



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební
Katedra silničních staveb

Asfaltové směsi a technologie pro ložné vrstvy vozovek s dlouhou životností

Asphalt Mixes and Technologies for Long-life Road Construction Base Layer

Diplomová práce

Studijní program: Stavební inženýrství
Studijní obor: Konstrukce a dopravní stavby

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

Bc. Filip Landa

Praha 2018



ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Filip Jméno: Landa Osobní číslo: 410695
Zadávací katedra: katedra silničních staveb
Studijní program: Stavební inženýrství
Studijní obor: Konstrukce a dopravní stavby

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce: Asfaltové směsi a technologie pro ložné vrstvy vozovek s dlouhou životností
Název diplomové práce anglicky: Asphalt Mixes and Technologies for Long-life Road Construction Base Layer

Pokyny pro vypracování:

- řešerše v oblasti typů ložných vrstev netuhých a polotuhých vozovek, problematika směsí typu SMA,
- řešerše problematiky vozovek s dlouhou životností
- popis pokusného úseku, popis technologie realizace pokládky asfaltové směsi typu SMA L
- vybrané laboratorní zkoušky na směsích určených pro ložné vrstvy

Seznam doporučené literatury:

- technické normy a TP vztahující se k dané problematice
- odborné články a výzkumné zprávy dle průběžného upřesnění vedoucím diplomové práce

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

Datum zadání diplomové práce: 02.10.2017 Termín odevzdání diplomové práce: 8.1.2018
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“.

2.10.2017

Datum převzetí zadání



Podpis studenta(ky)



ČVUT v Praze, Fakulta stavební, Katedra silničních staveb

Asfaltové směsi a technologie pro ložné vrstvy vozovek s dlouhou životností

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci "Asfaltové směsi a technologie pro ložné vrstvy vozovek s dlouhou životností" vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím uvedené odborné literatury a dalších pramenů, které jsou uvedeny v seznamu použité literatury na konci práce.

V Praze dne 3.1. 2018

.....

Bc. Filip Landa



ČVUT v Praze, Fakulta stavební, Katedra silničních staveb

Asfaltové směsi a technologie pro ložné vrstvy vozovek s dlouhou životností

Poděkování

Rád bych zde poděkoval Ing. Petru Mondscheinovi, Ph.D. za odborné vedení diplomové práce, Ing. Janu Valentinovi, Ph.D. za pomoc s laboratorní částí této práce a Ing. Pavle Vackové za poskytnutí laboratorních těles referenční směsi a dále také celému kolektivu laboratoře silničních staveb Fakulty stavební ČVUT za spolupráci a cenné rady.



Abstrakt

Tato diplomová práce se zabývá konceptem vozovek s dlouhou životností a návrhem asfaltové směsi SMA L 16 S použitelné v tomto konceptu do ložné vrstvy vozovky. Text práce je rozdělen na tři hlavní části.

V první, rešeršní části je v kapitolách 1 až 4 objasněn koncept vozovek s dlouhou životností, který je nazýván též konceptem „věčných“ vozovek. Nejprve jsou nastíněny nejčastější poruchy netuhých vozovek a dále je popsán koncept vozovek s dlouhou životností, kde jsou při návrhu, výstavbě a údržbě vozovek tyto poruchy vhodně eliminovány tak, aby bylo docíleno mnohem delší návrhové životnosti. Na základě zkušeností ze zahraničí je zde i popsána možnost, jak modernizovat stávající vozovky na vozovky s dlouhou životností. Vzhledem k použití kvalitnějších materiálů jsou investiční náklady vyšší, proto je zde ve stručnosti popsána analýza nákladů a přínosů, která z dlouhodobého hlediska tyto vyšší investiční náklady obhajuje. Rešeršní část je uzavřena poznatkami z realizace zkušebního úseku na silnici II/236 Kačice – Smečno, kde byla využita pro ložnou vrstvu vozovky směs SMA.

Druhá část se zabývá návrhem skladby netuhé dálniční vozovky podle konceptu vozovek s dlouhou životností a shrnutím poznatků z posouzení dle TP 170. Všechny navržené varianty byly posouzeny ve výpočetním programu Laymed.

Poslední, třetí část se věnuje laboratornímu návrhu směsi SMA L 16 S. Detailně je zde popsán princip návrhu, optimalizace směsi a přehled zkoušených variant této směsi. Následuje stručný popis výroby zkušebních těles a popis na nich prováděných laboratorních zkoušek: stanovení modulu tuhosti v příčném tahu na válcových zkušebních tělesech (IT-CY), stanovení pevnosti v příčném tahu (ITS), stanovení odolnosti asfaltové směsi vůči vodě (ITSR), stanovení odolnosti asfaltové směsi proti účinkům mrazu, šíření trhliny zkouškou ohybem na půlválcovém zkušebním tělese, zkouška pojíždění kolem a zkouška tahu za ohybu. Nakonec jsou zde uvedeny a popsány výsledky všech variant směsi SMA L 16 S ze všech výše vyjmenovaných zkoušek včetně porovnání s výsledky referenční směsi ACL 16 S.

Klíčová slova

vozovky s dlouhou životností, „věčné“ vozovky, únavový práh, návrhová metoda TP 170, stanovení modulu tuhosti v příčném tahu na válcových zkušebních tělesech (IT-CY), stanovení pevnosti v příčném tahu (ITS), stanovení odolnosti asfaltové směsi vůči vodě (ITSR), stanovení odolnosti asfaltové směsi proti účinkům mrazu, šíření trhliny zkouškou ohybem na půlválcovém zkušebním tělese, zkouška pojíždění kolem, zkouška tahu za ohybu



Abstract

This diploma thesis deals with Long-Life Pavement concept and with design of asphalt mixture SMA L 16 S which can be used in this concept in binder course. The text is divided into the main parts.

In the first, research part there is in chapters 1 to 4 explained Long-Life Pavement concept which is sometime called „Perpetual Pavements“ concept. It begins with the most common distresses of flexible pavements and then the Long-Life Pavement concept is described. In this concept the pavements are designed so that the distresses mentioned above are eliminated, therefore these pavements are much more durable. Foreign experience from Great Britain shows the possibility of upgrading to long-life pavements. The initial construction costs are higher due to high-quality materials, so there the Cost/Benefit Analysis is introduced and it justifies these higher initial construction costs. The end of research part is dedicated to experimental stretch II/236 Kačice – Smečno, where SMA was used in binder course.

The second part of this thesis deals with design of flexible pavement for motorway in Long-Life Pavement concept and summary of findings from evaluation according to TP 170. All variants of designed pavements were evaluated in software Laymed.

The last part is dedicated to design of asphalt mixture SMA L 16 S. The design method and optimization are described in detail here, followed by all designed variants. Next issue described are making of test specimen and all the tests performed: analysis of indirect tensile stiffness modulus, analysis of indirect tensile strength, crack propagation by semi-circular bending test, wheel tracking and analysis of flexural strength. At the end all the results are shown and described for all variants of asphalt mixture SMA L 16 S including comparison with reference mixture ACL 16 S.

Keywords

Long-Life Pavement concept, Perpetual Pavement concept, fatigue endurance limit, design method from TP 170, analysis of indirect tensile stiffness modulus, analysis of indirect tensile strength, crack propagation by semi-circular bending test, wheel tracking, analysis of flexural strength



Obsah

1	Úvod	10
2	Konstrukce vozovky.....	10
2.1	Vrstvy vozovky a jejich funkce.....	10
2.2	Nejčastější poruchy vozovek.....	11
2.2.1	Trvalé deformace.....	11
2.2.2	Trhliny.....	12
2.2.2.1	Únavový práh (FEL)	14
2.2.3	Řešení – asfaltové směsi typu RBL	15
3	Koncept věčných vozovek	16
3.1	Obecně o věčných vozovkách.....	16
3.2	Návrh vozovky.....	19
3.2.1	Rozdílné požadavky na jednotlivé vrstvy.....	20
3.2.1.1	Zemní pláň a ochranná vrstva	20
3.2.1.2	Podkladní vrstvy a kryt.....	21
3.3	Skladba věčné vozovky.....	22
3.4	Výstavba.....	25
3.5	Údržba.....	25
3.5.1	Vyhodnocování stavu vozovek	25
3.5.2	Trvanlivost obrusných vrstev	27
3.5.3	Modernizace stávajících vozovek na vozovky s dlouhou životností.....	29
3.5.3.1	Velká Británie	29
3.5.3.2	Nizozemí.....	31
3.6	Ekonomické aspekty	32
3.6.1	Analýza nákladů a přínosů (CBA).....	32
3.6.2	Další ekonomické pohledy na věc	33
4	Pokusný úsek II/236 Kačice – Smečno	33
5	Porovnání asfaltových směsí.....	36
5.1	Porovnání směsí typu ACL, VMT a SMA	36
5.2	Porovnání směsí typu ACL, VMT a SMA v Laymedu	39
5.2.1	Návrhová metoda TP 170.....	39
5.2.2	Posouzení vozovky dle TP 170	41



5.2.3	Varianty posuzované vozovky	42
5.2.4	Vstupní parametry pro posouzení.....	43
5.2.5	Posouzení variant dle TP 170.....	44
5.2.6	Shrnutí.....	46
6	Laboratorní část.....	46
6.1	Návrh směsi	46
6.1.1	SMA L 16 S.....	46
6.1.1.1	Čára zrnitosti	46
6.1.1.2	Optimalizace složení směsi kameniva SMA	48
6.1.1.3	Množství pojiva.....	53
6.1.1.4	Návrh varianty s R-materiálem	54
6.1.1.5	Přehled variant směsi SMA L 16 S	56
6.1.1.5.1	V1 (PmB 25/55-60) a V2 (PmB 40/60-75)	56
6.1.1.5.2	V3 (50/70 CRmB)	56
6.1.1.5.3	V4 (PmB 25/55-60 + FORTA-FI)	57
6.1.1.5.4	V5 (PmB 25/55-60 + 1,5 % Sasobit REDUX)	58
6.1.1.5.5	V6 (PmB 40/60-75 + 30 % R-mat).....	59
6.1.2	ACL 16 S PmB.....	59
6.2	Výroba těles	60
6.2.1	Laboratorní výroba směsi	60
6.2.2	Marshallova tělesa.....	61
6.2.3	Desky.....	61
6.2.4	Stárnutí těles.....	62
6.3	Prováděné laboratorní zkoušky	63
6.3.1	Stanovení modulů tuhosti zkouškou v příčném tahu na válcových zkušebních tělesech (IT-CY) 63	
6.3.2	Stanovení pevnosti v příčném tahu (ITS).....	63
6.3.3	Stanovení odolnosti asfaltové směsi vůči vodě (ITSR).....	65
6.3.4	Stanovení odolnosti asfaltové směsi proti účinkům mrazu	65
6.3.5	Šíření trhliny zkouškou ohybem na půlválcovém zkušebním tělese	66
6.3.6	Zkouška poježdění kolem	68
6.3.7	Tah za ohybu	68
6.4	Vyhodnocení prováděných laboratorních zkoušek.....	69
6.4.1	Stanovení modulů tuhosti zkouškou v příčném tahu na válcových zkušebních tělesech (IT-CY) 69	



6.4.2	Stanovení pevnosti v příčném tahu.....	74
6.4.3	Šíření trhliny zkouškou ohybem na půlválcovém zkušebním tělese	80
6.4.4	Stanovení odolnosti proti trvalým deformacím.....	90
6.4.5	Tah za ohybu	92
7	Závěr	99
8	Bibliografie.....	101
9	Seznam tabulek.....	103
10	Seznam obrázků.....	106
11	Seznam grafů	106
12	Seznam použitých zkratk.....	108
13	Přílohy	109



1 Úvod

Dobrá infrastruktura je pro ekonomii každé země naprosto nezbytná. Silniční stavitelství se k tomu snaží přispět tím, že nabízí nové technologie, jejichž náklady na životní cyklus jsou co možná nejnižší, aby přitom stále splňovaly jak požadavky uživatelů komunikací, tak požadavky institucí pro rozvoj dopravní infrastruktury. [1]

Cílem silničního stavitelství je poskytnout silniční komunikace v takové kvalitě, aby je uživatelé mohli bezpečně a pohodlně využívat bez jakýchkoli překážek. V praxi je tedy důležité i to, aby veškerá údržba a opravy byly omezeny na minimum, protože zejména v hustě obydlených oblastech je intenzita dopravy na dálnicích tak vysoká, že není možné její úplné uzavření. Při určení nákladů je totiž třeba vzít v úvahu i spotřebu času uživatelů komunikací a z toho důvodu je třeba na důležité komunikace používat povrchy vyžadující co možná nejméně údržby, protože kompletní rekonstrukce vozovkového souvrství je pouze těžko možná, ne-li rovnou nemožná. To je jeden z důvodů pro rozvoj konceptu vozovek s dlouhou životností (Long-Life Pavement, LLP), jak se nazývá v Evropě. V USA je tento koncept rozvíjen pod názvem „věčné“ vozovky (Perpetual Pavements, PP). [1] [2]

Vozovky jsou dle těchto konceptů navrženy a vybudovány tak, aby měly velmi dlouhou životnost a zároveň obnovitelnou asfaltovou obrusnou vrstvu. V zásadě musí být tyto vozovky velmi odolné proti tvorbě trvalých deformací (vyjíždění kolejí) a musí mít prakticky neomezenou životnost v otázce únavového chování. Klíčovým aspektem je tedy takový návrh jednotlivých vrstev vozovky, aby se v ní nešířily trhliny ze spodních asfaltem stmelených vrstev. Obnovu pouze obrusné vrstvy lze potom provádět s pouze minimálním omezením dopravy. [3]

2 Konstrukce vozovky

2.1 Vrstvy vozovky a jejich funkce

Konstrukce vozovky se skládá z krytových vrstev, podkladních vrstev a ochranné vrstvy, která leží na zemní pláni. Podle přetvárných vlastností krytových a podkladních vrstev rozlišujeme vozovky tuhé, jejíž hlavním prvkem je cementobetonová deska, netuhé, mající asfaltový kryt a podkladní vrstvy nestmelené nebo stmelené asfaltem, a polotuhé, které mají asfaltový kryt a jejichž podkladní vrstvy jsou stmelené cementem nebo jiným hydraulickým pojivem.

