolnosti vůči lomu než směsi s použitím modifikovaných pojiv PmB. Z hlediska odolnosti vůči lomu zestárlých směr se zde velmi dobře jeví pojivo PmB 25/55-55 užití ve směsích B2 a B3.

Graf 18: Odolnost vůči lomu při 15°C směsí typu ACP zestárlých 5d@85°C

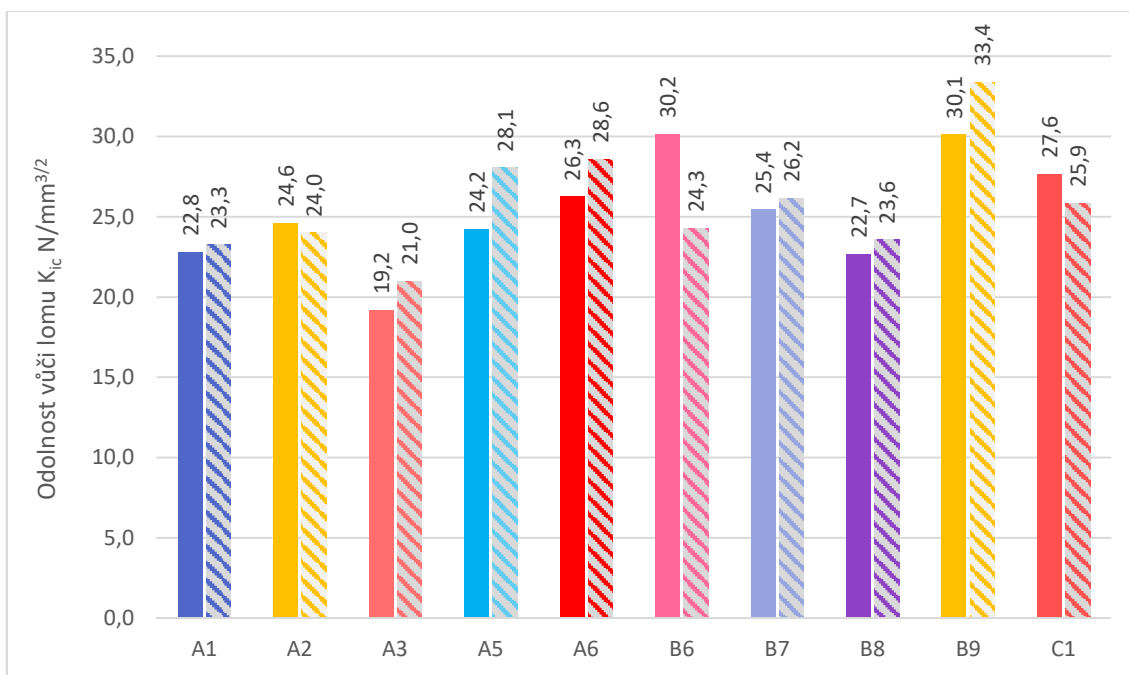


Graf 18 zobrazuje výsledky zkoušky pro směsi typu ACP. I u těchto směsí funguje závislost mezi hodnotou tuhosti směsi a její odolností vůči lomu, až na směs C4 (ACP22+). U této směsi bylo také během měření pozorováno, že hodnoty měřené síly i deformace velmi rychle rostly až do vzniku trhliny. To by mohlo signalizovat právě křehké chování směsi, kdy je kolaps (vznik trhliny) bez předchozího varování a směs není schopna absorbovat přijímanou energii prostřednictvím přetvoření. Směs C3 s použitím velmi tvrdého silničního asfaltu 20/30 dosáhla vysoké hodnoty odolnosti vůči lomu po stárnutí. U této směsi byl index stárnutí velmi nízký a její mezerovitost byla ze směsí ACP nejnižší. Zde by tedy také mohlo platit, že díky malé mezerovitosti byla směs stárnutím méně ovlivněna a i přes účinky stárnutí vykazuje vysokou odolnost vůči šíření trhliny.

### 4.3.3.2 Porovnání vlivu druhu stárnutí na odolnost vůči lomu

V grafu 19 je uvedeno porovnání hodnot odolnosti vůči lomu směsí, u kterých byla zkouška šíření trhliny provedena na tělesech zestárých metodami 5d@85°C a 10d@85°C.

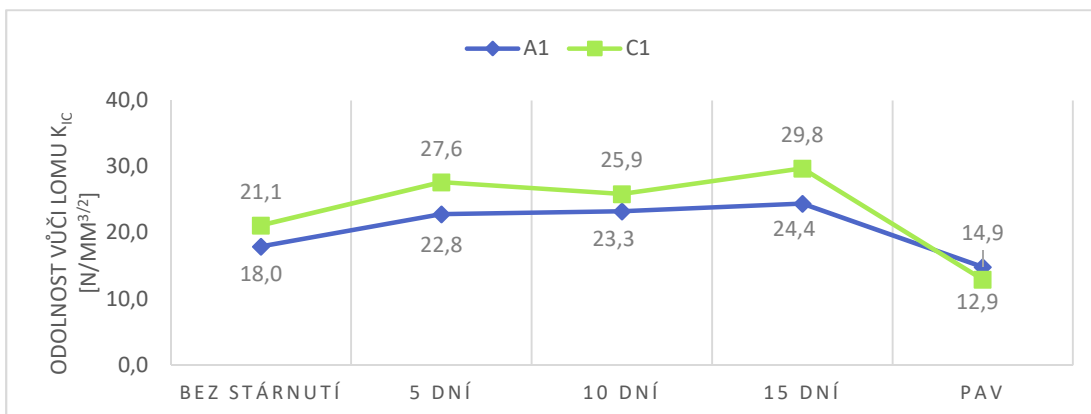
Graf 19: Porovnání odolnosti vůči lomu těles zestárých 5d@85°C a 10d@85°C



První sloupec vždy odpovídá hodnotám naměřeným na tělesech zestárých metodou 5d@85°C, druhý (šrafovaný) sloupec odpovídá hodnotám po stárnutí 10d@85°C. Jak je vidět z grafu, většina směsí vlivem delšího stárnutí získává dokonce vyšší odolnost vůči lomu.

Další porovnání vlivu metody stárnutí na odolnost vůči lomu je v grafu 20.

Graf 20: Porovnání vlivu metody stárnutí na odolnost vůči lomu

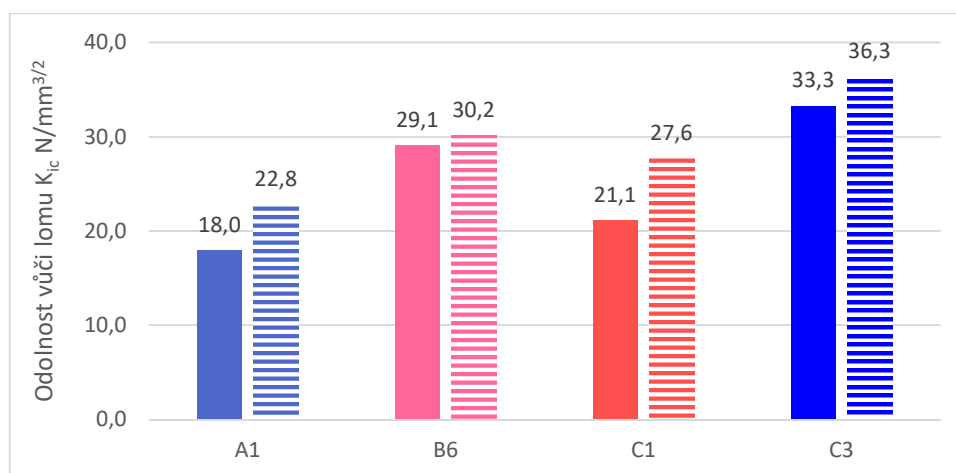


I zde je možné pozorovat trend, že čím delší je simulace stárnutí směsi, tím vyšší hodnoty odolnosti vůči šíření trhliny směs vykazuje. Tento trend odpovídá křivce nárůstu tuhosti v závislosti na délce stárnutí směsi z kapitoly 4.3.2.2. Hodnoty odolnosti vůči lomu na tělesech zestárlých metodou PAV jsou uvedeny pouze pro ilustraci. Jak již bylo zmíněno, tato tělesa byla vlivem vysoké teploty a tlaku zdeformována natolik, že na nich nešlo ani změřit modul tuhosti. Po seříznutí na půlválce se podařilo získat výsledky odolnosti vůči lomu, které prokázaly, že byla narušena i vnitřní struktura těles.

Z grafu 18 je také vidět, že směs C1 (VMT22 30/45) dosahovala celkově vyšší odolnosti vůči lomu než směs A1 (SMA11 50/70), což je v souladu s očekáváním.

Pro porovnání odolnosti vůči lomu směsí před a po stárnutí slouží graf 21.

**Graf 21: Odolnost vůči lomu směsí před a po stárnutí 5d@85°C**



Výsledky ukázaly poměrně nečekaný trend, a to že vlivem stárnutí se odolnost vůči lomu všech čtyř směsí navýšila. To by znamenalo, že navýšení tuhosti směsi vlivem stárnutí nemusí nutně znamenat její zkřehnutí. Tato skutečnost byla již pozorována v rámci dalších experimentů probíhajících v laboratořích na Fakultě stavební ČVUT v Praze a do jisté míry odpovídá i dalším zkušenostem ze zahraničí. Vysvětlení tohoto nečekaného výsledku by mohlo spočívat v průběhu změn, ke kterým může docházet při laboratorní simulaci stárnutí. Během simulace stárnutí jsou zkušební tělesa dlouhou dobu vystavena teplotě 85°C, což je teplota přesahující bod měknutí většiny asfaltových pojiv. Pojivo v důsledku zvýšené teploty snižuje svou viskozitu a pravděpodobně může docházet k zvýšení koheze v důsledku vpínetování pojiva do kameniva a vyplnění některých mezer. Tomu by odpovídala změna mezerovitosti u všech těchto směsí (s výjimkou směsi



C3, u které nebyla zjišťována). U směsí A1, B6 i C1 došlo v důsledku stárnutí metodou 5d@85°C ke snížení mezerovitosti. To potvrzuje výše uvedenou domněnku. Pro jisté potvrzení této myšlenky by však bylo nutné provést rozsáhlejší výzkum.