Krytem označujeme horní část vozovky, která se u asfaltových vozovek dá rozdělit na vrstvu obrusnou a ložnou. Obrusná vrstva je horní krytová vrstva, která je v přímém kontaktu se zatížením působícím na vozovku. Jedná se o zatížení jak od dopravy, tak i o zatížení od klimatických jevů. Kvůli plynulosti, bezpečnosti a komfortu dopravy jsou kladeny velké nároky na její povrchové vlastnosti, mezi



keré patří například požadavek na rovinnatost, snižování hluku nebo protismykové vlastnosti. Aby byl požadavek na rovinnatost po celou dobu životnosti vozovky zachovaný, je potřeba mít dostatečně kvalitní podklad. Důležitým prvkem je ložná vrstva, která je dolní krytovou vrstvou a která přenáší zatížení od dopravy do podkladních vrstev. Tato vrstva musí mít dostatečnou odolnost proti tvorbě trvalých deformací.

Další vrstvy, které nazýváme podkladní, musí mít taktéž dostatečnou odolnost proti tvorbě trvalým deformacím, jelikož přenáší veškerá zatížení z krytových vrstev. Asfaltem stmelená podkladní vrstva musí rovnoměrně roznést zatížení působící na vozovku tak, aby nestmelené vrstvy, které jsou pod ní, nebyly vystaveny nadměrným tahům ani tlakům. V neposlední řadě je důležitá trvanlivost těchto vrstev, protože jejich obnova je ekonomicky velmi náročná. Další podkladní vrstvy mohou být nestmelené nebo hydraulicky stmelené.

Pod podkladními vrstvami je vrstva ochranná, která chrání před promrznáním a zatížení roznáší dále na zemní pláň.

2.2 Nejčastější poruchy vozovek

Konstrukce vozovky je namáhána nejvíce dopravním zatížením, jehož intenzita na většině úseků rok od roku vzrůstá. Z dopravního zatížení jsou největší hrozbou pro vozovky těžká nákladní vozidla. Nelze ovšem zapomínat ani na klimatické vlivy, které hrají taktéž nezanedbatelnou roli při posuzování návrhu vozovky.

2.2.1 Trvalé deformace

Ve vozovkách se mohou vyjíždět koleje ve všech jejich vrstvách, pokud nemá vozovka dostatečně únosné podkladní vrstvy a podloží. Tento jev je v současné době relativně málo častý, ale pokud nastane, vyžaduje velmi nákladnou rekonstrukci celého vozovkového souvrství včetně úpravy zemní pláň. Proto panuje snaha vhodně navrhnout konstrukci tak, aby se tvorba trvalých deformací omezila pouze na krytové vrstvy, jejichž obnova není tak náročná ani časově, ani finančně. [4]



Obrázek 1: Trvalé deformace ve všech vrstvách konstrukce vozovky [5]



Obrázek 2: Trvalé deformace pouze krytových vrstev [6]

2.2.2 Trhliny

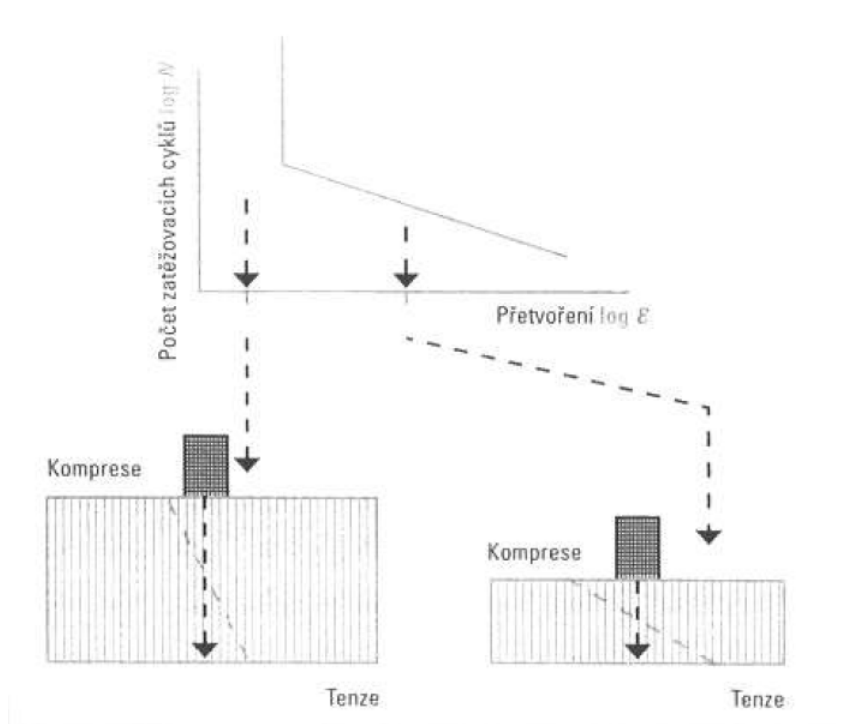
Když se v asfaltových vrstvách začnou šířit únavové trhliny „bottom-up“, může se stát, že nakonec se prokopírují až na povrch, díky čemuž může do konstrukce vozovky zatékat voda a ovlivňovat vlastnosti nestmelených podkladních vrstev. Tento jev poté vyústí ve zrychlení degradace povrchu, mrazový zdvih a tvorbu trvalých deformací. [4]



Obrázek 3: Únavová trhлина "bottom-up" [5]

Únavové trhliny vznikají z důvodu opakovaných vysokých tahových napětí na spodním líci asfaltových vrstev vznikajících od zatížení TNV. Bylo dokázáno, že omezením vodorovných tahových napětí právě na spodním líci asfaltových vrstev, lze omezit i vznik únavových trhlin. [4]

Existuje více možností, jak vznik únavových trhlin omezit, jednou z nich je zvětšit tloušťku asfaltových vrstev, další použití asfaltové směsi s vyšší odolností vůči únavě, v neposlední řadě lze tyto možnosti zkombinovat. Schematicky je to naznačeno na obrázku 4. [4]



Obrázek 4: Schematické znázornění vlivu tloušťky na velikost přetvoření ve vozovce [7]



Jsou-li tahová napětí na spodním líci asfaltového souvrství snížena, přesouvá se v tomto ohledu kritické místo z vrstev podkladních do vrstev obrusných, kde v kombinaci interakce s dopravou a stárnutí asfaltového pojiva dochází ke zkřehnutí a tím i oslabování těchto vrstev, které se stávají náchylnějšími ke vzniku trhlin, zejména v zimním období, kdy dochází k tvorbě mrazových trhlin. V tomto případě, když se veškeré poruchy omezí pouze na obrusnou vrstvu, se lze soustředit pouze na údržbu těchto vrstev a není nutné zasahovat do zbylých níže položených vrstev konstrukce vozovky. [4]

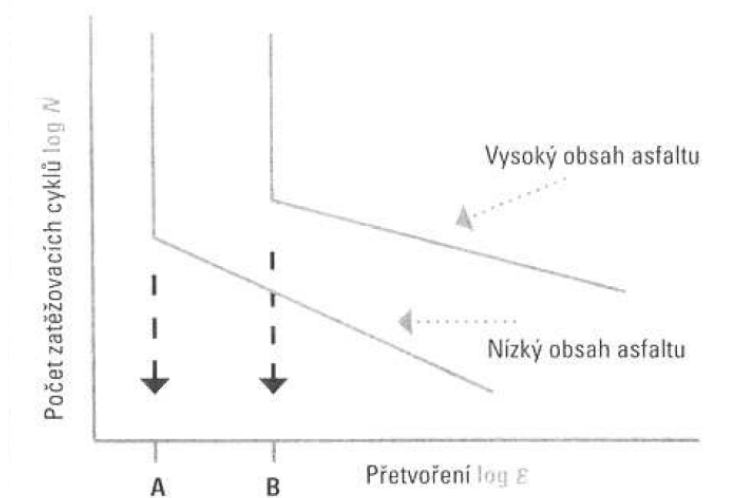


Obrázek 5: Trhlina "top-down" [8]

Vozovky s dlouhou životností musí vznik únavových trhlin eliminovat. Skladba a dimenzování těchto vozovek se řídí určitými pravidly a výsledkem je asfaltové souvrství mírně odlišné konstrukce, než se běžně používá. K potlačení vzniku potenciálních trhlin jsou navrženy podkladní vrstvy o velkých tloušťkách, s vysokým obsahem pojiva, schopné účinně absorbovat cyklické zatížení, které jsou navrženy s ohledem na fenomén s názvem únavový práh (Fatigue Endurance Limit, FEL). [7]

2.2.2.1 Únavový práh (FEL)

Únavový práh je velikost nejvyššího přetvoření, při kterém je počet cyklů nutných k vyvolání únavového defektu v reálných podmínkách téměř nekonečný. Z toho vyplývá, že množina indukovaných přetvoření ležících pod hodnotou limitního únavového přetvoření nedokáže vyvolat destruktivní únavové projevy materiálu. Tento princip je znám především z úspěšné aplikace v jiných oborech strukturálních konstrukcí. Například strojní inženýři jej s úspěchem používají již velmi dlouhou dobu. [7]



Obrázek 6: Princip únavového prahu [7]

Základním předpokladem je navrhnout vozovku tak, aby přetvoření na spodní straně asfaltových podkladních vrstev bylo udržováno pod kritickou hladinou únavového prahu (FEL), která zaručuje, že na hutněných asfaltových vrstvách nevznikají únavové trhliny jako negativní projev cyklického zatěžování, takže dopravní zatížení nevyvolává únavové poškození materiálu ani při jeho velmi dlouhé expozici, například při kongescích. Z čistě praktického hlediska pak definice FEL může být převedena na počet přejezdů ESAL (equivalent single axle load, ekvivalentních náprav) za celkové návrhové období 50 let. [7]

Otázka únavového prahu a velikost jeho přípustného přetvoření závisí na charakteru asfaltové směsi, nejčastěji se doporučuje $\varepsilon = 50 - 70 \mu\text{m/m}$. U konceptu LLP se na základě zkušeností uvádí doporučení udržet relativní přetvoření pod nominální hodnotou $60 \mu\text{m/m}$. [7]

Lze předpokládat, že rozhodující jsou ovšem skutečné parametry navržené a použité asfaltové směsi, protože každá směs se může lišit právě citlivostí k únavovým vlastnostem. Únavové vlastnosti a únavový práh daného typu asfaltové směsi významně ovlivňuje vyšší obsah asfaltu a další vlastnosti z toho vyplývající, jmenovitě maximální míra zhutnění, minimum mezer ve směsi a stupeň vyplnění mezer pojivem. [7]

2.2.3 Řešení – asfaltové směsi typu RBL

Obecně lze konstatovat, že zlepšení odolnosti proti únavě je možné dosáhnout zvýšením obsahu asfaltového pojiva a snížením mezerovitosti. Je potřeba dodat, že jak pojivo, tak kamenivo musí být dostatečně kvalitní, jsou zde vyžadována polymerem modifikovaná asfaltová pojiva a kamenivo nejvyšší kvality. [3]