Otázkou by zde také mělo být to, zda pouhé navýšení odolnosti vůči lomu nutně znamená to, že je směs méně křehká. Pro lepší interpretaci těchto výsledků by bylo do budoucna zajímavé sledovat vývoj zatěžovací síly a vzniklé deformace během této zkoušky kontinuálně a mít tak možnost stanovit lomovou energii pro jednotlivé směsi. Tak by bylo možné sledovat chování směsi nejen ve chvíli vzniku trhliny, ale i během jejího šíření až do úplného kolapsu tělesa.

Tyto výsledky jsou nicméně minimálně důvodem k zamyšlení, zda užívané metody laboratorní simulace stárnutí opravdu odpovídají dějům, které probíhají ve skutečných konstrukcích vozovek. Zároveň by tyto výsledky mohly sloužit jako určitá motivace pro další výzkum nových metod simulace stárnutí v laboratorních podmínkách.

## 5 ZÁVĚR

Tato práce byla zaměřena na zjištění vlivu laboratorního stárnutí (simulace účinku dlouhodobého stárnutí) na tuhost a odolnost vůči lomu (lomovou houževnatost) asfaltových směsí. V první části práce byly představeny metody stárnutí asfaltových směsí, metody měření modulu tuhosti asfaltových směsí a také zahraniční poznatky ke zkoušce šíření trhliny zkouškou ohybem na půlválcovém tělese. Na základě těchto teoretických poznatků byly zvoleny metody stárnutí pro zkoušené asfaltové směsi, metoda stanovení modulu tuhosti a také parametry pro zkoušku šíření trhliny.

Předpokladem bylo, že vlivem simulace stárnutí dojde u směsí ke zvýšení tuhosti, ale také křehkosti, což se mělo projevit právě u zkoušky šíření trhliny.

K dispozici byly asfaltové směsi typu ACO (pro obrusné vrstvy), ACL (pro ložní vrstvy) i ACP (pro podkladní vrstvy). Směsi byly dle počtu těles rozděleny do skupin pro jednotlivé metody stárnutí (5, 10 nebo 15 dní při teplotě 85°C a metoda PAV).

Na všech tělesech byl nejdříve měřen modul tuhosti metodou IT-CY. Následně byla tělesa vystavena účinkům zvolené metody stárnutí. U vybraných těles byla zjišťována změna objemové hmotnosti a mezerovitosti vlivem stárnutí. Výsledky ukázaly, že v podstatě u všech sledovaných směsí došlo ke změně mezerovitosti v důsledku laboratorní simulace stárnutí. Na zestárlých tělesech byl poté měřen modul tuhosti. Výsledky u všech směsí potvrdily předpoklad, že vlivem stárnutí dojde k navýšení tuhosti. Sledovaným parametrem byl také index stárnutí (poměr tuhosti po a před stárnutím). Čím vyšší je hodnota indexu stárnutí, tím více je směs stárnutím ovlivněna z hlediska navýšení tuhosti. Z hlediska hodnot indexu stárnutí vycházely nejméně ovlivněny směsi A7, A3 a A4 ze skupiny ACO, B3, B4 a B5 ze skupiny ACL a směs C3 ze skupiny ACP. Celkově se hodnoty indexu stárnutí pohybovaly mezi 1,04 a 1,30 (pro metodu stárnutí 5 dní). Z porovnání indexů stárnutí pro metodu stárnutí po dobu 10 dní vyšlo najevo, že směsi obsahující modifikovaná pojiva jsou vůči účinkům stárnutí odolnější. Dalším poznatkem bylo, že zvýšení tuhosti směsi vlivem stárnutí se více projeví při vyšších zkušebních teplotách. Z hlediska zkoušených metod stárnutí se dá říci, že čím déle probíhá simulace stárnutí směsi, tím se její tuhost navyšuje. Více se tento jev projevil u vyšší zkušební teploty.

Zestárlá zkušební válcová tělesa byla po změření modulů tuhosti nařezána na půlválce, na kterých probíhala zkouška šíření trhliny. Zkouška však probíhala za speciálních podmínek (zkušební teplota 15°C, zatěžovací rychlost 1 mm/min), které vycházejí ze zahraničních poznatků a mají víceméně simulovat podmínky pro zkoušení únavových vlastností asfaltových směsí. Výsledná hodnota odolnosti vůči lomu (lomová houževnatost nebo také odolnost vůči šíření trhliny) by se tedy teoreticky dala považovat za hodnotu odolnosti vůči šíření únavové trhliny.

Výsledky zkoušky pro tělesa zestárlá metodou 5d@85°C ukázaly, že pro zkoušené směsi nebyla nalezena přímá souvislost mezi hodnotou indexu stárnutí a odolností vůči lomu. Na druhou stranu se však ukázala poměrně dobře závislost, že čím má směs nižší mezerovitost, tím vyšší je její odolnost vůči šíření trhliny i po stárnutí. Z hlediska odolnosti vůči šíření trhliny (lomu) vyšly nejlépe směsi A7, A4 a A6 ze skupiny ACO, B2, B3 a B6 ze skupiny ACL a směs C3 ze skupiny ACP. Směsi A7, A4, B3 a C3 vycházely nejlépe i z hlediska indexů stárnutí. Tyto 4 směsi by se zde tedy daly označit jako nejméně náchylné účinkům stárnutí.

V závěru práce byl ukázán fenomén, že hodnota odolnosti vůči lomu narůstá s délkou laboratorní simulace stárnutí. V posledním grafu bylo také porovnání hodnot odolnosti vůči lomu asfaltových směsí před a po stárnutí metodou 5d@85°C. Z těchto poznatků by se dalo říci, že navýšení tuhosti směsi vlivem stárnutí nemusí nutně znamenat její zkřehnutí a náchylnost ke vzniku trhlin. Vysvětlením však mohou být procesy probíhající během umělé simulace stárnutí v laboratoři, kdy je těleso vystaveno po dlouhou dobu teplotě 85°C, což je teplota vyšší než bod měknutí asfaltového pojiva. V důsledku takto vysoké teploty pojivo snižuje svou viskozitu a může dojít k vpenetrování pojiva do kameniva a vyplnění některých mezer. Tomu by odpovídalo i snížení mezerovitosti sledovaných směsí v důsledku stárnutí.

Otázkou do budoucího výzkumu by mohlo být to, zda pouhé navýšení odolnosti vůči lomu opravdu znamená, že je směs méně křehká. Abychom mohli chování směsi během této zkoušky lépe popsat a pochopit, bylo by lepší kontinuálně zaznamenávat vývoj zatěžování a vzniklé deformace. Díky těmto údajům by bylo možné získat nejen odolnost vůči lomu, ale také lomovou energii, díky níž by bylo možné popsat chování směsi nejen ve chvíli vzniku trhliny, ale i během jejího šíření až do úplného kolapsu tělesa.

K získaným výsledkům lze dodat to, že v reálných podmínkách přirozeně zestárlé směsi ukazují opak, tedy nárůst tuhosti a křehkosti v průběhu životnosti směsi ve vozovce. Tato skutečnost by tedy měla vést k zamyšlení, zda používané metody laboratorní simulace stárnutí opravdu odpovídají dějům, které ve vozovce v průběhu její životnosti nastávají. Prioritou v dalším výzkumu by tedy také měla být snaha o vývoj a testování nových metod laboratorního stárnutí směsí, pro lepší možnost pochopení skutečných dějů způsobených stárnutím.

## Reference

1. *Aktuální poznatky k aspektům stárnutí asfaltových pojiv a směsí.* **Dr. Hofko, Bernhard.** Technische Universität Wien : POZEMNÍ KOMUNIKACE 2014, Trvale udržitelný rozvoj - realita nebo klišé?, 2014.
2. **Dr. Ing. Varaus, Michal.** Pozemní komunikace II. *Asfaltová pojiva.* Brno : VUT, 2005.
3. **Bc. Strásáková, Monika.** Diplomová práce. *Stárnutí asfaltových pojiv.* Brno : VUT, 2016.
4. **Bc. Štěpanovský, Vlastimil.** Diplomová práce. *Problematika stárnutí asfaltových pojiv a směsí.* Brno : VUT, 2015.
5. *Vliv stárnutí na tuhost a únavovou trhlinu na příkladu ACL směsí.* **Dočkalová, A. a Valentin, J.** Praha : TRINfra, 2016.
6. **PrEN 12697-52:2013.** Bituminous mixtures - test methods - Part 52. *Conditioning address oxidative ageing.* 2014.
7. **AASHTO.** R 30-02. *Standart practice for mixture conditioning of Hot-Mix Asphalt (HMA).* místo neznámé : American Asociation of State and Highway Transportation Officials, 2015.
8. **Bell, C.A., a další.** Strategic Highway Research Program. *Selection of Laboratory Aging Procedures for Asphalt-Aggregate Mixtures.* Washington : autor neznámý, 1994.
9. **Steiner, D, a další.** International Journal of Pavement Engineering. *Towards an optimised lab procedure for long-term oxidative ageing of asphalt mix specimen.* Vienna : Vienna Iniversity of Technology, 2015.
10. **Valentová, T. a Altman,J. JUNIORSTAV.** *Stabilita ashezního účinku vybraných minerálních a chemických přísad u zestárlé asfaltové směsi.* Praha : ČVUT, 2016.
11. **ČSN EN 12697 - 26.** Asfaltové směsi - Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka- Část 26: Tuhost. Praha : Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, Září 2012.

12. **ČSN EN 12697 - 29.** Asfaltové směsi - Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka- Část 29: Stanovení rozměrů asfaltových zkušebních těles. Praha : Český normalizační institut, Červenec 2003.
13. **ČSN EN 12697 - 44.** Asfaltové směsi - Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka- Část 44: Šíření trhliny zkouškou ohybem na půlválcovém zkušebním tělese. Praha : Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, Březen 2011.
14. **Molenaar, J. M. M., et.al.** Sixth International RILEM Symposium on Performance Testing and Evaluation of Bituminous Materials. *Resistance to crack-growth and fracture of asphalt mixtures*. Chicago : Illinois, 1997.
15. **Li, X. a Marasteanu, M.** *Evaluation of the Low Temperature Fracture Resistance of Asphalt Mixtures using the Semi Circular Bend Test*. místo neznámé : Journal of the Association of Asphalt Paving Technologies, 2004.
16. **Biligiri, K.P., Said, S. a Hakim, H.** International Journal of Pavement Research and Technology. *Asphalt Mixtures' Crack Propagation Assessment using Semi-Circular Bending Tests*. Linköping, Sweden : autor neznámý, 2012.
17. **Nsengiyumva, G.** PhD thesis. *Development of Semi-Circular Bending (SCB) Fracture Test for Bituminous Mixtures*. Nebraska : University of Nebraska-Lincoln, 2015.
18. **AASHTO.** *Determining the Fracture Energy of Asphalt Mixtures Using the Semi Circular Bend Geometry (SCB)*. místo neznámé : AASHTO.
19. **ČSN EN 12697 - 6.** Asfaltové směsi - Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka- Část 6: Stanovení objemové hmotnosti asfaltového zkušebního tělesa. Praha : Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, Listopad 2012.
20. *Characterization of aging processes on the asphalt mixture surface.* **Lopes, M. M., Zhao, Dan a Chailleux, Emmanuel.** France : 2nd International Symposium on Asphalt Pavements et Environment, 2012.
21. **Kotoušová, A.** Bakalářská práce. *Vícenásobná recyklace u směsí recyklovaných za studena*. Praha : ČVUT, 2015.
22. **Dočkalová, A.** Bakalářská práce. *Nové generace asfaltových směsí pro trvanlivé*

vozovky. Praha : ČVUT, 2015.

23. **Al-Qadi, I., Lambros, J. a et.al.** *Testing Protocols to Ensure Performance of High Asphalt Binder Replacement Mixes Using RAP and RAS.* Illinois : Illinois Center for Transportation, 2015.

24. **Huang, B., Shu, X. a Zuo, G.** *Using notched semi circular bending fatigue test to characterize fracture resistance of asphalt mixtures.* Knoxville : University of Tennessee, 2013.

25. **Khalid, H.A. a Monney, O.K.** *Moisture Damage Potential of Cold Asphalt.* místo neznámé : International Journal of Pavement Engineering, 2009.

26. **Roque, R. a Koh, C.** *Introduction of Fracture Resistance to the Design and Evaluation of Open Graded Friction Course in Florida.* Florida : University of Florida, 2009.

## Seznam obrázků

Obrázek 1 : Schématické znázornění asfaltové směsi [1].....	11
Obrázek 2: Proces dlouhodobého stárnutí a vznik poruch vozovky.....	14
Obrázek 3: Přehled vybraných metod pro simulaci laboratorního stárnutí [21].....	15
Obrázek 4: Schéma vídeňské metody simulace dlouhodobého stárnutí [1] .....	16
Obrázek 5: Těleso zajištěné proti nežádoucí deformaci [10] .....	17
Obrázek 6: Zdeformované těleso .....	17
Obrázek 7: Přístroj PAV .....	18
Obrázek 8: Základní vzorec modulu tuhosti.....	19
Obrázek 9: Ověření ukotvení [11] .....	20
Obrázek 10: Stručné schéma zkoušky 2PB-TR [11] .....	21
Obrázek 11: Schéma 3PB-PR .....	21
Obrázek 12: Schéma 4PB-PR .....	21
Obrázek 13: Princip zkoušky 4PB-PR.....	22
Obrázek 14: Zkouška IT-CY [11].....	23
Obrázek 15: Schéma upevnění zkoušky DTC-CY [11].....	24
Obrázek 16: Podstat zkoušky DT-CY [11].....	25
Obrázek 17: Schéma uspořádání zkoušky CIT-CY [11] .....	26
Obrázek 18: Schéma zkoušky šíření trhliny na půlválcovém tělese [13].....	27
Obrázek 19: Oblast platnosti zkoušky .....	28
Obrázek 20: Závislost svislé deformace ve směru zatížení a aplikovaného zatížení (směs s 4,4 % pojiva vlevo, směs s 5,4 % pojiva vpravo) [16].....	29
Obrázek 21: Vliv tloušťky tělesa na výsledky SCB testu [17] .....	30
Obrázek 22: Vliv teploty na hodnoty lomové energie a variační koeficient [17].....	31
Obrázek 23: Plocha pod křivkou = práce působícího zatížení [17].....	33
Obrázek 24: Záznam průběhu měření modulu tuhosti.....	37
Obrázek 25: Zařízení pro měření modulu tuhosti.....	38
Obrázek 26: Zkušební zařízení pro zkoušku šíření trhliny na půlválcovém zkušebním tělese .....	41
Obrázek 27: Kontrola trhliny .....	42
Obrázek 28: Drcení tělesa v místě uložení na zkušební zařízení.....	42



Obrázek 29: Zdeformované těleso metodou PAV .....	45
---	----

## Seznam tabulek

Tabulka 1: Doporučené parametry [17].....	32
Tabulka 2: Přehled použitých směsí a jejich základních vlastností.....	36
Tabulka 3: Měření modulu tuhosti při různých teplotách.....	39
Tabulka 4: Přehled metod stárnutí u jednotlivých směsí.....	40
Tabulka 5: Změny objemových hmotností a mezerovitostí u směsí ACO.....	43
Tabulka 6: Změny objemových hmotností a mezerovitostí u směsí ACL.....	44
Tabulka 7: Změny objemových hmotností a mezerovitostí u směsí ACP.....	44
Tabulka 8: Výsledky zkoušky šíření trhliny na zestárlých tělesech 5d@85°C - směsi ACO.....	58
Tabulka 9: Výsledky zkoušky šíření trhliny na zestárlých tělesech 5d@85°C - směsi ACL.....	59
Tabulka 10: Výsledky zkoušky šíření trhliny na zestárlých tělesech 5d@85°C - směsi ACP.....	59
Tabulka 11: Moduly tuhosti - směs A.....	75
Tabulka 12: Moduly tuhosti - směs B.....	76
Tabulka 13: Moduly tuhosti - směsi S1-S5 před stárnutím.....	77
Tabulka 14: Moduly tuhosti - směs S6-S12 před stárnutím.....	77
Tabulka 15: Moduly tuhosti - směsi C, D, E před stárnutím.....	78
Tabulka 16: Moduly tuhosti - směs G, MT, VMT před stárnutím.....	79
Tabulka 17: Moduly tuhosti - směsi S1-S5 zestárlé.....	80
Tabulka 18: Moduly tuhosti - směsi S6-S12 zestárlé.....	80
Tabulka 19: Moduly tuhosti - směsi C, D, E zestárlé.....	81
Tabulka 20: Moduly tuhosti - směsi G, MT, VMT zestárlé.....	82
Tabulka 21: Šíření trhliny - směs A.....	83
Tabulka 22: Šíření trhliny - směs B.....	84
Tabulka 23: Šíření trhliny - směsi C, D, E, G, MT, VMT.....	85
Tabulka 24: Šíření trhliny - směsi S nezestárlé.....	86
Tabulka 25: Šíření trhliny - směsi S 10 dní zestárlé.....	86
Tabulka 26: Šíření trhliny - směsi S 5 dní zestárlé.....	87

## Seznam grafů

Graf 1: Moduly tuhosti směsí typu ACO při 15°C před a po stárnutí 5d@85°C .....	46
Graf 2: Indexy stárnutí směsí typu ACO při zkušební teplotě 15°C po stárnutí 5d@85°C .....	46
Graf 4: Indexy stárnutí směsí typu ACL při zkušební teplotě 15°C po stárnutí 5d@85°C .....	48
Graf 3: Moduly tuhosti směsí typu ACL při zkušební teplotě 15°C před a po stárnutí 5d@85°C .....	48
Graf 5: Moduly tuhosti směsí typu ACP při zkušební teplotě 15°C před a po stárnutí 5d@85°C .....	49
Graf 6: Indexy stárnutí směsí typu ACP při zkušební teplotě 15°C po stárnutí 5d@85°C .....	50
Graf 7: Moduly tuhosti při zkušební teplotě 15°C před a po stárnutí 10d@85°C .....	51
Graf 8: Indexy stárnutí směsí při zkušební teplotě 15°C po stárnutí 10d@85°C .....	51
Graf 9: Moduly tuhosti směsí před stárnutím, po stárnutí 5d@85°C a 10d@85°C .....	52
Graf 10: Indexy stárnutí směsí po stárnutí 5d@85°C a 10d@85°C .....	52
Graf 11: Porovnání modulů tuhosti pro různé metody stárnutí při různých zkušebních teplotách .....	53
Graf 12: Vývoj indexu stárnutí dle metody stárnutí - směs A1 .....	54
Graf 13: Vývoj indexu stárnutí dle metody stárnutí - směs C1 .....	55
Graf 14: Moduly tuhosti před a po stárnutí 5 dní při různých zkušebních teplotách .....	56
Graf 15: Vývoj indexu stárnutí v závislosti na zkušební teplotě .....	57
Graf 16: Odolnost vůči lomu při 15°C směsí typu ACO zestárlých 5d@85°C .....	59
Graf 17: Odolnost vůči lomu při 15°C směsí typu ACL zestárlých 5d@85°C .....	60
Graf 18: Odolnost vůči lomu při 15°C směsí typu ACP zestárlých 5d@85°C .....	61
Graf 19: Porovnání odolnosti vůči lomu těles zestárlých 5d@85°C a 10d@85°C .....	62
Graf 20: Porovnání vlivu metody stárnutí na odolnost vůči lomu .....	62
Graf 21: Odolnost vůči lomu směsí před a po stárnutí 5d@85°C .....	63