Vyšší obsah asfaltového pojiva zvětší tloušťku asfaltového filmu na kamenivu, díky čemuž je tento asfaltový film vystaven nižším působícím napětím. Tento fakt se pozitivně promítne do otázky životnosti dané vrstvy s ohledem na únavové porušení. [9]

Nicméně s vyšším obsahem asfaltového pojiva má směs tendenci stávat se měkčí a mít tedy nižší moduly tuhosti. Úkolem technologa, který takovou směs navrhuje, je dosáhnout jak vysoké odolnosti proti únavě, tak i vysokých modulů tuhosti. Nejvhodnější je umístit tyto směsi do podkladních nebo ložných vrstev právě díky jejich vlastnosti omezení únavových trhlin. [9]

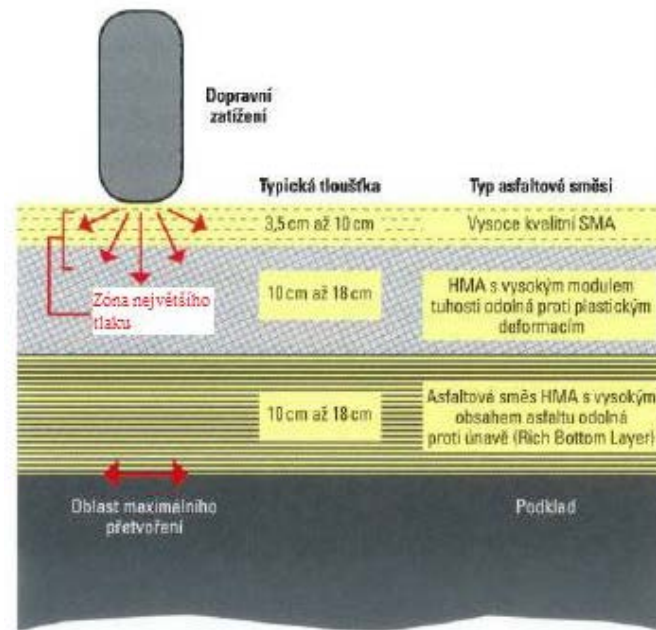
3 Koncept věčných vozovek

3.1 Obecně o věčných vozovkách

V praxi je záměrem konceptu věčných vozovek výrazně prodloužit životnost konstrukce vozovky omezením poruch způsobených běžnými poruchami typu únavových trhlin šířících se ze spodních asfaltových vrstev do horních nebo trvalých deformací v asfaltu stmelěných nebo nestmelěných vrstvách, které by měly být z principu eliminovány. [2]

Tento koncept byl v poslední době zaveden v Evropě a v Americe, a jeho motivací je vytvoření struktury, v rámci které budou budovány nákladově efektivnější vozovky. Ne všechny prvky použité v konceptu vozovek s dlouhou životností jsou úplně nové a některé se používají v určité podobě již dlouhou řadu let. Například v některých zemích se používaly asfaltové vozovky „full-depth“, jejichž princip spočívá v použití asfaltových vrstev relativně velkých tlouštěk položených přímo na zemní pláň nebo na relativně tenkých nestmelěných vrstvách. Jeden z hlavních důvodů tohoto provedení je ten, že celková tloušťka vozovky může být tenčí než u běžně navrhovaných skladeb sestávajících z relativně tenkých asfaltových vrstev a na nestmelěných vrstvách větších tlouštěk. Asfaltové vozovky „full-depth“ často vykazovaly mnohem delší životnost, než na kterou byly navrženy. [5] [2]

Podobné zkušenosti byly pozorovány i ve Velké Británii, kde výzkumy naznačují, že únavové trhliny a konstrukční deformace nejsou hlavním typem poruch ve vozovkách navrženy s dostatečnou pevností. Dobře navržené netuhé vozovky vykazují velmi dlouhou životnost za předpokladu, že poruchy, jakými jsou například trhliny nebo vyjíždění kolejí, se omezují pouze na povrch vozovky, což výrazně usnadňuje údržbu těchto vozovek. [2]



Obrázek 7: Asfaltová vozovka typu "full-depth" [10]

Mohlo by se zdát, že koncept vozovek s dlouhou životností je ve všech zemích stejný, ale není tomu tak, existuje mnoho rozdílů, které vyvstávají napříč různými organizacemi a vědci v otázkách návrhu, výběru materiálu nebo výroby směsi. Vedle dvou hlavních přístupů „Long-Life Pavements“ (vozovky s dlouhou životností) a „Perpetual Pavements“ (věčné vozovky) existují i některé další metody. Například v Nizozemí navrhují netuhé vrstvy vozovky tak, aby zabránili konstrukčnímu poškození. V minulosti zde používali koncept „stage-by-stage“, kdy neustále přidávali další asfaltové vrstvy. Nyní používají návrhový přístup založený na dlouhé životnosti s přihlédnutím k předpokládanému funkčnímu využití silnice. Vzhledem k velmi vysokým intenzitám dopravy v Nizozemí je nutné se co nejvíce vyvarovat omezení provozu. V dalších zemích, mezi které patří například Francie, se délka návrhového období řídí ekonomickou strategií, která zahrnuje období obvykle delší než 30 let. I v dalších zemích jako třeba v Německu, Velké Británii a v USA již povolili návrhová období delší než 20 let, avšak pouze ve Velké Británii uvádí, že jejich vozovky mají životnost 40 let. [2] [11]

Přes rozdílné přístupy lze určit několik důležitých bodů, kterých je potřeba se držet pro správný návrh vozovek s dlouhou životností. [2]

V první řadě je nutné splnit dva důležité předpoklady. Nejprve je nutné mít dostatečnou znalost místních podmínek, zahrnující dostatečně přesné informace o dopravních intenzitách na dané komunikaci a neméně důležité je znát vlastnosti podkladu vozovky. Druhým důležitým předpokladem je zajištění dostatečného financování, jelikož investiční náklady jsou oproti běžným vozovkám vyšší kvůli použití kvalitnějších materiálů a větších tloušťek asfaltových vrstev. Vyšší investiční náklady jsou potom vykoupeny nižšími provozními náklady. Detailněji jsou ekonomické aspekty tohoto konceptu popsány v kapitole 3.6. [2]



Při splnění těchto předpokladů vstupuje do hry samotný návrh takové vozovky. Po určení návrhové životnosti, jejíž délka může být i přes 40 let, se při použití konzervativních návrhových kritérií navrhnou jednotlivé vrstvy, z nich každá má své jasně dané požadavky, které musí splnit. Obrusná vrstva se navrhuje jako otěru odolná a stejně jako v ložné vrstvě je zde nutné zamezit vyjíždění kolejí. Podkladní vrstvy musí být dostatečně odolné proti únavě. Při periodické výměně obrusné vrstvy se zamezí tomu, aby se ničilo celé vozovkové souvrství, což napomáhá nízkým provozním nákladům, jelikož vozovka potom nevyžaduje mnoho údržby nad rámec výměny obrusné vrstvy. Tento fakt znamená také nižší spotřebu času uživatelů, jelikož minimalizuje čas strávený v kongescích vyvolaných častými opravami. V neposlední řadě je třeba zmínit i nižší dopady na životní prostředí díky delší životnosti vozovky. [2]

Zatímco v Evropě se tento koncept označuje jako „Long-Life Pavements“ (vozovky s dlouhou životností), v Americe se pro něj používá pojem „Perpetual Pavements“ (věčné vozovky).

Jeho obliba prudce vzrostla na začátku nového tisíciletí, kdy se o něj začala zajímat velká část odborné veřejnosti. Cílem bylo mimo jiné prodloužit životnost vozovky z původních 20 na více než 50 let. Při návrhu je kladen důraz na specifické poruchy pro každou asfaltovou vrstvu. Obrusné, ložné i podkladní vrstvy jsou vybrány, navrženy a odzkoušeny v souladu s působícími silami a napětími, aby v nich nevznikaly únavové trhliny nebo trvalé deformace. [2]

Hlavní součásti konceptu PP jsou stručně shrnuty v následujících odstavcích.

- homogenní a únosné podloží

Obecně lze říci, že musí být dosaženo minimální hodnoty CBR 5 % a modulu přetvárnosti 50 MPa. V místech s neúnosnými zeminami je třeba zvážit stabilizaci hydraulickými pojivy, například cementem nebo vápnem. Snížení vlivu klimatických změn na podloží by mělo být minimalizováno zajištěním dostatečného odvodnění a dostatečnou tloušťkou podkladních vrstev, aby se zabránilo zvedání mrazem v oblastech s dlouhými obdobími s teplotami pod bodem mrazu. [3]

- nestmelené a stmelené podkladní vrstvy

Tloušťka spodních podkladních vrstev se určí z mechanistického přístupu návrhu vozovek tím způsobem, aby vnesená svislá napětí byla nižší než požadovaná. Větší tloušťka podloží může být vyžadována v oblastech, které jsou náchylné k promrzání zeminy, dle citlivosti podkladní zeminy na promrzání. [3]

- RBL

Zahrnutí vrstvy z RBL je klíčovým prvkem netuhých vozovek s delší životností. Tato vrstva na rozhraní nestmelených a stmelených vrstev musí mít velkou odolnost vůči únavovému chování. Vzhledem k nutnosti dosažení ekonomicky efektivního návrhu je nutné snížit tloušťky horních asfaltových vrstev nejvyšší kvality, a proto hraje RBL naprosto zásadní roli pro dosažení delší životnosti. Je nutné dosáhnout efektivního spojení této vrstvy s vrstvou odolnou proti trvalým deformacím. Další klíčovou vlastností této



vrstvy je zabránění pronikání vlhkosti z podloží a spodních podkladních vrstev do vyšších vrstev konstrukce vozovky. [3]

- ložné vrstvy s vysokou odolností proti trvalým deformacím

Požadovaná tloušťka této vrstvy je určena dle očekávaného dopravního zatížení. Vysokou odolnost proti trvalým deformacím musí mít za všech provozních teplot. Musí obsahovat kamenivo nejvyšší kvality, včetně předrceného písku a v neposlední řadě asfaltové pojivo dostatečně dobré kvality a vhodné gradace. [3]



Obrázek 8: Předrcený písek [12]

- obnovitelné ohrusné vrstvy

Zde je kladen velký důraz na trvanlivost, odolnost proti trvalým deformacím a hlavně na výjimečně dobré protismykové vlastnosti. Velkou trvanlivostí je myšleno minimálně 16 let při vysokých dopravních intenzitách. Všechny tyto požadavky splňuje například směs SMA, jejíž kostra z hrubého kameniva toto umožňuje. [3]

V praxi je dosažení dlouhé životnosti podmíněno použitím materiálů nejvyšší kvality, což se týká zejména asfaltem stmelených vrstev. Velký důraz je kladen také kvalitě provedení. [3]

3.2 Návrh vozovky

Dnes se vozovky navrhují tzv. semi-mechanistickými metodami, které spočívají na principu modelu strukturální odezvy a přidružených modelech vybraných funkčních vlastností. Modely strukturální odezvy se vztahují k tahovým a tlakovým napětím ve vozovce, modely vybraných funkčních vlastností berou v potaz vypočtená napětí a hodnotí jimi míru porušení. Ve většině evropských zemích se používá návrhová životnost



20 let, pouze ve Velké Británii je jasně určeno, že vozovky by měly být navrhovány na 40 let, je-li to ekonomicky schůdné. [2]

Existuje více potenciálních mechanismů porušení, ale dvě nejhlavnější porušení brané v potaz v semi-mechanistickém přístupu jsou vyjíždění kolejí mající původ již v podloží a únavové trhliny, které se šíří od spodní hrany asfaltových vrstev. [2]

3.2.1 Rozdílné požadavky na jednotlivé vrstvy

Každá vrstva přispívá do celkové únosnosti vozovky, je tedy důležité, aby plnily určité požadavky. Díky tomu přispívají k únosnosti vozovky jako celku.