# Přílohy

Tabulka 11: Moduly tuhosti - směs A

Teplota (°C)	Těleso		Průměr	Výška	Modul tuhosti		Povolená odchylka od Ø +10%,-20%	
			Ø (mm)	h (mm)	Průměr (MPa)	Modul tuhosti (MPa)		
0°C	A-VMT 22	6	100,7	52,7	23 417	24019	-2,51%	ok
		7	100,7	53,0	24 091		0,30%	ok
		8	101,3	52,3	24 549		2,21%	ok
15°C	AZALT 30/45 stárnutí 5dní	6	100,7	63,3	10 071	9783	2,94%	ok
		7	100,7	63,4	9 340		-4,53%	ok
		8	101,3	62,9	9 938		1,58%	ok
27°C		6	100,7	63,3	3 744	3592	4,23%	ok
		7	100,7	63,4	3 399		-5,36%	ok
		8	101,3	62,9	3 633		1,14%	ok
0°C	A-VMT 22	9	101,2	52,9	19 484	25132	-22,47%	KO
		10	101,2	51,8	23 971		-4,62%	ok
		11	101,6	52,2	26 294		4,62%	ok
15°C	AZALT 30/45 stárnutí 10dní	9	101,2	62,6	8 324	11727	-29,02%	KO
		10	101,2	62,7	11 455		-2,32%	ok
		11	101,6	62,9	11 999		2,32%	ok
27°C		9	101,2	62,6	2 863	4313	-33,61%	KO
		10	101,2	62,7	4 004		-7,17%	ok
		11	101,6	62,9	4 622		7,17%	ok
0°C	A-VMT 22	15	100,9	52,2	19 680	19997	-1,58%	ok
		16	100,7	47,6	20 313		1,58%	ok
		17	101,0	51,8	30 018		50,11%	KO
15°C	AZALT 30/45 stárnutí 15dní	15	100,9	63,3	8 387	11802	-28,94%	KO
		16	100,7	64,1	10 779		-8,67%	ok
		17	101,0	62,6	12 826		8,67%	ok
27°C		15	100,9	63,3	3 234	5393	-40,05%	KO
		16	100,7	64,1	5 037		-6,61%	ok
		17	101,0	62,6	5 750		6,61%	ok

Tabulka 12: Moduly tuhosti - směs B

			Průměr	Výška	Modul tuhosti		Povolená odchylka od $\varnothing$ +10%,-20%	
Teplota	Těleso		$\varnothing$	h	Průměr	Modul tuhosti		
(°C)			(mm)	(mm)	(MPa)	(MPa)		
0°C	B-SMA CIUR stárnutí 5dní	4	100,7	52,6	22 265	23023	-3,29%	ok
		5	100,2	52,4	23 929		3,93%	ok
		6	100,9	52,8	22 875		-0,64%	ok
15°C		4	100,7	66,0	7 915	8171	-3,14%	ok
		5	100,2	66,2	8 602		5,27%	ok
		6	100,9	66,9	7 998		-2,13%	ok
27°C		4	100,7	66,0	2 285	2376	-3,83%	ok
		5	100,2	66,2	2 477		4,27%	ok
		6	100,9	66,9	2 365		-0,44%	ok
0°C	B-SMA CIUR stárnutí 10dní	7	101,2	65,3	22 516	20849	7,99%	ok
		8	100,8	65,4	18 362		-11,93%	ok
		9	100,6	66,0	21 671		3,94%	ok
15°C		7	101,2	65,3	9 856	9494	3,81%	ok
		8	100,8	65,4	6 870		-27,63%	KO
		9	100,6	66,0	9 132		-3,81%	ok
27°C		7	101,2	65,3	2 915	2779	4,91%	ok
		8	100,8	65,4	2 127		-23,45%	KO
		9	100,6	66,0	2 642		-4,91%	ok
0°C	B-SMA CIUR stárnutí 15dní	10	101,3	64,7	21 465	21457	0,04%	ok
		11	100,8	64,7	21 266		-0,89%	ok
		12	100,7	66,0	21 642		0,86%	ok
15°C		10	101,3	64,7	8 436	9077	-7,06%	ok
		11	100,8	64,7	9 307		2,53%	ok
		12	100,7	66,0	9 487		4,52%	ok
27°C		10	101,3	64,7	2 919	2934	-0,52%	ok
		11	100,8	64,7	2 722		-7,22%	ok
		12	100,7	66,0	3 161		7,74%	ok

Tabulka 13: Moduly tuhosti - směsi S1-S5 před stárnutím

Směs	Teplota (°C)	Těleso		Průměr	Výška	Modul tuhosti		odchylka od Ø	
				Ø (mm)	h (mm)	Průměr (MPa)	Modul tuhosti (MPa)		
S1	15°C	ACO11S	1	103,1	62,7	6332	6378	+10%,-20%	
			2	102,1	64,4	6697		-0,72%	ok
			3	102,2	64,2	7193		5,00%	ok
			4	101,7	65,4	6468		12,78%	KO
			5	101,6	64,6	6328		1,40%	ok
			6	101,7	65,3	6066		-0,79%	ok
S2	15°C	REMIX (ACL16R)	7	101,6	64,3	9627	7677	-4,89%	ok
			8	101,6	64,3	9627		25,39%	KO
			9	101,7	64,6	9050		17,88%	KO
			11	102,3	63,7	6930		-9,74%	ok
			12	103,1	63,0	7974		3,86%	ok
			13	101,6	63,0	7709		0,41%	ok
S3	15°C	ACO11S	14	101,8	62,8	7726	5697	0,63%	ok
			15	101,6	63,5	8049		4,83%	ok
			29	101,9	64,9	5405		-5,13%	ok
			30	101,8	64,6	6002		5,35%	ok
S4	15°C	ACL16S	31	103,1	63,3	5653	8192	-0,78%	ok
			32	101,7	64,9	5729		0,56%	ok
			33	102,2	61,3	7545		-7,90%	ok
			34	102,1	61,7	8385		2,36%	ok
			35	101,6	62,8	8453		3,19%	ok
			36	102,2	62,2	8429		2,90%	ok
			41	103,2	61,9	8266		0,90%	ok
			42	102,2	63,0	8034		-1,93%	ok
S5	15°C	ACL16+	43	102,0	63,2	8434	5359	2,96%	ok
			44	101,7	63,7	7990		-2,47%	ok
			45	101,7	64,4	5292		-1,26%	ok
			46	102,0	64,0	5265		-1,76%	ok
			47	101,7	63,9	5271		-1,64%	ok
			48	102,1	64,1	5609		4,67%	ok

Tabulka 14: Moduly tuhosti - směs S6-S12 před stárnutím

Směs	Teplota (°C)	Těleso		Průměr	Výška	Modul tuhosti		odchylka od Ø	
				Ø (mm)	h (mm)	Průměr (MPa)	Modul tuhosti (MPa)		
S6	15°C	ACO11S	22	101,7	66,0	6381	6745	-5,39%	ok
			23	102,1	65,3	6960		3,19%	ok
			24	103,1	63,9	6894		2,21%	ok
S7	15°C	ACL16+	37	101,8	63,9	10010	10212	-1,98%	ok
			38	101,6	64,3	9940		-2,66%	ok
			39	101,8	63,8	10226		0,14%	ok
			40	101,6	63,9	10671		4,49%	ok
S8	15°C	ACP22+	19	102,2	65,0	11656	12124	-3,86%	ok
			20	101,7	65,3	12307		1,50%	ok
			21	101,6	65,9	12410		2,36%	ok
S9	15°C	ACL22S	25	101,7	67,9	10352	11285	-8,27%	ok
			26	101,8	67,0	11172		-1,01%	ok
			27	101,6	67,8	11581		2,62%	ok
			28	101,7	67,5	12037		6,66%	ok
S10	15°C	ACO11S	49	101,7	65,9	6906	7313	-5,58%	ok
			50	101,7	64,8	7547		3,20%	ok
			51	103,1	63,3	7464		2,06%	ok
S11	15°C	ACO16S	52	101,7	65,2	7337	8064	0,32%	ok
			53	101,8	65,2	7929		-1,68%	ok
			54	102,2	63,4	7508		-6,91%	ok
S12	15°C	ACO11+	55	101,8	64,1	8275	9666	2,61%	ok
			56	101,8	64,5	8546		5,97%	ok
			16	103,2	61,7	9101		-5,85%	ok
			17	101,7	63,4	10121		4,71%	ok
			18	101,8	63,3	9776	1,14%	ok	

Tabulka 15: Moduly tuhosti - směsi C, D, E před stárnutím

Teplota (°C)	Těleso		Průměr	Výška	Modul tuhosti		Povolená odchylka od $\varnothing$ +10%,-20%	
			$\varnothing$ (mm)	h (mm)	Průměr (MPa)	Modul tuhosti (MPa)		
0°C	C ACL 16S 50/70	C1	101,6	49,9	21 874	23265	-5,98%	ok
		C2	101,6	49,8	24 285		4,39%	ok
		C3	101,6	49,8	23 635		1,59%	ok
15°C		C1	101,6	49,9	9 098	9861	-7,74%	ok
		C2	101,6	49,8	10 258		4,02%	ok
		C3	101,6	49,8	10 228		3,71%	ok
27°C		C1	101,6	49,9	3 365	3635	-7,42%	ok
		C2	101,6	49,8	3 808		4,75%	ok
		C3	101,6	49,8	3 732		2,67%	ok
40 °C	C1	101,6	49,9	924	1007	-8,21%	ok	
	C2	101,6	49,8	1 052		4,50%	ok	
	C3	101,6	49,8	1 044		3,71%	ok	
0°C	D ACL 16S PmB	D1	101,6	49,9	28 104	27515	2,14%	ok
		D2	101,6	49,9	27 574		0,21%	ok
		D3	101,6	49,9	26 867		-2,35%	ok
15°C		D1	101,6	49,9	14 349	14098	1,78%	ok
		D2	101,6	49,9	13 374		-5,13%	ok
		D3	101,6	49,9	14 571		3,35%	ok
27°C		D1	101,6	49,9	6 112	6193	-1,30%	ok
		D2	101,6	49,9	6 107		-1,39%	ok
		D3	101,6	49,9	6 360		2,69%	ok
40 °C	D1	101,6	49,9	1 928	1991	-3,15%	ok	
	D2	101,6	49,9	1 895		-4,81%	ok	
	D3	101,6	49,9	2 149		7,95%	ok	
0°C	E ACL 16S PmB Forta FI	E1	101,6	49,8	25 635	25862	-0,88%	ok
		E2	101,6	49,8	25 525		-1,30%	ok
		E3	101,6	50,0	26 426		2,18%	ok
15°C		E1	101,6	49,8	16 868	17494	-3,58%	ok
		E2	101,6	49,8	17 550		0,32%	ok
		E3	101,6	50,0	18 065		3,26%	ok
27°C		E1	101,6	49,8	9 855	9808	0,48%	ok
		E2	101,6	49,8	9 596		-2,17%	ok
		E3	101,6	50,0	9 975		1,69%	ok
40 °C	E1	101,6	49,8	3 683	3709	-0,71%	ok	
	E2	101,6	49,8	3 512		-5,32%	ok	
	E3	101,6	50,0	3 933		6,04%	ok	

Tabulka 16: Moduly tuhosti - směs G, MT, VMT před stárnutím

Teplota (°C)	Těleso		Průměr	Výška	Modul tuhosti		Povolená odchylka od $\varnothing$ +10%,-20%	
			$\varnothing$ (mm)	h (mm)	Průměr (MPa)	Modul tuhosti (MPa)		
0°C	G ACP 22+ 50% RA	G1	101,6	49,9	18 827	18804	0,12%	ok
		G2	101,6	49,2	19 397		3,15%	ok
		G3	101,6	49,5	18 188		-3,28%	ok
15°C		G1	101,6	49,9	10 280	10882	-5,53%	ok
		G2	101,6	49,2	11 047		1,52%	ok
		G3	101,6	49,5	11 318		4,01%	ok
27°C		G1	101,6	49,9	5 004	5482	-8,71%	ok
		G2	101,6	49,2	5 506		0,43%	ok
		G3	101,6	49,5	5 936		8,28%	ok
40 °C		G1	101,6	49,9	1 906	1936	-1,54%	ok
		G2	101,6	49,2	1 968		1,64%	ok
		G3	101,6	49,5	1 934		-0,09%	ok
0°C	MT ACL 16+ RC MT	MT1	101,7	63,6	19243	18587	3,53%	ok
		MT2	102,9	62,7	19746		6,24%	ok
		MT3	101,5	56,4	18756		0,91%	ok
		MT4	101,8	57,4	16602		-10,68%	ok
15°C		MT1	101,7	63,6	10382	9573	8,45%	ok
		MT2	102,9	62,7	9677		1,08%	ok
		MT3	101,5	56,4	9075		-5,20%	ok
		MT4	101,8	57,4	9158		-4,34%	ok
27°C		MT1	101,7	63,6	3628	3483	4,17%	ok
		MT2	102,9	62,7	3764		8,08%	ok
		MT3	101,5	56,4	3334		-4,27%	ok
		MT4	101,8	57,4	3205		-7,98%	ok
40 °C		MT1	101,7	63,6	1252	1146	9,21%	ok
		MT2	102,9	62,7	1203		4,93%	ok
		MT3	101,5	56,4	1070		-6,63%	ok
		MT4	101,8	57,4	1060		-7,50%	ok
0°C	VMT22 20/30	4	103,3	62,2	18 399	18883	-2,56%	ok
		5	103,6	63,1	19 028		0,77%	ok
		6	103,9	62,9	19 222		1,79%	ok
15°C		1	104,0	62,2	13 852	14463	-4,23%	ok
		2	104,6	61,7	14 251		-1,47%	ok
		3	103,4	61,4	14 975		3,54%	ok
		4	103,3	62,2	14 247		-1,50%	ok
		5	103,6	63,1	14 263		-1,39%	ok
		6	103,9	62,9	15 193		5,04%	ok
27°C		4	103,3	62,2	3 640	3603	1,02%	ok
		5	103,6	63,1	3 630		0,73%	ok
		6	103,9	62,9	3 541		-1,74%	ok
40°C		1	104,0	62,2	2 828	2836	-0,28%	ok
		2	104,6	61,7	2 901		2,27%	ok
		3	103,4	61,4	2 780		-1,99%	ok



Tabulka 17: Moduly tuhosti - směsi S1-S5 zestárlé

Směs			Těleso	Průměr Ø (mm)	Výška h (mm)	Modul tuhosti		odchylka od Ø +10%,-20%		
	Teplota (°C)					Průměr (MPa)	Modul tuhosti (MPa)			
S1 zestárlá 5dní	15°C	ACO11S	1	103,1	62,7	7339	7650	-4,06%	ok	
			2	102,1	64,4	7675		0,32%	ok	
			3	102,2	64,2	7936		3,74%	ok	
S1 zestárlá 10dní	15°C	ACO11S	4	101,7	65,4	7146	7405	-3,50%	ok	
			5	101,6	64,6	7258		-1,98%	ok	
			6	101,7	65,3	7811		5,49%	ok	
S2 zestárlá 5dní	15°C	REMIX (ACL16R)	11	102,3	63,7	7224	8477	-14,78%	ok	
			12	103,1	63,0	8183		-3,46%	ok	
			13	101,6	63,0	8543		0,78%	ok	
			14	101,8	62,8	8901		5,01%	ok	
S3 zestárlá 5dní	15°C	ACO11S	15	101,6	63,5	9533	6015	12,46%	KO	
			29	101,9	64,9	5910		-1,75%	ok	
			30	101,8	64,6	5744		-4,51%	ok	
			31	103,1	63,3	6147		2,19%	ok	
S4 zestárlá 5dní	15°C	ACL16S	32	101,7	64,9	6260	9420	4,07%	ok	
			35	101,6	62,8	9435		0,15%	ok	
			36	102,2	62,2	9103		-3,37%	ok	
S4 zestárlá 10dní	15°C	ACL16S	41	103,2	61,9	9723	8713	3,21%	ok	
			42	102,2	63,0	8519		-2,23%	ok	
			43	102,0	63,2	9005		3,35%	ok	
S5 zestárlá 5dní	15°C	ACL16+	44	101,7	63,7	8615	6105	-1,12%	ok	
			45	101,7	64,4	5952		-2,51%	ok	
			46	102,0	64,0	6208		1,69%	ok	
			47	101,7	63,9	6035		-1,15%	ok	
			48	102,1	64,1	6226	1,97%	ok		

Tabulka 18: Moduly tuhosti - směsi S6-S12 zestárlé

Směs			Těleso	Průměr Ø (mm)	Výška h (mm)	Modul tuhosti		odchylka od Ø +10%,-20%		
	Teplota (°C)					Průměr (MPa)	Modul tuhosti (MPa)			
S6 zestárlá 5dní	15°C	ACO11S	22	101,7	66,0	7006	7237	-3,20%	ok	
			23	102,1	65,3	7293		0,77%	ok	
			24	103,1	63,9	7414		2,43%	ok	
S7 zestárlá 5dní	15°C	ACL16+	37	101,8	63,9	12224	12714	-3,85%	ok	
			38	101,6	64,3	13039		2,56%	ok	
			39	101,8	63,8	12487		-1,78%	ok	
			40	101,6	63,9	13105		3,08%	ok	
S8 zestárlá 5dní	15°C	ACP22+	19	102,2	65,0	13376	13746	-2,69%	ok	
			20	101,7	65,3	14432		4,99%	ok	
			21	101,6	65,9	13430		-2,30%	ok	
S9 zestárlá 5dní	15°C	ACL22S	25	101,7	67,9	11682	13314	-12,26%	ok	
			26	101,8	67,0	12982		-2,50%	ok	
			27	101,6	67,8	14135		6,16%	ok	
			28	101,7	67,5	14460		8,60%	ok	
S10 zestárlá 5dní	15°C	ACO11S	49	101,7	65,9	7617	8283	-8,04%	ok	
			50	101,7	64,8	8669		4,66%	ok	
			51	103,1	63,3	8880		7,20%	ok	
			52	101,7	65,2	7968		-3,81%	ok	
S11 zestárlá 5dní	15°C	ACO16S	53	101,8	65,2	9408	9567	-1,67%	ok	
			54	102,2	63,4	9038		-5,54%	ok	
			55	101,8	64,1	9812		2,55%	ok	
			56	101,8	64,5	10012		4,65%	ok	
S12 zestárlá 5dní	15°C	ACO11+	16	103,2	61,7	10189	10604	-3,92%	ok	
			17	101,7	63,4	10890		2,69%	ok	
			18	101,8	63,3	10734		1,22%	ok	