3.2.1.1 Zemní pláň a ochranná vrstva

Zemní pláň a ochranná vrstva poskytuje spodní podporu pro vozovky s dlouhou životností. Je tedy nezbytné, aby měly takové vlastnosti, které umožní vrstvám nad nimi plnit jejich roli. Zde se kontroluje tuhost, pevnost v tlaku a tloušťka ochranné vrstvy. Případné speciální požadavky mohou být vzaty v úvahu použitím tříd. [11]

V Rakousku požadují modul přetvárnosti $E_{\text{def},2}$ na zemní pláni minimálně 35 MPa měřený statickou zatěžovací zkouškou. V Německu požadují u ochranné vrstvy $E_{\text{def},2}$ větší než 45 MPa, ale na zemní pláň nemají žádné požadavky. V Maďarsku mají požadavky na únosnost podloží a ochranné vrstvy dle dopravního zatížení, například pro nejzatíženější komunikace požadují až 80 MPa. [11]

Francouzská metoda návrhu ochranné vrstvy obsahuje třídy založené na typu podloží. Pro vozovky s těžkou dopravou je požadován $E_{\text{def},2}$ 120 MPa. Tento požadavek lze splnit za pomoci nestmelených materiálů jen velmi těžko a často je tedy vyžadován nějaký způsob stabilizace podloží. [11]

V Řecku požadují, aby nejzatíženější vozovky obsahovaly ochrannou vrstvu s pevností přesahující 7 % CBR. [11]

V Nizozemí doporučuje návrhová příručka nejméně metrovou ochrannou vrstvu z těžkého kameniva. Není to však uvedeno v normě a tak se často navrhují ochranné vrstvy tenčí nebo se používají jiné materiály. [11]

V České republice určuje požadavky na podloží TP 170 [13] v následující tabulce:



Tabulka 1: Požadované minimální moduly přetvárnosti na pláni vozovky v závislosti na druhu zeminy a zlepšení podloží vozovky (aktivní zóně) [13]

Požadovaný modul přetvárnosti, $E_{def,2}$, MPa	Charakteristika podloží, návrhová úroveň porušení a třída dopravního zatížení
30	Jemnozrnné zeminy (F), pouze pro D1 v TDZ VI a pro D2
45	Jemnozrnné zeminy (F), zahliněné písčité a štěrkovité zeminy (S2 až S5, G3 až G5) nebo zeminy zlepšené příměsí drtě na $CBR > 15 \%$, aktivní zóna v tloušťkách podle tabulky 9 ČSN 73 6133 ze zeminy o návrhové hodnotě $CBR > 15 \%$ nebo z jiného vhodného materiálu, upravené skalní podloží z hornin R5 a R6.
60	Písčité a štěrkovité zeminy (S2, G3 a G4) při návrhové hodnotě $CBR > 15 \%$, aktivní zóna ze zlepšené zeminy příměsí pojiv při dosažení $CBR_{sat} > 10 \%$ nebo ze zeminy o návrhové hodnotě $CBR > 25 \%$ či z jiného vhodného materiálu, upravené skalní podloží z hornin R4 až R6.
90	Kamenitá sypanina, upravené skalní podloží z hornin R1 až R3, zeminy G1 a G2, zlepšené zeminy příměsí pojiva při dosažení $CBR_{sat} > 47 \%$

Poznámka – Hodnoty modulu přetvárnosti podloží ze zemin s přísadou pojiv jsou uvedeny pro stanovení po 3 dnech po dokončení v případě použití vápna a po 7 dnech v případě použití cementu.

3.2.1.2 Podkladní vrstvy a kryt

Podkladní a krytové vrstvy mohou být navrženy tak, aby měly vlastnosti vhodné pro vozovku s dlouhou životností. Mezi způsoby, jak toho docílit, patří omezení použití některých materiálů pro vysoká dopravní zatížení, vyšší únosnost podloží, určení limitního napětí, při kterém nedochází k narušení struktury materiálu, či použití speciálních asfaltových směsí, které jsou navrženy tak, aby bylo dosaženo snížení narušení jejich struktury. [11]

Francouzská návrhová metoda určuje vhodné materiály pro spodní podkladní vrstvu dle třídy dopravního zatížení. Obecně lze říci, že čím vyšší je dopravní zatížení, tím kvalitnější materiál je požadován pro dolní podkladní vrstvu. Nestmelené materiály lze použít pouze pro třídu dopravního zatížení T3 (maximálně 150 přejezdů TNV/24h), což lze přibližně přirovnat k třídě dopravního zatížení V v ČR (100 přejezdů TNV/24h). Ve Francii jsou z toho důvodu velmi rozšířené hydraulicky stmelené podkladní vrstvy. Pro třídu dopravního zatížení vyšší než T3 jsou u těchto vrstev vyšší požadavky na zrnitost použitých materiálů a musí dosáhnout určité dlouhodobé mechanické vlastnosti. Navíc je pro nejtěžší dopravu požadována určitá minimální kvalita asfaltových vrstev, ale je doporučeno použít asfaltové směsi s vyšším obsahem pojiva. [11] [13]

Německá návrhová metoda požaduje modul přetvárnosti dolní podkladní vrstvy minimálně 150 MPa pro třídu dopravního zatížení IV a vyšší, zatímco pro nižší třídy dopravního zatížení (V a VI) je požadavek na modul přetvárnosti snížen na 120 MPa. Tloušťka asfaltem stmelených vrstev může být zmenšena o 20 mm při navýšení modulu přetvárnosti ze 150 MPa na 180 MPa, respektive ze 120 MPa na 159 MPa.



Zajímavostí pro porovnání je, že požadavek na modul přetvárnosti 120 MPa je v sousedním Polsku uveden pro největší dopravní zatížení. Německá návrhová metoda požaduje u nejtěžšího dopravního zatížení (SV, I, II) zvětšení tloušťky obrusné vrstvy z 35 mm na 50 mm, což dovoluje snížit tloušťku ložné vrstvy z 80 mm na 70 mm. Za určitých podmínek lze použít tloušťku obrusné vrstvy 40 mm a upravit tak tloušťku ložné či podkladní vrstvy při zachování celkové tloušťky asfaltových vrstev. [11]

Ve Velké Británii je tloušťka dolní podkladní vrstvy určena dle pevnostních charakteristik materiálu ochranné vrstvy. Spodní vrstvy vozovky musí zajistit po dobu její životnosti dobrou podporu, proto je třeba do návrhu zahrnout i řešení odvodu vody. Návrh asfaltových vrstev je založen na čtyřech standardních druzích asfaltových směsí a tloušťka jednotlivých vrstev se volí tak, aby nebyly překročeny únavové parametry směsi, ani velikost napětí v podloží. Pro tyto směsi byla určena limitní tloušťka, při které je porušení dané vrstvy nepravděpodobné. Vozovky s dlouhou životností lze navrhovat pouze podle dvou návrhových metod, ovšem při prokázání srovnatelných výsledků lze použít i jiné návrhové metody. [11]

V USA byl vyvinut koncept věčných vozovek, který využívá asfaltové směsi odolnější proti únavě jako podkladní vrstvy v kombinaci se směsmi s polymerem modifikovaným asfaltem použitými v ložné vrstvě, kvůli zamezení deformací. Lepší únavové vlastnosti jsou dosaženy zvýšením množství asfaltového pojiva o 0,5 % v dané směsi. [11]

Použití polymerem modifikovaných asfaltových pojiv upravují i belgické předpisy pro komunikace s vysokým dopravním zatížením. [11]

3.3 Skladba věčné vozovky

V kapitole 3.1 byly popsány zkušenosti z Evropy i z Ameriky, které však spíše využívaly možnost na sebe neustále vrstvit další a další asfaltem stmelené vrstvy, což při vyloučení únavových trhlin ve spodní asfaltové vrstvě pomohlo dále snížit její namáhání. V kapitole 3.5.3 bude popsána na základě zahraničních zkušeností možnost modernizace stávající vozovky na vozovky věčné či s dlouhou životností, avšak tyto způsoby údržby opět vedou pouze na mnohem tlustší konstrukci vozovky. Tento způsob však není univerzálně použitelný, zejména v intravilánu je v naprosté většině případů nemožné s niveletou vozovky hýbat, proto je při návrhu nových komunikací nebo při kompletní rekonstrukci těch stávajících nutné myslet na to, jak znatelně prodloužit životnost této komunikace, aniž by došlo k výše zmíněné úpravě nivelety nebo pokládce zbytečně abnormálně tlustého asfaltového souvrství.

„Věčná“ vozovka znamená, že vozovka bude navržena tak, aby vydržela přinejmenším 50 let dopravního zatížení bez rekonstrukce. Předpokládá se, že bude prováděna jen pravidelná obnova obrusné vrstvy. V nejspodnější asfaltové vrstvě v místě výskytu tahových přetvoření musí být navržena takzvaná „protiúnavová“ vrstva s velkou odolností proti únavě. To minimalizuje riziko vzniku únavových trhlin ve spodní části asfaltových vrstev vozovky. Ty jsou jedním z hlavních porušení konstrukce. Pod povrchem vozovky v zóně velkých tlakových a smykových napětí musí být navržena vrstva s velkou odolností proti



deformacím a odolností proti vzniku trhlin za nízkých teplot (závisejících na klimatických podmínkách). To minimalizuje výskyt trvalých deformací, jako je vyjždění kolejí a riziko vzniku trhlin za nízkých teplot. [14]

Dle tohoto přístupu byla první „věčná“ vozovka v Polsku postavena na rychlostní komunikaci S8 mezi obcemi Opacz a Paszków, v celkové délce 12,4 km. Jde o jeden z nejméně zatížených úseků silniční sítě v Polsku při jižní hranici Varšavy, kde se spojují směry na dvě velká města Krakow a Wroclaw, s dopravním zatížením okolo 100 000 vozidel za den. [14]

Původně byla při návrhu vozovky uvažována tradiční konstrukce asfaltové vozovky s celkovou tloušťkou asfaltových vrstev 310 mm. Tato vozovka byla navržena na dopravní zatížení nejméně 20 let. Analýza ukázala, že při zlepšení kvality pojiva a směsi může být tloušťka asfaltových vrstev snížena a stále bude předpokládána životnost z hlediska únavy významně vyšší. Užitím asfaltové směsi s vysokým modulem tuhosti AC WMS 16 s pojivem PMB 25/55-60 do ložné vrstvy (pro lepší odolnost proti vzniku trhlin za nízkých teplot) a do podkladní vrstvy (pro lepší odolnost proti únavě) by se docílilo snížení tloušťky vozovky o 50 mm proti vozovce s tradičními směsmi v ložné a podkladní vrstvě. Když se dále nahradila směs s vysokým modulem tuhosti v podkladní vrstvě pružnější směsí s větší odolností proti únavě, došlo k dalšímu prodloužení životnosti vozovky tak, že tím vznikla „věčná“ vozovka. Konečný návrh vycházející z myšlenky „věčné“ vozovky byl na životnost 50 let pro dopravní zatížení 142 milionů návrhových náprav 100 kN. [14]

Nejméně používanou obrusnou vrstvou v Polsku a pravděpodobně v celé Evropě je asfaltový koberec mastixový díky své trvanlivosti. Proto byla zvolena vrstva SMA 8 PMB 45/80-55 tloušťky 30 mm. [14]

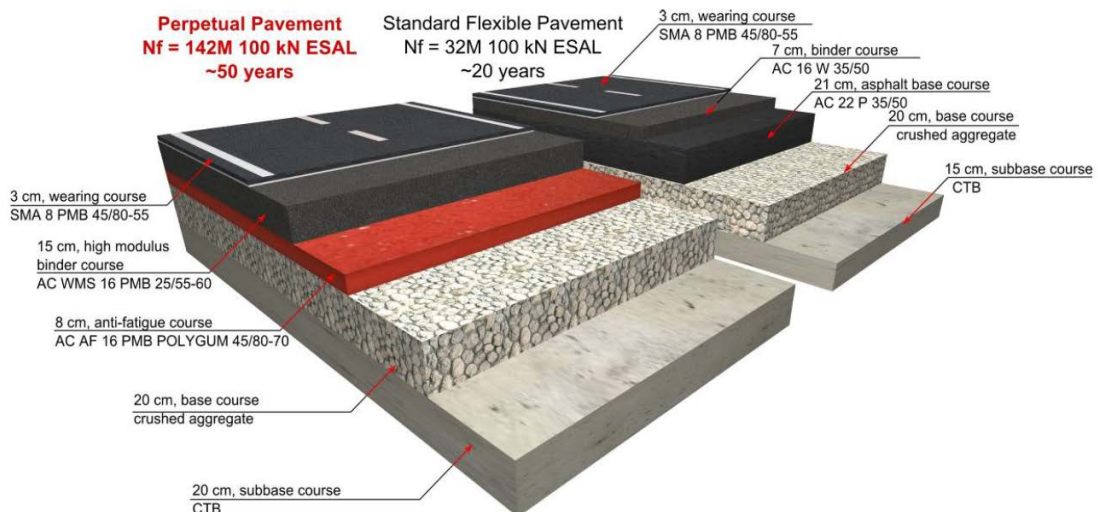
Protože ložná vrstva pro „věčnou“ vozovku musí být tuhá a odolná proti deformacím, byla zvolena asfaltová směs s vysokým modulem tuhosti AC WMS 16 (= VMT 16) s PMB 25/55-60 pro svoji dobrou odolnost proti vyjždění kolejí a proti únavě. Použita byla tloušťka 150 mm. [14]