Tabulka 19: Moduly tuhosti - směsi C, D, E zestárlé

		Průměr	Výška	Modul tuhosti		Povolená odchylka od Ø +10%,-20%		
Teplota (°C)	Těleso	Ø (mm)	h (mm)	Průměr (MPa)	Modul tuhosti (MPa)			
0°C	C ACL 16S 50/70 po stárnutí	C1	101,6	49,9	22 157	23965	-7,54%	ok
		C2	101,6	49,8	24 318		1,47%	ok
		C3	101,6	49,8	25 421		6,07%	ok
15°C		C1	101,6	49,9	10 124	11192	-9,55%	ok
		C2	101,6	49,8	11 650		4,09%	ok
		C3	101,6	49,8	11 803		5,46%	ok
27°C		C1	101,6	49,9	3 705	3673	0,88%	ok
		C2	101,6	49,8	3 712		1,07%	ok
		C3	101,6	49,8	3 602		-1,94%	ok
40 °C	C1	101,6	49,9	1 280	1383	-7,46%	ok	
	C2	101,6	49,8	1 457		5,34%	ok	
	C3	101,6	49,8	1 413		2,12%	ok	
0°C	D ACL 16S PmB po stárnutí	D1	101,6	49,9	26 430	26676	-0,92%	ok
		D2	101,6	49,9	25 873		-3,01%	ok
		D3	101,6	49,9	27 726		3,93%	ok
15°C		D1	101,6	49,9	16 435	16215	1,36%	ok
		D2	101,6	49,9	15 366		-5,23%	ok
		D3	101,6	49,9	16 843		3,88%	ok
27°C		D1	101,6	49,9	6 545	6758	-3,15%	ok
		D2	101,6	49,9	6 397		-5,34%	ok
		D3	101,6	49,9	7 332		8,49%	ok
40 °C	D1	101,6	49,9	2 595	2496	3,94%	ok	
	D2	101,6	49,9	2 398		-3,94%	ok	
	D3	101,6	49,9	2 901		16,21%	KO	
0°C	E ACL 16S PmB Forta FI po stárnutí	E1	101,6	49,8	26 058	26645	-2,20%	ok
		E2	101,6	49,8	25 778		-3,26%	ok
		E3	101,6	50,0	28 099		5,46%	ok
15°C		E1	101,6	49,8	18 841	19173	-1,73%	ok
		E2	101,6	49,8	18 889		-1,48%	ok
		E3	101,6	50,0	19 790		3,22%	ok
27°C		E1	101,6	49,8	9 990	10287	-2,89%	ok
		E2	101,6	49,8	10 223		-0,62%	ok
		E3	101,6	50,0	10 649		3,52%	ok
40 °C	E1	101,6	49,8	4 400	4726	-6,91%	ok	
	E2	101,6	49,8	4 678		-1,02%	ok	
	E3	101,6	50,0	5 101		7,92%	ok	

Tabulka 20: Moduly tuhosti - směsi G, MT, VMT zestárlé

		Průměr	Výška	Modul tuhosti		Povolená odchylka od Ø +10%, -20%		
Teplota (°C)	Těleso	Ø	h	Průměr	Modul tuhosti			
		(mm)	(mm)	(MPa)	(MPa)			
0°C	G ACP 22+ 50% RA po stárnutí	G1	101,6	49,9	18 858	19389	-2,74%	ok
		G2	101,6	49,2	20 468		5,56%	ok
		G3	101,6	49,5	18 842		-2,82%	ok
15°C		G1	101,6	49,9	14 301	14144	1,11%	ok
		G2	101,6	49,2	14 206		0,44%	ok
		G3	101,6	49,5	13 926		-1,54%	ok
27°C		G1	101,6	49,9	6 738	6786	-0,70%	ok
		G2	101,6	49,2	6 812		0,38%	ok
		G3	101,6	49,5	6 807		0,32%	ok
40 °C	G1	101,6	49,9	3 412	3372	1,17%	ok	
	G2	101,6	49,2	3 389		0,49%	ok	
	G3	101,6	49,5	3 316		-1,66%	ok	
0°C	MT ACL 16+ RC MT po stárnutí	MT1	101,7	63,6	20562	19528	5,29%	ok
		MT2	102,9	62,7	20118		3,02%	ok
		MT3	101,5	56,4	18845		-3,50%	ok
		MT4	101,8	57,4	18589		-4,81%	ok
15°C		MT1	101,7	63,6	10494	10001	4,93%	ok
		MT2	102,9	62,7	10397		3,96%	ok
		MT3	101,5	56,4	9567		-4,34%	ok
		MT4	101,8	57,4	9546		-4,55%	ok
27°C		MT1	101,7	63,6	4325	3970	8,95%	ok
		MT2	102,9	62,7	4184		5,38%	ok
		MT3	101,5	56,4	3694		-6,95%	ok
		MT4	101,8	57,4	3677		-7,39%	ok
40 °C		MT1	101,7	63,6	1755	1387	26,53%	KO
		MT2	102,9	62,7	1704		22,82%	KO
		MT3	101,5	56,4	1354		-2,38%	ok
		MT4	101,8	57,4	1420		2,38%	ok
0°C	VMT22 20/30 po stárnutí	1	104,0	62,2	23 430	23736	-1,29%	ok
		2	104,6	61,7	22 590		-4,83%	ok
		3	103,4	61,4	25 188		6,12%	ok
15°C		1	104,0	62,2	16 368	15495	5,63%	ok
		2	104,6	61,7	15 146		-2,25%	ok
		3	103,4	61,4	14 972		-3,38%	ok
27°C		1	104,0	62,2	8 506	8349	1,88%	ok
		2	104,6	61,7	8 112		-2,84%	ok
		3	103,4	61,4	8 430		0,97%	ok
40 °C		1	104,0	62,2	4 033	3765	7,11%	ok
		2	104,6	61,7	3 713		-1,39%	ok
		3	103,4	61,4	3 550		-5,72%	ok

Tabulka 21: Šíření trhliny - směs A

Těleso	Šířka b	Délka l	Výška h	15°C		Faktor f f(ai/Wi) [-]	Napětí při porušení σ <sub>max,i</sub> [MPa]	Kritická hodnota K <sub>IC,i</sub> [N/mm <sup>3/2</sup> ]	Přetvoření ε <sub>max,i</sub> [%]	
				Přetvoření	Síla					
				ΔW	F					
				[mm]	[kN]					
A18	50,0	101,4	49,1	1,20	3,74	7,43	3,15	23,38	2,44	NEZESTÁRLÁ tělesa; 1,00 mm/min
A18'	49,9	101,2	49,0	0,90	3,65	7,44	3,08	22,91	1,84	
A19	49,8	101,9	49,4	0,81	3,15	7,41	2,65	19,64	1,64	
A19'	49,8	101,9	48,9	1,05	3,44	7,44	2,89	21,50	2,15	
A20	50,2	101,6	48,9	0,81	3,01	7,45	2,52	18,76	1,66	
A20'	49,9	101,4	49,1	1,23	3,27	7,43	2,75	20,45	2,50	
A6	52,8	101,6	49,7	1,31	5,06	7,39	4,03	29,76	2,64	5 dní zestárlá tělesa; 1,00 mm/min
A6'	52,9	100,7	48,1	0,97	4,57	7,50	3,65	27,41	2,02	
A7	53,3	101,3	48,1	1,05	4,06	7,50	3,20	24,03	2,18	
A7'	52,5	101,4	49,6	1,21	4,09	7,40	3,28	24,24	2,44	
A8	52,6	101,4	49,6	1,01	5,46	7,40	4,36	32,27	2,04	
A8'	52,5	101,3	48,3	1,01	4,69	7,49	3,76	28,18	2,09	
A9	53,1	103,0	49,9	0,98	4,37	7,38	3,40	25,12	1,96	10 dní zestárlá tělesa; 1,00 mm/min
A9'	52,5	102,7	48,5	1,38	2,80	7,48	2,22	16,56	2,85	
A10	51,5	101,8	48,1	1,06	4,11	7,50	3,34	25,08	2,20	
A10'	52,6	102,2	50,4	0,78	4,04	7,35	3,20	23,54	1,55	
A11	52,8	101,2	48,2	1,32	5,70	7,50	4,55	34,09	2,74	
A11'	52,1	101,7	50,3	1,12	5,21	7,35	4,20	30,84	2,23	
A15	52,8	102,6	48,4	1,16	4,61	7,48	3,63	27,12	2,39	15 dní zestárlá tělesa; 1,00 mm/min
A15'	52,6	102,8	50,7	1,70	4,68	7,32	3,69	27,04	3,36	
A16	47,7	101,5	48,4	0,77	4,18	7,48	3,68	27,53	1,59	
A16'	47,5	102,0	50,2	0,85	4,37	7,36	3,85	28,32	1,69	
A17	51,9	102,0	50,1	1,12	5,85	7,36	4,71	34,69	2,24	
A17'	52,2	102,0	48,2	1,16	5,63	7,50	4,51	33,82	2,41	
A12	50,4	107,9	54,0	3,01	2,88	7,10	2,26	16,05	5,58	PAV zestárlá tělesa; 1,00 mm/min
A12'	50,4	107,1	48,4	1,58	1,64	7,48	1,29	9,68	3,27	
A13	49,7	106,4	48,8	3,00	1,90	7,45	1,53	11,41	6,15	
A13'	49,9	107,3	56,2	2,78	2,15	6,96	1,71	11,92	4,95	
A14	49,6	105,3	52,4	2,59	2,51	7,21	2,05	14,77	4,95	
A14'	50,5	104,8	50,2	1,99	2,33	7,36	1,88	13,81	3,96	

Tabulka 22: Šíření trhliny - směs B

Těleso	Šířka	Délka	Výška	Přetvoření	Síla	Faktor f	Napětí při porušení	Kritická hodnota	Přetvoření	
	b	l	h	$\Delta W$	F	f(ai/Wi)	$\sigma_{max,i}$	K <sub>ic,i</sub>	$\epsilon_{max,i}$	
				[mm]	[kN]	[-]	[MPa]	[N/mm <sup>3/2</sup> ]	[%]	
B16	49,8	101,4	49,2	1,13	3,17	7,42	2,67	19,86	2,30	NEZESTÁRLÁ tělesa; 1,00 mm/min
B16'	50,0	101,7	49,0	1,16	2,68	7,44	2,24	16,70	2,37	
B17	49,8	101,3	49,2	1,07	2,79	7,43	2,36	17,53	2,18	
B17'	50,1	101,8	49,5	1,44	2,65	7,41	2,22	16,41	2,91	
B18	50,0	101,3	49,1	1,26	3,08	7,43	2,59	19,28	2,57	
B18'	49,5	101,4	49,5			7,40	0,00	0,00	0,00	
B4	51,9	101,4	48,1	1,15	3,43	7,51	2,78	20,87	2,39	5 dní zestárlá tělesa; 1,00 mm/min
B4'	52,8	101,2	49,4	1,36	4,44	7,41	3,54	26,23	2,75	
B5	52,2	101,4	48,2	1,07	3,87	7,50	3,12	23,38	2,22	
B5'	52,7	101,2	49,6	1,52	3,95	7,40	3,15	23,32	3,06	
B6	52,8	101,5	50,2	1,98	3,37	7,36	2,68	19,71	3,95	
B6'	53,5	100,7	47,9	1,66	3,92	7,52	3,10	23,31	3,46	
B7	50,6	101,8	48,9	1,27	3,88	7,45	3,21	23,92	2,60	10 dní zestárlá tělesa; 1,00 mm/min
B7'	50,1	101,6	48,9	1,45	4,60	7,44	3,85	28,66	2,96	
B8	50,4	101,8	49,3	1,33	3,57	7,42	2,96	21,98	2,70	
B8'	50,3	102,2	49,0	1,16	3,88	7,44	3,22	23,92	2,37	
B9	50,4	101,9	49,1	1,73	3,04	7,44	2,53	18,79	3,53	
B9'	50,6	101,3	49,0	1,50	3,62	7,44	3,01	22,39	3,06	
B10	50,5	101,8	49,6	1,44	4,68	7,40	3,88	28,70	2,90	15 dní zestárlá tělesa; 1,00 mm/min
B10'	50,0	101,9	49,0	1,88	4,10	7,44	3,43	25,53	3,84	
B11	50,6	101,2	48,2	1,28	3,23	7,49	2,69	20,16	2,65	
B11'	50,1	101,4	49,7	1,00	4,08	7,39	3,42	25,30	2,01	
B12	49,9	101,5	49,1	1,69	3,91	7,43	3,29	24,45	3,44	
B12'	50,5	101,4	48,6	2,35	3,57	7,47	2,97	22,21	4,84	
B13	49,9	107,4	54,1	3,10	2,28	7,10	1,82	12,88	5,73	PAV zestárlá tělesa; 1,00 mm/min
B13'	49,5	106,4	49,1	3,48	2,39	7,43	1,94	14,39	7,09	
B14	49,8	105,1	53,4	2,99	2,59	7,14	2,11	15,07	5,60	
B14'	50,2	104,5	47,8	2,24	2,34	7,52	1,90	14,31	4,68	
B15	50,7	103,7	47,8	2,41	2,87	7,52	2,33	17,52	5,04	
B15'	49,8	105,0	53,9	2,53	2,59	7,11	2,11	15,02	4,70	

Tabulka 23: Šíření trhliny - směsi C, D, E, G, MT, VMT

Těleso	Šířka	Délka	Výška	Přetvoření	Síla	Faktor f	Napětí při porušení	Kritická hodnota	Přetvoření		
	b	l	h	$\Delta W$	F	f(ai/Wi)	$\sigma_{max,i}$	K <sub>ic,i</sub>	$\epsilon_{max,i}$		
				[mm]	[kN]	[-]	[MPa]	[N/mm <sup>3/2</sup> ]	[%]		
C1	49,7	100,9	47,8	0,83	3,25	7,52	2,76	20,77	1,74	zestárlá tělesa; 1,00 mm/min	
C1'	50,4	101,4	50,1	1,03	3,36	7,36	2,80	20,65	2,06		
C2	49,9	101,2	49,6	0,96	3,05	7,39	2,58	19,06	1,93		
C2'	49,9	100,9	48,3	1,28	3,52	7,49	2,98	22,31	2,65		
C3	50,0	100,9	48,0	1,26	3,13	7,51	2,64	19,86	2,62		
C3'	49,7	101,4	49,6	1,67	3,47	7,40	2,93	21,69	3,37		
D1	50,0	100,7	48,3	1,23	4,90	7,49	4,15	31,05	2,54	zestárlá tělesa; 1,00 mm/min	
D1'	49,8	101,3	49,8	0,96	5,21	7,39	4,41	32,57	1,93		
D2	50,1	101,0	48,3	0,81	5,17	7,49	4,35	32,60	1,68		
D2'	50,0	101,6	50,1	1,09	5,32	7,36	4,46	32,87	2,18		
D3	49,8	101,2	48,0	0,83	5,02	7,51	4,25	31,90	1,73		
D3'	50,1	101,1	50,2	1,39	5,27	7,36	4,43	32,62	2,77		
E1	50,1	101,2	48,3	1,07	5,55	7,49	4,67	34,95	2,21	zestárlá tělesa; 1,00 mm/min	
E1'	49,9	100,8	49,8	1,57	6,01	7,39	5,09	37,63	3,16		
E2	49,8	100,8	48,3	1,53	6,08	7,49	5,16	38,62	3,17		
E2'	49,7	100,3	50,1	1,39	5,59	7,36	4,79	35,24	2,77		
E3	50,0	101,0	48,0	1,51	5,38	7,51	4,54	34,14	3,15		
E3'	49,9	101,5	50,2	1,22	5,63	7,36	4,74	34,87	2,43		
G1	49,7	100,7	50,4	0,57	3,03	7,34	2,58	18,95	1,13	zestárlá tělesa; 1,00 mm/min	
G1'	49,6	100,2	47,5	0,97	3,33	7,54	2,86	21,57	2,04		
G2	49,3	100,8	47,6	1,45	3,04	7,54	2,61	19,67	3,04		
G2'	49,3	101,1	50,3	0,86	2,99	7,35	2,56	18,79	1,71		
G3	49,8	100,9	47,3	0,53	3,10	7,56	2,63	19,88	1,12		
G3'	49,5	100,8	50,6	0,52	2,63	7,33	2,25	16,48	1,03		
MT1	50,3	101,5	49,0	0,88	4,49	7,44	3,75	27,89	1,80	zestárlá tělesa; 1,00 mm/min	
MT1'	49,6	101,6	48,9	1,27	4,25	7,45	3,60	26,81	2,60		
MT2	50,5	102,6	48,9	1,65	4,81	7,45	3,96	29,47	3,38		
MT2'	50,6	102,7	50,5	1,21	4,52	7,34	3,71	27,18	2,40		
MT3	51,1	100,5	46,5	1,40	4,23	7,62	3,51	26,76	3,01		
MT3'	50,4	101,5	51,5	1,13	5,01	7,27	4,17	30,34	2,20		
MT4	50,2	101,4	47,7	1,05	4,43	7,53	3,71	27,93	2,20	zestárlá tělesa; 1,00 mm/min	
MT4'	49,6	101,7	50,6	0,90	4,97	7,33	4,20	30,77	1,78		
VMT1	50,4	103,7	51,0	0,86	6,60	7,30	5,38	39,28	1,69		zestárlá tělesa; 1,00 mm/min
VMT1'	49,6	103,4	49,1	0,61	5,73	7,43	4,76	35,40	1,24		
VMT2	50,3	104,4	51,0	1,20	5,64	7,30	4,58	33,46	2,35		
VMT2'	49,3	104,2	50,3	1,39	5,51	7,35	4,57	33,59	2,76		
VMT3	48,8	103,5	51,4	1,62	6,64	7,27	5,61	40,80	3,15		
VMT3'	50,2	103,2	48,4	1,72	5,76	7,48	4,74	35,44	3,55		
VMT4	50,2	102,9	50,8	0,73	5,94	7,32	4,91	35,90	1,44	NEZESTÁRLÁ tělesa; 1,00 mm/min	
VMT4'	50,0	102,9	48,6	0,81	5,10	7,47	4,23	31,58	1,67		
VMT5	50,1	103,1	50,5	0,73	5,15	7,34	4,25	31,21	1,45		
VMT5'	50,0	102,8	49,1	0,84	5,32	7,43	4,42	32,82	1,71		
VMT6	50,6	103,3	51,0	0,63	6,20	7,30	5,05	36,90	1,24		
VMT6'	49,7	103,4	49,0	0,63	5,06	7,44	4,20	31,23	1,29		

Tabulka 24: Šíření trhliny - směsi S nezestárlé

	Těleso	Šířka	Délka	Výška	Přetvoření	Síla	Faktor f	Napětí při porušení	Kritická hodnota	Přetvoření	
		b	l	h	$\Delta W$	F	f(ai/Wi)	$\sigma_{max,i}$	K <sub>ic,i</sub>	$\epsilon_{max,i}$	
		[mm]	[kN]	[-]	[MPa]	[N/mm <sup>3/2</sup> ]	[%]				
S2	8	49,6	101,3	48,3	0,80	5,20	7,49	4,42	33,08	1,66	NEZESTÁRLÁ tělesa; 1,00 mm/min
	8'	49,5	101,6	49,8	0,93	5,81	7,38	4,93	36,38	1,87	
	9	49,3	101,6	49,7	0,91	5,01	7,39	4,26	31,50	1,83	
	9'	49,5	101,3	48,3	1,13	4,84	7,49	4,11	30,80	2,34	
S4	33	49,7	101,9	50,1	0,90	4,72	7,36	3,97	29,23	1,80	NEZESTÁRLÁ tělesa; 1,00 mm/min
	33'	49,7	102,0	49,0	1,01	4,37	7,44	3,68	27,35	2,06	
	34	50,1	101,8	49,0	1,09	5,03	7,44	4,20	31,27	2,22	
	34'	50,1	101,9	49,8	0,90	4,62	7,39	3,86	28,49	1,81	