Aby byla zaručena dlouhá životnost podkladní vrstvy a její velmi dobrá odolnost proti únavě, měla by být použita pojiva vysoké kvality. Taková pojiva mají velkou odolnost proti vzniku únavových trhlin, dobrou odolnost proti vodě a přilnavost. Pro účely tohoto projektu hledali autoři optimální řešení mezi technologickou uskutečnitelností a ekonomickou ziskovostí. Obecně je třeba nalézt optimum mezi parametry směsi (zrnitost a mezerovitost), tloušťkou vrstvy (z hlediska navrhování vozovek a technologických možností) a kvalitou pojiva. Byla analyzována řada možností jako litý asfalt, asfaltový koberec mastixový, jemnozrný asfaltový beton s různou velikostí maximálního zrna a různými tloušťkami vrstvy. Výsledkem těchto analýz bylo použít do vrstvy s velkou odolností proti únavě směs ACP s maximálním zrnem 16 mm se speciálním pojivem PMB Polygum 45/80-70. To zajistilo nejvyšší odolnost směsi proti únavě. Tloušťka vrstvy byla nakonec zvolena 80 mm, aby se zajistilo, že materiál s velkou odolností proti únavě pokryje zónu, kde působí napětí v tahu. Pojivo PMB Polygum 45/80-70 vykázalo mimořádné výsledky - směs s tímto pojivem měla vynikající odolnost proti únavě ($\epsilon_6 > 340 \mu\text{m/m}$ při zkoušce 4PB-PR pro 10 °C a 10 Hz). [14]



Pro návrh vozovky byla použita francouzská návrhová metoda, protože kritérium únavy zohledňuje nejen tuhost a odolnost proti únavě při určitém přetvoření, ale také sklon únavové přímky, což je velmi důležité pro různé laboratorní výsledky na různých materiálech. [14]

Výsledný návrh „věčné“ vozovky s podkladní asfaltovou vrstvou s velkou odolností proti únavě pro rychlostní komunikaci S8 v Polsku a srovnání s původně navrženou tradiční vozovkou se silničním asfaltem v ložné a podkladní vrstvě je na obrázku 9. [14]



Obrázek 9: Skladba navržené "věčné" vozovky pro rychlostní komunikaci S8 a srovnání s tradiční asfaltovou vozovkou [14]

Překlad použitých termínů na obrázku 9:

- Perpetual Pavement $N_f=142M$ 100 kN ESAL ~ 50 years = „věčná“ vozovka pro celkový počet návrhových náprav 100 kN $N_f=142$ milionů za cca 50 let
- Standard Flexible Pavement $N_f=32M$ 100 kN ESAL ~ 20 years = standardní netuhá vozovka pro celkový počet návrhových náprav 100 kN $N_f=32$ milionů za cca 20 let
- wearing course = obrusná vrstva
- binder course = ložná vrstva
- asphalt base course = asfaltová podkladní vrstva
- base course crushed aggregates = nestmelená podkladní vrstva z drčeného kameniva
- subbase course CTB = vrstva upravená cementem
- high modulus binder course = ložná vrstva ze směsi s vysokým modulem tuhosti
- anti-fatigue course = vrstva s velmi vysokou odolností proti únavě

Podrobná analýza životního cyklu, stejně jako analýza přínosů pro veřejného investora při srovnání s tradiční konstrukcí vozovky, ukázala jasně ziskovost investice do „věčné“ vozovky. [14]



3.4 Výstavba

Samotná výstavba vozovek s dlouhou životností se od výstavby běžných vozovek v ničem neliší, pro pokládku asfaltových vrstev platí TKP 7 – Hutněné asfaltové vrstvy [15].

Pokud se do podkladní nebo ložné vrstvy použije směs typu SMA, nemusí být hutnící válce vybavené zařízením pro zdrsňující posyp, jelikož tyto vrstvy nejsou v přímém kontaktu s projíždějící dopravou a klást na ně požadavky na protismykové vlastnosti je bezpředmětné.

3.5 Údržba

Nedávné studie prokázaly, že dobře provedené netuhé vozovky na únosném podloží nejsou náchylné k únavovým trhlinám nebo k rozvoji trvalých deformací ve vozovkovém souvrství, nicméně to však neznamená, že se trhliny nemohou šířit z obrusných do podkladních vrstev, stejně tak zde mohou vzniknout trvalé deformace, byť jen v obrusné vrstvě. Včasnou výměnou poškozených obrusných vrstev lze docílit dlouhé životnosti celého vozovkového souvrství. [11]

Obrusná vrstva těchto vozovek by měla dosahovat velmi dobrých povrchových vlastností, zejména dobré rovinnosti, výborných protismykových vlastností, měla by napomoci snižovat hluk od dopravy, ideálně by měla dobře odrážet dopadající světlo a neměly by se na ní vyskytovat výtluky nebo vyjeté koleje. Přirozeně se tyto vlastnosti časem zhoršují vlivem dopravního zatížení a životního prostředí. Pokud se však některá z nich dostane za určitou smlouvenou mez, často označovanou jako mez zásahu, měla by se provést odpovídající údržba. [11]

3.5.1 Vyhodnocování stavu vozovek

Aby mohl být zvolen nejvhodnější způsob údržby, je nutné znát současný stav dané vozovky, a proto je nezbytné používat systematickou metodu, ze které lze získat potřebná data o stavu vozovky.

Vyhodnocování stavu vozovek probíhá ve dvou úrovních: síťové a projektové. Na každé úrovni jsou sbírána různými způsoby. Úkolem vyhodnocování na úrovni síťové je měření proměnných parametrů v silniční síti, tato data vyhodnotit a na jejich základě potom určit prioritní pořadí pro údržbu jednotlivých úseků. Úroveň projektová se skládá z detailnější analýzy vozovek, které byly pro údržbu vybrány podle plánu, a jejím úkolem je diagnostikovat problém a vybrat vhodný způsob opravy. [11]

Management údržby vozovek obecně je kritická část dosahování dlouhé životnosti vozovek, zahrnuje v sobě široké spektrum úkolů. Aby bylo dosaženo veškerých ekonomických výhod, které vozovky s dlouhou životností přinášají, je potřeba nastavit správný postup při jejich údržbě. Postup by měl sestávat nejprve z volby vhodných metod vyhodnocování stavu vozovek. U vozovek vykazujících vlastnosti vozovek s dlouhou životností by se mělo vyhodnocování omezit pouze na stav krytových vrstev. Dalším bodem je určení kritérií pro údržbu, tzv. mezi zásahu. Následuje volba nejefektivnějších způsobů údržby. [11]



Existuje mnoho metod pro vyhodnocení technického stavu vozovek. Tyto metody lze rozdělit následovně:

- metody založené na poruchách
 - porovnání s limitními hodnotami
 - vyhodnocení na základě (často empirických) modelů poškození
 - použití empirických vztahů mezi životností a poruchami
 - převedení poruch na klasifikační stupně provozní způsobilosti vozovky
- metody založené na napětí
 - v asfaltových vrstvách
 - v podkladních vrstvách
 - v podloží
- metody založené na posouzení zpětně vypočítaných modulů tuhosti
 - porovnání zpětně vypočítaných modulů tuhosti proti referenčním hodnotám
- metody založené na vizuálním posouzení a informacích o technickém stavu
 - posouzení každé vrstvy zvlášť dle typu a tloušťky, určení klasifikačního stupně provozní způsobilosti vozovky – strukturního čísla [11]

Většina těchto metod požaduje měření poruch v jízdní stopě, znalost skladby vozovky včetně tlouštěk jednotlivých vrstev a vizuální posouzení. Analytické metody používají nejčastěji únavová kritéria pro asfaltové vrstvy, často také kritérium stlačení podloží. [11]

Metody založené na výpočtu napětí ve vozovce jsou zaměřené na odhadu zbytkové životnosti. To je rozdíl oproti metodám založeným na vyhodnocování poruch, u nichž se hodnotí, zda je stav vozovky vyhovující nebo zda vyžaduje nějaký způsob opravy. I tyto metody však lze použít k určení zbytkové životnosti. Zbytková životnost odkazuje na zbývající čas, než bude třeba provést výměnu krytu nebo překrytí, nikoli kompletní rekonstrukci silnice. [11]

U vozovek s dlouhou životností se nepočítá s údržbou celé konstrukce vozovky, veškerá údržba zde probíhající zahrnuje všechny správcem povolené způsoby, které vozovce navrátí její funkční charakteristiky. Nejedná se tedy o další zlepšování únosnosti vozovky a jiných parametrů. Pro co nejefektivnější údržbu je důležitý včasný zásah a použití vhodné technologie údržby. V následující tabulce je na základě poznatků z Nizozemí shrnuto několik nejčastějších poruch a možností údržby včetně posouzení vhodnosti daného zásahu při příslušné poruše. [11]



Tabulka 2: Příklady vhodných způsobů údržby na základě poznatků z Nizozemí [11]

Hlavní typ porušení	Způsob údržby							
	Obrusná vrstva z ACO, SMA, BBTM, ...							Obrusná vrstva z PA
	Nátěr, mikrokoberec	Recyklace na místě	Výměna obrusné vrstvy	Překrytí	Výplň nerovností	Podélná reprofilace	Oprava příčného sklonu	Výměna obrusné vrstvy z PA
Konstrukční poruchy				●				
Povrchové a příčné trhliny	●	○	●	●				●
Ztráta makrotextury	●	●	○	○				●
Podélné nerovnosti		○	○	○		●		●
Příčné nerovnosti		○	○	○	●			●
Ztráta protismykových vlastností	●	●	○	○				●
Nedostatečný příčný sklon		○	○	○		○	●	●

Možná údržba ○

Nejefektivnější údržba ●

Z této tabulky je dobře vidět, že každá porucha má několik možností, jak může být odstraněna, nicméně je nutné vzít v úvahu, jak cenově efektivní daná údržba je (vztaženo k její trvanlivosti), stejně tak je nutné posoudit dopady na dopravu způsobené dopravním omezením a v neposlední řadě i vliv na životní prostředí. [11]

3.5.2 Trvanlivost obrusných vrstev

Při budování vozovek s dlouhou životností nebo u věčných vozovek není kritickým parametrem únava materiálu na spodním lici asfaltového souvrství, ale trvanlivost obrusné vrstvy vozovky. Aby se vozovka udržela v dobrém stavu, stačí provádět výměnu právě pouze obrusné vrstvy. [2]

Důležité pro dosažení očekávané životnosti je pokládat obrusnou vrstvu na řádně navrženou vozovku, kde trvanlivost obrusné vrstvy není limitována trhlinami šířícími se z nižších vrstev vozovky, tzv. „bottom-up“ trhliny. Dále se předpokládá správný návrh a zhutnění všech směsí. Například směs SMA, ve které se vyjíždějí koleje, není správně navržena. [2]

V následujících tabulkách se nachází výsledky průzkumu trvanlivosti obrusných vrstev v evropských státech. Trvanlivost jednotlivých vrstev se liší i napříč jednotlivými zeměmi podle místních podmínek, klimatu, složení směsi, druhu použitých pojiv a kameniva, povoleného zatížení na nápravu a skutečných

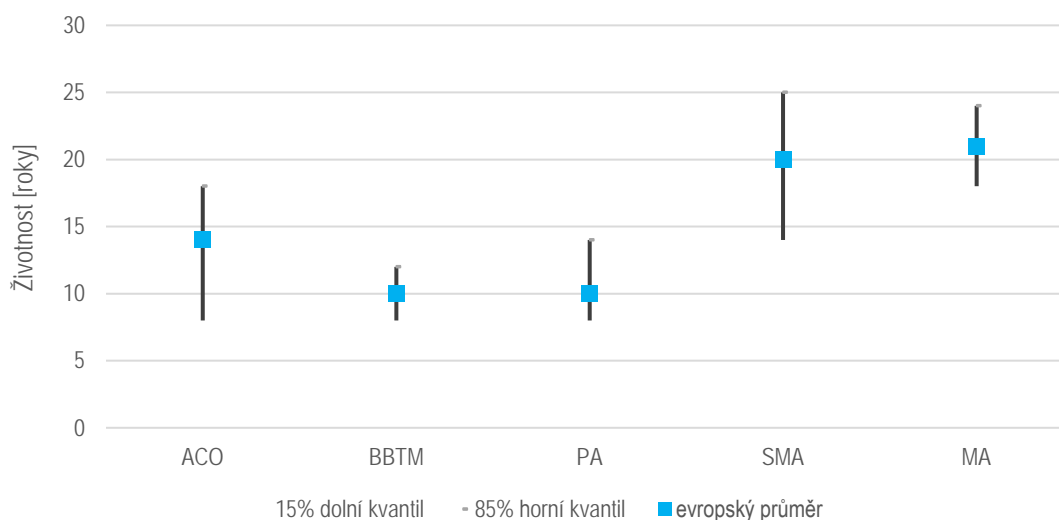


dopravních intenzit, zejména TNV. V některých případech ovlivňují trvanlivost obrusné vozovky nejvíce její protismykové vlastnosti. [2]

V tabulce 3 a grafu 1 je zobrazena trvanlivost vybraných asfaltových směsí používaných pro obrusné vrstvy na dálnicích a silnicích s vysokými intenzitami provozu, v tabulce 4 a grafu 2 je zobrazeno totéž, jen pro méně zatížené komunikace. Zde není uvedena směs PA, jelikož se na těchto komunikacích nepoužívá. [2]

Tabulka 3: Trvanlivost obrusných vrstev na dálnicích nebo silnicích s vysokými intenzitami provozu [2]

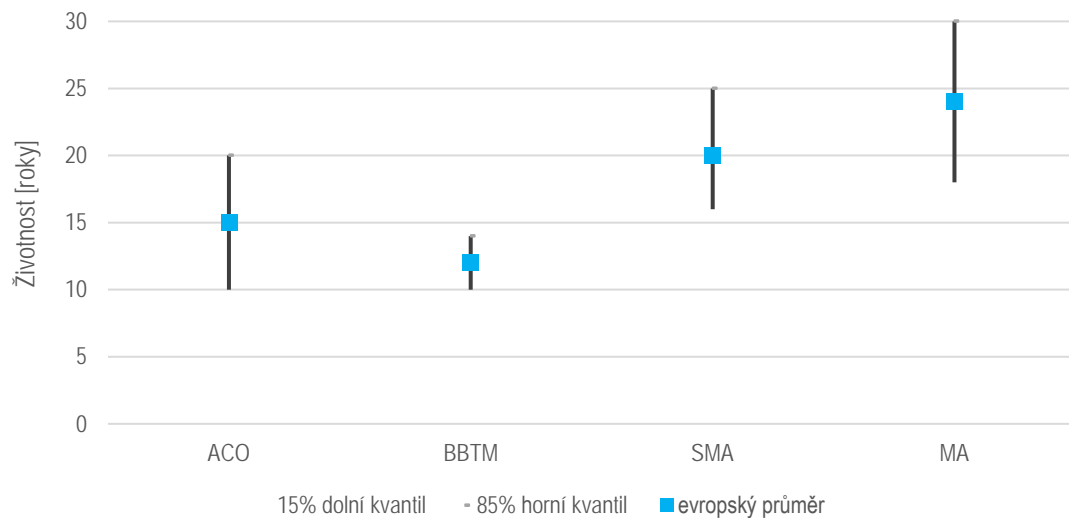
	Životnost v letech		
	15% dolní kvantil	evropský průměr	85% horní kvantil
ACO	8	14	18
BBTM	8	10	12
PA	8	10	14
SMA	14	20	25
MA	18	21	24



Graf 1: Trvanlivost obrusných vrstev na dálnicích nebo silnicích s vysokými intenzitami provozu [2]

Tabulka 4: Trvanlivost obrusných vrstev na méně zatížených komunikacích [2]

	Životnost v letech		
	15% dolní kvantil	evropský průměr	85% horní kvantil
ACO	10	15	20
BBTM	10	12	14
SMA	16	20	25
MA	18	24	30



Graf 2: Trvanlivost obrusných vrstev na méně zatížených komunikacích [2]

3.5.3 Modernizace stávajících vozovek na vozovky s dlouhou životností

3.5.3.1 Velká Británie

Potřeba vyhodnocení stavu vozovky je dána požadavkem dle síťové úrovně vyhodnocování vozovek, případně pokud se uvažuje o změně využití vozovky, například jejím rozšířením. Hlavním nástrojem využívaným pro zjištění potřeby údržby je deflektograf, z jehož výstupu měření lze dle zjištěných průhybů usuzovat celkovou životnost vozovky. Lze odhadnout zbytkovou životnost na základě následujících faktorů:

- znalost dopravního zatížení, kterým byla vozovka v minulosti zatížena
- predikce budoucího dopravního zatížení
- skladba vozovky. [11]

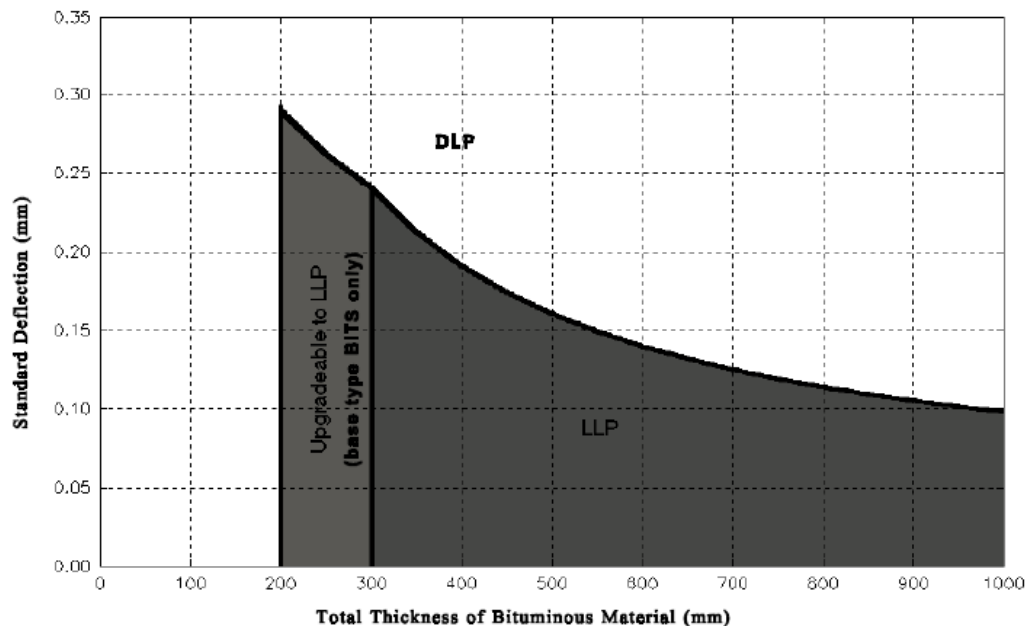
Kromě zbytkové životnosti je možné určit též tloušťku nových asfaltových vrstev (překrytí), aby vozovka dosáhla požadované životnosti. Výše popsané vztahy byly zkoumány a během let kompletně přepracovány, zejména když v posledních několika letech začaly počítat s vozovkami s dlouhou životností.

Měření deflektografem probíhá v obou jízdních stopách a bere se v úvahu 85% percentil nejvyšších průhybů na každých 100 m délky. V minulosti tyto měření probíhaly běžně, dnes se však používají už jen cíleně na komunikacích, na kterých byla navržena závažnější oprava. [11]

Ve Velké Británii používají jednoduché pravidlo, zda lze vozovku modernizovat podle konceptu LLP. Netuhá vozovka musí mít 200 až 300 mm asfaltem stmelených vrstev, průhyby musí být dostatečně malé a její konstrukce musí být neporušená. Po modernizaci dle konceptu LLP musí být tloušťka asfaltových vrstev



300 mm. Lze to vidět na grafu 3, na jehož svislé ose je zobrazena velikost průhybu, na vodorovné celková tloušťka asfaltem stmelených vrstev. [11]



Graf 3: Podmínky možnosti modernizace vozovky na koncept LLP [11]

Například u vozovky s tloušťkou 260 mm a s dostatečně malým průhybem stačí přidat brusnovou vrstvu v tloušťce 40 mm. Pokud by v ní byly nějaké poruchy (například trhliny až do hloubky 40 mm), následovalo by vyfrézování 40 mm a poté pokládka 80 mm asfaltových vrstev, aby vozovka získala status LLP. Pokud by poruchy šly více do hloubky, modernizace by nebyla možná. [11]

Rozhodnutí o modernizaci není pouze technická otázka, záleží také na tom, zda je ekonomicky výhodné to provést. Například u vozovek splňujících podmínky modernizace, u kterých by stačilo položit další asfaltovou vrstvu jako překrytí těch stávajících, bude rozhodující, zda se taková investice vyplatí v závislosti na očekávaných dopravních intenzitách. [11]

Průhyby jsou korigovány na průhyby při standardní teplotě. Tento poznatek se zkombinuje s tloušťkou asfaltem stmelených vrstev a dle již popsaného grafu 3 se určí její potenciál stát se vozovkou s dlouhou životností. Základní požadavek hovoří o minimální tloušťce asfaltových vrstev 300 mm a v kombinaci s velikostí průhybu lze získat informaci o tom, zda je vozovka v dobrém technickém stavu. Existují ovšem i vyjádření odborné veřejnosti, že při použití podkladních vrstev s vysokým modulem tuhosti lze vozovku považovat vhodnou pro koncept LLP, i když tloušťka asfaltových vrstev nedosahuje 300 mm. [11]



3.5.3.2 Nizozemí

V Nizozemí není koncept LLP zaveden jako součást návrhu vozovek, ve kterých nevznikají únavové trhliny, ale je používán při návrhu vozovky a následné strategické údržby, přičemž se nikdy nepřekročí určitá hranice rozsahu únavového poškození za předpokladu očekávaných dopravních intenzit a očekávané strategické údržby. [11]

V Nizozemí tedy nelze jednoznačně určit, zda se jedná o „věčnou“ vozovku, ale pouze se zhodnotí, zda stále zbývá dost času do doby, kdy bude nutná údržba z důvodu dosažení daného stupně poškození únavovými trhlinami. [11]

Tato strategie se používá pro netuhé vozovky, kde zbytková životnost je určena napětím v asfaltových vrstvách, dřívějším a budoucím zatížením od dopravy. Někdy je možné, že zbytková životnost vyjde velmi dlouhá, například 20 nebo 30 let. To se stává zvláště v těch případech, pokud mají vozovky nestmelené podkladní vrstvy, díky čemuž v asfaltových vrstvách vznikají malá napětí, nebo pokud jsou tyto vrstvy velmi tlusté, například v oblastech, kde dochází k nerovnoměrnému sedání. Takové vozovky mohou být prakticky považovány za „věčné“. [11]

U stmelených podkladních vrstev může vyjít zbytková životnost určená z napětí v asfaltových vrstvách dokonce ještě vyšší. Pokud se zde neobjevují reflexní trhliny, únavové trhliny v podkladních vrstvách či pokud nejsou vrstvy vozovky poškozeny klimatickými jevy, lze i tyto vozovky považovat za „věčné“. [11]

Bohužel pro některé asfaltové směsi a materiály používané v podkladních vrstvách nejsou dostupné údaje o jejich únavových vlastnostech. Se stále nově vyvíjenými inovativními materiály se tento problém stane více palčivým a předpovědět, zda bude mít daná vozovka vlastnosti vozovek s dlouhou životností, bude velmi těžké. Jedna z navržených metod navrhuje sledovat průhyby v čase. Pokud se tyto průhyby v „nezatížené“ linii (tedy mezi jízdními stopami) v čase nezvětšují a pokud se průhyby v jízdních stopách značně neliší od těch v „nezatížených“ liniích, obojí během dlouhé doby (řekněme 10 let), bude vozovka pravděpodobně vykazovat dlouhou životnost. [11]

Únosnost vozovek se v Nizozemí nesleduje průběžně. Strukturální zhodnocení se provádí pouze v následujících případech:

- při podezření na konstrukční problém po vizuálním posouzení
- pokud se provádí rozsáhlá oprava a není jisté, zda má vozovka dostatečnou zbytkovou životnost
- při zřízení jízdního pruhu v místě, kde byl doposud pruh odstavný; v současnosti je to důležitý bod u této tematiky [11]

Konstrukční problémy jsou v Nizozemí tak málo rozšířené, že systematický monitoring by se nevyplatil. Dalším důvodem jsou dopravní omezení při tomto monitoringu. [11]



Indikátorem, zda vozovka zapadá do konceptu vozovek s dlouhou životností, je její zbytková životnost, v některých případech k jejímu zjištění stačí jen určit napětí v podkladní vrstvě, které musí být v určitém požadovaném rozsahu. Z výsledků měření deflektometrem se zpětně určí modul tuhosti, z čehož se tato napětí vypočítají a porovnají se s referenčními hodnotami. [11]