Tabulka 25: Šíření trhliny - směsi S 10 dní zestárlé

	Těleso	Šířka	Délka	Výška	Přetvoření	Síla	Faktor f	Napětí při porušení	Kritická hodnota	Přetvoření	
		b	l	h	$\Delta W$	F	f(ai/Wi)	$\sigma_{max,i}$	K <sub>ic,i</sub>	$\epsilon_{max,i}$	
		[mm]	[kN]	[-]	[MPa]	[N/mm <sup>3/2</sup> ]	[%]				
S1	4	50,0	101,7	49,8	1,14	3,86	7,38	3,24	23,92	2,29	10 DNÍ zestárlá tělesa; 1,00 mm/min
	4'	50,4	101,6	48,4	1,02	3,85	7,48	3,21	24,01	2,11	
	5	49,5	101,7	49,9	1,75	4,00	7,37	3,39	24,98	3,50	
	5'	48,5	101,5	48,8		4,10	7,46	3,55	26,48	0,00	
	6	49,4	101,6	48,9	1,02	3,21	7,45	2,73	20,33	2,09	
	6'	50,5	101,6	49,6	1,25	3,96	7,40	3,29	24,36	2,52	
S9	25'	50,3	101,7	49,8	0,89	4,47	7,39	3,73	27,53	1,79	
	26'	50,3	101,7	49,4	0,99	5,55	7,41	4,62	34,28	2,00	
	27'	50,0	101,6	51,0	1,36	6,48	7,30	5,44	39,70	2,66	
	28'	49,6	101,6	48,7	1,45	5,08	7,46	4,30	32,04	2,98	
S3	29'	50,0	102,0	49,0	1,14	3,13	7,44	2,61	19,45	2,33	
	30'	50,6	101,8	48,7	1,30	3,43	7,46	2,84	21,19	2,67	
	31'	50,6	103,0	49,8	1,06	3,57	7,38	2,92	21,57	2,13	
	32'	50,1	101,5	48,4	1,17	3,48	7,48	2,92	21,82	2,42	
S7	37'	49,9	101,8	50,1	0,98	3,43	7,36	2,88	21,21	1,96	
	38'	50,4	101,6	49,6	0,79	4,40	7,40	3,66	27,10	1,59	
	39'	50,3	101,3	48,4	0,59	3,82	7,48	3,19	23,91	1,22	
	40'	49,9	101,4	48,2	1,25	3,50	7,49	2,95	22,09	2,59	
S10	49'	50,5	101,5	48,4	1,16	4,25	7,48	3,54	26,48	2,40	
	50'	50,3	101,7	49,8	0,82	4,44	7,38	3,70	27,28	1,65	
	51'	50,2	103,2	49,8	1,01	4,87	7,38	4,01	29,60	2,03	
	52'	50,1	101,8	50,1	0,90	4,70	7,36	3,93	28,90	1,80	
S11	53'	50,3	101,8	50,0	0,97	5,51	7,37	4,58	33,80	1,94	
	54'	49,0	102,1	48,7	1,17	4,14	7,46	3,52	26,28	2,40	
	55'	50,0	101,5	48,4	1,50	3,95	7,48	3,32	24,79	3,10	
	56'	49,0	101,5	48,1	1,34	4,59	7,50	3,93	29,47	2,78	
S5	45'	49,8	101,7	49,8	1,06	4,27	7,38	3,59	26,51	2,13	
	46'	49,9	101,7	49,9	1,11	4,30	7,38	3,61	26,66	2,22	
	48'	50,0	101,8	49,9	1,14	4,10	7,38	3,43	25,35	2,29	
S2	11'	47,9	101,9	48,2	1,27	2,98	7,49	2,60	19,48	2,63	
	12'	48,6	102,7	49,1	0,88	3,03	7,43	2,59	19,25	1,79	
	13'	49,6	102,4	50,5	0,76	4,14	7,33	3,48	25,49	1,50	
	14'	49,7	101,6	50,2	1,08	4,88	7,36	4,12	30,32	2,15	
	15'	49,9	101,1	48,0	1,27	3,34	7,51	2,82	21,20	2,64	
S4	42	50,4	101,8	48,6	1,79	3,53	7,47	2,94	21,91	3,68	
	42'	49,8	102,1	50,9	1,59	4,39	7,31	3,68	26,89	3,12	
	43'	49,7	101,6	48,6	0,75	3,82	7,47	3,22	24,08	1,54	
	44	50,8	101,6	50,8	1,11	4,00	7,32	3,30	24,16	2,19	
	44'	50,2	101,3	48,4	0,82	3,91	7,48	3,28	24,54	1,70	

Tabulka 26: Šíření trhliny - směsi S 5 dní zestárlé

	Těleso	Šířka	Délka	Výška	Přetvoření	Síla	Faktor f	Napětí při porušení	Kritická hodnota	Přetvoření
		b	l	h	$\Delta W$ [mm]	F [kN]	f(ai/Wi) [-]	$\sigma_{max,i}$ [MPa]	K <sub>ic,i</sub> [N/mm <sup>3/2</sup> ]	$\epsilon_{max,i}$ [%]
S1	1	49,7	103,0	50,3	2,00	4,09	7,35	3,40	25,01	3,97
	1'	50,0	102,8	49,3	1,23	4,57	7,42	3,79	28,14	2,50
	2	50,5	102,0	50,1	1,96	4,09	7,36	3,38	24,91	3,91
	2'	49,1	101,7	48,7	1,56	3,37	7,46	2,88	21,45	3,20
	3	51,0	102,5	50,9	1,22	3,94	7,31	3,21	23,45	2,39
3'	51,3	101,7	47,8	1,06	4,02	7,52	3,29	24,72	2,22	
S9	25	50,1	101,5	48,5	1,53	5,00	7,48	4,19	31,37	3,16
	26	50,7	101,6	48,9	0,96	4,74	7,45	3,92	29,21	1,96
	27	49,7	101,6	47,1	1,12	4,30	7,57	3,63	27,47	2,38
	28	49,8	101,5	50,0	0,94	5,22	7,37	4,41	32,48	1,88
S3	29	50,0	102,2	49,2	1,03	3,08	7,42	2,57	19,10	2,09
	30	50,3	101,8	49,8	1,04	3,15	7,38	2,63	19,38	2,09
	31	49,8	102,9	49,9	1,20	2,93	7,38	2,44	17,99	2,40
	32	50,1	101,8	49,8	1,00	3,29	7,38	2,75	20,31	2,01
S7	37	50,8	101,5	48,4	0,72	3,53	7,48	2,92	21,84	1,49
	39	49,9	101,8	50,1	0,66	3,80	7,36	3,19	23,49	1,32
	40	50,2	101,7	50,0	0,80	3,68	7,37	3,07	22,66	1,60
S10	49	50,3	101,7	49,9	0,85	3,92	7,38	3,27	24,10	1,70
	50	50,1	101,6	48,7	0,93	3,68	7,46	3,08	22,99	1,91
	52	50,3	101,5	48,2	1,14	4,09	7,50	3,42	25,60	2,37
S11	53	49,9	101,7	48,2	0,72	4,10	7,50	3,44	25,81	1,49
	54	50,2	102,2	49,8	1,04	4,00	7,38	3,32	24,52	2,09
	55	50,3	101,9	49,9	1,25	4,22	7,38	3,51	25,89	2,51
	56	50,0	101,6	49,8	1,11	4,65	7,38	3,90	28,82	2,23
S5	45	49,8	101,5	48,6	1,39	4,09	7,47	3,45	25,75	2,86
	47	49,8	101,5	49,7	0,92	4,06	7,39	3,42	25,31	1,85
	48	49,2	102,0	49,1	1,43	4,00	7,43	3,40	25,29	2,91
S12	16	49,6	103,1	50,1	0,89	5,06	7,36	4,22	31,09	1,78
	16'	49,8	103,2	49,6	1,03	5,36	7,39	4,45	32,91	2,07
	17	49,8	101,4	48,1	0,93	4,91	7,50	4,14	31,07	1,93
	17'	49,7	101,3	50,3	0,98	4,84	7,35	4,10	30,13	1,95
	18	49,5	101,1	48,2	1,15	5,04	7,50	4,30	32,20	2,39
	18'	49,8	101,7	50,2	1,09	5,18	7,36	4,36	32,06	2,17
S4	35	49,5	101,3	50,5	0,98	4,99	7,34	4,24	31,13	1,94
	35'	49,8	101,3	47,7	0,98	4,55	7,53	3,85	28,98	2,06
	36	49,6	101,8	48,6	1,06	4,76	7,46	4,02	29,98	2,18
	36'	49,3	102,0	50,0	0,91	5,17	7,37	4,38	32,29	1,82
	41	49,3	102,7	49,2	0,89	4,56	7,42	3,84	28,48	1,81
S8	19	53,3	101,9	49,8	0,82	3,73	7,39	2,93	21,64	1,65
	19'	53,0	102,1	49,3	0,80	3,67	7,42	2,89	21,45	1,62
	20'	55,1	101,1	48,3	0,62	3,48	7,49	2,66	19,93	1,28
	21	52,2	101,3	47,7	0,71	3,33	7,53	2,68	20,22	1,49
	21'	52,0	101,5	50,6	0,53	3,29	7,33	2,66	19,49	1,05
S6	22	55,5	101,6	50,2	2,05	4,75	7,36	3,59	26,43	4,09
	22'	55,3	101,4	48,6	1,58	4,91	7,47	3,74	27,89	3,25
	23'	54,3	101,7	48,1	1,13	4,25	7,50	3,28	24,58	2,35
	24	53,4	102,9	50,5	1,15	4,86	7,33	3,77	27,67	2,28
	24'	53,1	102,9	49,6	1,27	4,83	7,40	3,77	27,89	2,56
S2	11	50,0	102,4	50,4	1,32	3,62	7,34	3,02	22,15	2,62
	13	49,1	102,3	48,9	1,48	3,57	7,45	3,03	22,57	3,03
	14	49,2	101,5	48,4	0,97	3,83	7,48	3,27	24,45	2,00
	15	49,5	101,4	50,5	1,40	4,16	7,34	3,53	25,94	2,77

5 DNÍ  
zestárlá  
tělesa; 1,00  
mm/min