V případě krátké zbytkové životnosti vozovky lze navrhnout překrytí vozovky novou asfaltovou vrstvou, aby se zpomalil rozvoj únavového poškození. V nizozemské metodě se předpokládá, že množství vzniklých trhlin se ještě o trochu zvýší až na 20 % délky úseku. V kombinaci s odhadem současného únavového poškození a očekávanými dopravními intenzitami se navrhne tloušťka překrytí vozovky. Tyto dopravní intenzity se nejčastěji určují na dalších 20 let, lze tedy považovat vozovku po přidání další asfaltové vrstvy za vozovku s dlouhou životností. Pokud by se tloušťka překrytí ještě o trochu zvýšila, dala by se životnost navýšit třeba i o 30 let. [11]

U vozovek, kde se trhliny a jiné poruchy vyskytují na více než 20 % délky úseku, nelze překrytí vypočítat přímo. V tomto případě lze lokálně očekávat výskyt výtluků a řešením je jejich oprava a následné překrytí vozovky novou asfaltovou vrstvou jako ve výše zmíněném případě s tím rozdílem, že se připouští rozvoj únavového porušení maximálně o 5 %. [11]

3.6 Ekonomické aspekty

Cílem konceptu vozovek s dlouhou životností je dosáhnout nižších ročních provozních výdajů díky vyšší životnosti vozovky a údržbě, které je sice méně, ale je efektivnější. Pro stanovení ekonomických přínosů by měly být veškeré finanční náklady zhodnoceny analýzou nákladů a přínosů (Cost/Benefit Analysis, CBA). [2]

3.6.1 Analýza nákladů a přínosů (CBA)

Při použití metody je důležité vzít v úvahu následující:

- počáteční investiční náklady
- provozní náklady na periodickou údržbu a organizaci dopravy během údržby
- spotřeba času uživatelů (zejména z důvodu zdržení kvůli pracím na silnici)
- náklady vyplývající z nehod uživatelů a pracovníků údržby
- ekologické dopady ze stavby, údržby a provozu vozovky

Některé z těchto nákladů lze určit poměrně jednoduše, jiné tak lehce určit nejde. Počáteční investiční náklady lze určit jednoduše, s údržbou je to lehce složitější, do ní je třeba zahrnout i nepřímé administrativní náklady. Náklady na spotřebu času uživatelů lze získat z modelů založených na pozorování dopravních proudů a kapacit komunikací. Náklady týkající se bezpečnosti provozu nelze vyčíslit jednoduše kvůli



nedostatku relevantních dat. U ekologických dopadů je pozornost soustředěna zejména na recyklaci materiálů z vozovky, znečištění ovzduší kvůli spotřebě paliv a znečištění hlukem plynoucí z údržby. [2] [11]

Zkušenosti s CBA z Velké Británie ukazují, že vozovky s dlouhou životností jsou cenově efektivnější než konvenční vozovky. Během deseti let lze dle výpočtů ušetřit přijetím konceptu vozovek s dlouhou životností až 350 milionů euro (asi 9,5 miliardy Kč). [2] [11]

3.6.2 Další ekonomické pohledy na věc

Některé náklady v CBA jsou abstraktní a určení jejich výše je složité, existují proto i jednodušší způsoby odhadu ekonomických přínosů vozovek s dlouhou životností. Nejjednodušší z těchto způsobů je porovnat investiční náklady a náklady na údržbu dvou druhů vozovek, z nichž jeden je vozovka s dlouhou životností a druhý typ je konvenční vozovka. [2]

4 Pokusný úsek II/236 Kačice – Smečno

Pro ověření poznatků, které byly v této práci shrnuté, byl vybrán pokusný úsek nacházející se na silnici II/236 o délce cca 1500 m v úseku Kačice – Smečno. Tato komunikace byla dle Celostátního sčítání dopravy 2010 zatížena 987 přejezdy TNV za 24 hodin v obou směrech, intenzita dopravy v úseku byla 5817 vozidel za den, dle Celostátního sčítání dopravy 2016 intenzita přejezdů TNV vzrostla na 1009 za 24 hodin a intenzita dopravy se zvýšila na 6111 vozidel za den. Komunikace slouží jako spojka mezi dálnicemi D6 a D7, respektive silnicí I/7, a v případě dopravních komplikací na jedné z těchto dálnic je využívána i těžkou nákladní dopravou.

Celková délka zkušebního úseku 1500 m je rozdělena v ložné vrstvě na 3 podúseky o délce 500 m a v obrusné vrstvě na 6 podúseků o jednotné délce 250 m. Jedná se o dostatečnou délku jednotlivých podúseků, aby mohla být sledována kvalita a chování nové technologie v průběhu času. V ložné vrstvě byla provedena pokládka tří typů nové technologie SMA L 22 S, které se vzájemně liší množstvím přidávaného asfaltového recyklátu (0 %, 20 % a 40%). Tloušťka pokládané ložné vrstvy byla 10 cm. Na každém podúseku ložné vrstvy byly realizovány dva typy asfaltových koberců o délce 250 m, které se vzájemně ve třech variantách lišily množstvím přidávaného R-materiálu, kdy doposud platné předpisy jeho použití v těchto směsích zakazují. Jedná se o směsi SMA 11 S a BBTM 8 A s obsahem R-materiálu odstupňovaným jako u výše zmíněné směsi SMA L 22 S (0 %, 20 % a 40%). Pokládka obrusné vrstvy proběhla v tloušťce 3 cm.



Obrázek 10: Směs SMA L 22 S za hladící lištou finišeru



Obrázek 11: Tloušťka vrstvy směsi SMA L 22 S před zhutněním

Ložnou i obrusnou vrstvu na tomto pokusném úseku pokládala společnost Froněk, spol. s r.o. U asfaltové směsi pro ložnou vrstvu SMA L 22 S se jednalo o její premiéru při pokládce v ČR. Při pokládce SMA L 22 S byla pro pokládkovou četu nová nejen tato směs, ale i pokládaná tloušťka 10 cm, proto bylo na prvních několika metrech pokládané ložné vrstvy nutné zjistit, jak se bude směs po zhutnění chovat a určit



tak potřebné nadvýšení, aby po zhutnění měla vrstva jasně danou projektovanou tloušťku. Nadvýšení bývá obecně 10-20 %, zde bylo potřeba nadvýšení v důsledku tloušťky vrstvy 25 %.



Obrázek 12: Hutnění směsi SMA L 22 S



Obrázek 13: Kontrola míry zhutnění



Obrázek 14: Směs SMA L 22 S po zhutnění

5 Porovnání asfaltových směsí

5.1 Porovnání směsí typu ACL, VMT a SMA

Do ložných vrstev netuhých vozovek se nejčastěji používají asfaltové betony pro ložné vrstvy (ACL), dále se používají asfaltové směsi s vysokým modulem tuhosti (VMT) a v některých zemích také asfaltové koberce mastixové (SMA).

Asfaltový beton je asfaltová směs s plynulou čarou zrnitosti kameniva, které vytváří vzájemně zaklíněnou kostru. Na kostře se tedy podílí vzájemným dotykem jednotlivých zrn všechny frakce kameniva ve směsi obsažené. [14]

Směsi označované jako VMT jsou za horka zpracovávány asfaltové směsi s vysokým modulem tuhosti, s relativně vyšším obsahem asfaltů tvrdších druhů (popř. dalších ztužujících přísad), nízkou mezerovitostí pro podkladní vrstvy a upravenou mezerovitostí pro ložné vrstvy. Podle zrnitosti použité směsi kameniva se rozdělují směsi VMT na druhy 0/16 a 0/22. [15] Jak je z tabulky 5 patrné, směs VMT z ACL vychází, obory zrnitosti jsou jen nepatrně užší a oproti ACL se zde používají tvrdší asfaltová pojiva.

Asfaltový koberec mastixový je asfaltová směs přerušované zrnitosti. Nosná kostra je tvořena nejhrubšími frakcemi kameniva, zbývající kamenivo je výplňové. Kostra z hrubého drceného kameniva je spojená asfaltovým mastixem, tvořeným asfaltovým pojivem a kamennou moučkou. Je nutné použít vysoce kvalitní kamenivo, zejména je nutná nízká otlukovost kameniva kvůli skeletovému působení směsi.



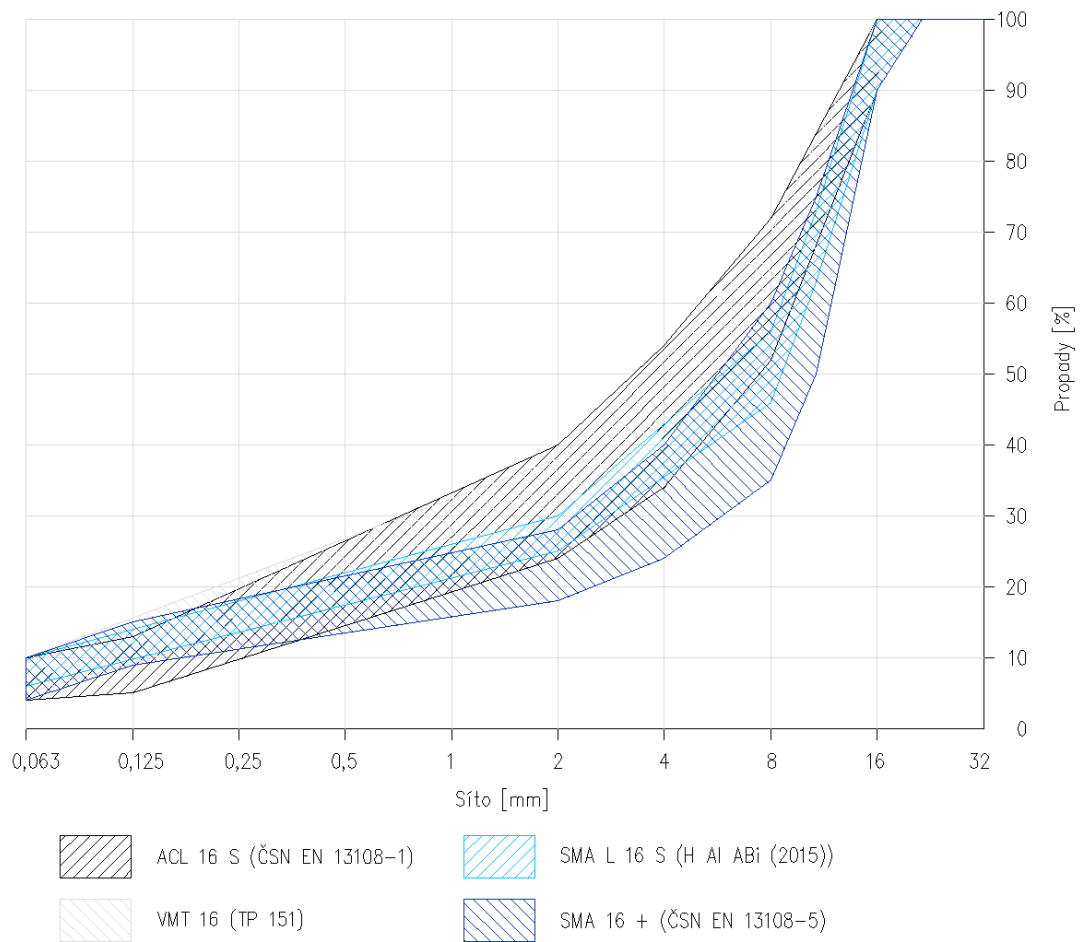
V porovnání s asfaltovým betonem je zde použit vyšší obsah asfaltového pojiva, používají se zejména modifikované. Pro zabránění stékání asfaltového pojiva se používají celulózová vlákna jako stabilizační přísada. [16] [17]

V tabulce 5 lze vidět lehce odlišné obory zrnitosti u českého a německého předpisu. Stále se jedná o směs s přerušenou zrnitostí, nicméně německé požadavky stanovují znatelně užší meze, byť na méně sítích. K uvedenému rozdílu je zde ovšem nutné podotknout, že ČSN EN 13108-5 nezná SMA 16 S, pouze SMA 16 +, proto jsou zde ony meze o tolik širší.

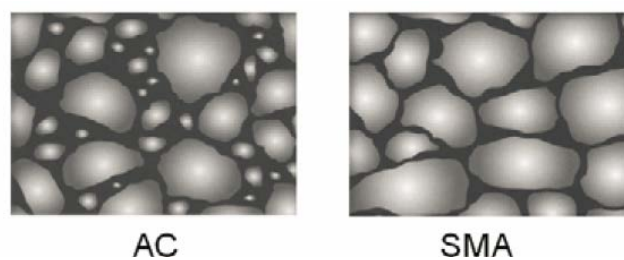
Tabulka 5: Obory zrnitosti jednotlivých směsí dle příslušných předpisů [16] [17] [20] [18]

Síto [mm]	ACL 16 S		VMT 16		SMA L 16 S		SMA 16 +	
	ČSN EN 13108-1		TP 151		H AI ABi (2015)		ČSN EN 13108-5	
	min [%]	max [%]	min [%]	max [%]	min [%]	max [%]	min [%]	max [%]
22	100	100	100	100	100	100	100	100
16	90	100	90	100	90	100	90	100
11,2					63	73	50	75
8	52	72	54	70	46	56	35	60
5,6								
4	34	54	36	52			24	40
2	24	40	26	38	25	30	18	28
1								
0,5								
0,25								
0,125	5	13					9	15
0,063	4	10	5	10	6	10	7	11
0								

Z grafu 4 je jednoznačně vidět, že směsi typu SMA mají nižší procentuální podíl zrn drobného drceného kameniva, což se projeví ve struktuře směsi, která je zobrazena na obrázku 15. Zatímco asfaltové betony mají čáru zrnitosti odstupňovanou plynule tak, aby se co nejvíce blížila Fullerově parabole, což zajišťuje rovnoměrné rozdělení zrn podle jejich velikosti, přerušená čára zrnitosti u asfaltových směsí typu SMA zajišťuje právě onu specifickou strukturu.



Graf 4: Obory zrnitosti jednotlivých směsí dle příslušných předpisů



Obrázek 15: Ilustrační porovnání struktury směsí AC a SMA [2]

Z porovnání dalších vybraných vlastností uvedených v tabulce 6 je vidět, že do směsí SMA se přidává větší množství asfaltového pojiva, což obecně ústí v nižší mezerovitost. Německý předpis H AI ABi (2015) požaduje pro směs vyšší odolnost proti drčení LA, ale například zase nedává žádné požadavky na hodnotu ITSR ani nespecifikuje povolené množství přidávaného R-materiálu. U hodnoty maximální poměrné hloubky koleje při zkoušce pojíždění kolem by se mohlo zdát, že pro směs SMA L 16 S jsou požadované hodnoty benevolentnější, nicméně je to dáno odlišnou normou pro zkoušení. Německá norma pro zkoušení



požaduje pro pojiždění ocelové kolo, které má na zkušební desku mnohem větší deformační účinky. Určitou minimální hodnotu modulu tuhosti požaduje pouze směs VMT a ACL 16 S. U směsi ACL 16 S je požadovaný modul tuhosti o poznání nižší.

Tabulka 6: Další vybrané požadavky na jednotlivé směsi [16] [17] [20] [18]

Sledovaná vlastnost	ACL 16 S	VMT 16	SMA L 16 S	SMA 16 +
	ČSN EN 13108-1	TP 151	H AI ABi (2015)	ČSN EN 13108-5
Množství pojiva [%]	min. 4,2	4,3 - 5,6	min. 5,2	min. 5,8
Mezerovitost [%]	4,0 - 6,0 (3,0 - 8,0) ¹	3,0 - 5,0 (2,5 - 6,0) ¹	1,5 - 5,5	2,5 - 4,5 (1,5 - 60) ¹
Odolnost proti drcení LA	LA ₂₅	LA ₂₅	LA ₂₀	LA ₂₅
Max. povolené množství R-mat [%]	30 (15) ²	25 (15) ²	-	20
ITSR [%]	80	80	-	-
Max. poměrná hloubka koleje PRD _{AIR} po 5000 cyklech [%] @50 °C	3,0	3,0	5,0 ³	-
Max. přírůstek hloubky koleje WTS _{AIR} [mm/10 ³ cyklů] @50 °C	0,05	0,05	-	-
Modul tuhosti při 15 °C [MPa]	min. 7000	min. 9000	-	-

¹ platí pro kontrolní zkoušky

² při použití modifikovaných asfaltů

³ odlišná norma

5.2 Porovnání směsí typu ACL, VMT a SMA v Laymedu

5.2.1 Návrhová metoda TP 170

Při návrhu vozovky je nutné zadat několik vstupních údajů, které jsou ve stručnosti popsány v následujících odstavcích.

V první řadě je třeba zvolit návrhovou úroveň porušení vozovky. Jednotlivé návrhové úrovně porušení odpovídají funkčnímu rozdělení pozemních komunikací a intenzitě silničního provozu. Klasifikují budoucí poskytovanou provozní způsobilost vozovky a přípustný rozsah konstrukčních poruch na konci návrhového období. Návrhová úroveň porušení se při navrhování zajišťuje konstrukčními úpravami podloží vozovky, výběrem druhu konstrukčních vrstev a stavebních materiálů, stanovením tloušťek vrstev vozovky odpovídajících dopravnímu zatížení a konstrukčními a technologickými požadavky. [13]



Tabulka 7: Návrhové úrovně porušení vozovky [13]

Návrhová úroveň porušení vozovky	Dopravní význam pozemní komunikace ČSN 73 6101, ČSN 73 6110	Očekávaná třída dopravního zatížení ČSN 73 6114 ¹⁾	Plocha s konstrukčními poruchami %
D0	Dálnice, rychlostní silnice, rychlostní místní komunikace, silnice I. třídy	S, I, II, III	< 1
D1	Silnice II. a III. třídy, sběrné místní komunikace, obslužné místní komunikace, odstavné a parkovací plochy	III, IV, V a VI	< 5
D2*	Obslužné místní komunikace, nemotoristické komunikace, odstavné a parkovací plochy	V, VI	< 25
	Dočasné komunikace, účelové komunikace	IV až VI	

Dopravní zatížení je zatížení způsobené přejezdy vozidel, vyjadřuje se celkovým počtem přejezdů návrhové nápravy v nejvíce zatíženém jízdním pruhu za návrhové období. Parametry návrhové nápravy se v různých zemích liší, souvisí s nejvyššími povolenými hmotnostmi náprav. V ČR se používá 100 kN, ve Francii 130 kN, v USA pouze 80 kN. Při dopravním průzkumu se zjišťují intenzity určitých typů vozidel a počet jejich přejezdů se přepočítá na počet přejezdů návrhové nápravy, přičemž se bere v úvahu podíl TNV pro nejvíce zatížený jízdní pruh (koeficient C_1), fluktuace (rozptyl) stop vozidel (C_2), součinitel vytíženosti vozidel (C_3) a vliv rychlosti pohybu vozidel (C_4). Dopravní zatížení se dělí na třídy dopravního zatížení dle TP 170. [19] [13]

Tabulka 8: Třídy dopravního zatížení [13]

Třída dopravního zatížení	TNV_k ¹⁾
S ²⁾	> 7 500
I	3 501 - 7 500
II	1 501 - 3 500
III	501 - 1 500
IV	101 - 500
V	15 - 100
VI	< 15

¹⁾ TNV_k je průměrná denní intenzita těžkých nákladních vozidel (TNV) pro všechny jízdní pruhy v návrhovém období.

Dalším vstupem jsou charakteristiky podloží. Jedná se o zařazení zeminy a její namrzavost, vodní režim podloží a poměr únosnosti CBR. [13]



Nedílnou součástí návrhu jsou i klimatické podmínky, které jsou zde zastoupeny hodnotou indexu mrazu. Na základě návrhové hodnoty indexu mrazu se v kombinaci s vodním režimem podloží s návrhovou úrovní porušení požaduje minimální přípustná tloušťka vrstev z nenamrzavých materiálů. [13]

Tabulka 9: Nejmenší přípustná tloušťka vrstev z nenamrzavých materiálů [13]

Návrhová hodnota indexu mrazu °C	Vodní režim podloží	Nejmenší přípustná tloušťka vrstev z nenamrzavých materiálů pro vozovky s návrhovou úrovní porušení, m			
		D0	D1	D0	D1
		je-li zemina podloží			
		namrzavá a mírně namrzavá		nebezpečně namrzavá	
300	difuzní	-	-	-	-
	pendulární	-	-	0,30	-
	kapilární	0,30	-	0,40	0,30
400	difuzní	-	-	0,30	-
	pendulární	0,30	-	0,40	0,30
	kapilární	0,40	0,30	0,50	0,40
500	difuzní	0,40	0,30	0,45	0,35
	pendulární	0,45	0,35	0,55	0,45
	kapilární	0,55	0,45	0,65	0,55
600	difuzní	0,50	0,40	0,55	0,45
	pendulární	0,55	0,45	0,65	0,55
	kapilární	0,65	0,55	0,75	0,65
700	difuzní	0,60	0,50	0,65	0,55
	pendulární	0,65	0,55	0,75	0,65
	kapilární	0,75	0,65	0,85	0,75
800	difuzní	0,70	0,60	0,75	0,65
	pendulární	0,75	0,65	0,85	0,75
	kapilární	0,85	0,75	0,95	0,85

5.2.2 Posouzení vozovky dle TP 170

Po zadání vstupů popsaných v předchozí kapitole přichází na řadu samotné posouzení vozovky. Posouzení včetně všech vztahů pro výpočet je detailně popsáno v TP 170, zde je popsáno pouze velmi stručně.

Každé zatížení vyvolá v konstrukci namáhání (relativní přetvoření nebo napětí). Velikost namáhání se stanovuje výpočtem. Ve stmelené vrstvě dochází úměrně velikosti namáhání k poškozování vrstvy. V nestmelých vrstvách a v podloží vozovky dochází úměrné velikosti namáhání k nevratnému přetvoření. Kumulace poškození a nevratných přetvoření vede k poruchám vozovky. [13]

Ve stmelěných vrstvách dojde zatěžováním v oblasti s nejvyšším opakovaným namáháním ke vzniku mikrotrhliny ve struktuře vrstvy. Dalším opakováním zatížení se mikrotrhlina začne vrstvou šířit ve vodorovném i svislém směru. Posouzením vozovky se stanovuje, zda je vrstva namáhána úměrně požadovanému počtu opakování zatížení tak, aby se trhlina v návrhovém období projevila pouze s požadovanou pravděpodobností výskytu podle návrhové úrovně porušení. [13]



V nestmelených vrstvách a zejména v podloží vozovky se kumulují nevratná přetvoření. Pokud by docházelo vyšším namáháním k rychlé kumulaci přetvoření, ve vozovce by se projevila porucha s plochými vyjetými koleje označovaná v katalogu poruch jako podélný hrbol. Již od vývoje první mikrotrhliny je stmelená vrstva méně únosnou (má nižší modul pružnosti) a pod ní ležící vrstvy a podloží vozovky jsou více namáhány. Posouzením vozovky se stanovuje, zda je podloží vozovky namáháno úměrně požadovanému počtu opakování zatížení tak, aby se v návrhovém období porucha s požadovanou pravděpodobností neprojevila. [13]

Celkové poměrné porušení D_{cd} počítané dle vztahu (1) musí být menší než 1:

$$D_{cd} = \frac{TNV_{cd}}{TNV_{cd,lim}} \quad (1)$$

kde D_{cd} je návrhová hodnota celkového poměrného porušení za návrhové období,
 TNV_{cd} návrhová hodnota celkového počtu přejezdů TNV za návrhové období,
 $TNV_{cd,lim}$ mezní hodnota počtu přejezdů TNV za návrhové období. [13]

Při posuzování podle návrhové metody dle TP 170 se doporučuje, aby se hodnota D_{cd} pohybovala v intervalu od 0,6 do 0,85. Horní mez je doporučena kvůli rezervě v únosnosti, jelikož do výpočtu jsou brány v úvahu určité modelové situace beroucí v potaz množství dopravního zatížení v průběhu životnosti dané vozovky, které se v některých případech mohou ukázat jako podceněné. Dolní mez je stanovena s ohledem na hospodárný návrh. [13]

5.2.3 Varianty posuzované vozovky

Pro vlastní posouzení byly z katalogu vozovek vybrány dvě skladby pro třídu dopravního zatížení S, jedna s dolní podkladní vrstvou nestmelenou (MZK), druhá skladba byla vybrána s dolní podkladní vrstvou stmelenou hydraulickým pojivem (SC C_{8/10}).

Jako skladba s nestmelenou dolní podkladní vrstvou byla z katalogu vozovek TP 170 vybrána D0-N-1-S-PI s následující skladbou:

- SMA 11 S – 40 mm
- ACL 22 S – 80 mm
- ACP 22 S – 150 mm
- MZK – 250 mm
- podloží PI

Tato skladba s podkladní vrstvou z MZK vytvořila základ, ze kterého vycházely varianty označené jako 1A a 1B, jejichž výsledná skladba je uvedena v tabulce 11. Varianta 1A byla upravena tak, aby její asfaltem stmelené konstrukční vrstvy byly pouze z asfaltového betonu, respektive z VMT, což je směs z asfaltového betonu vycházející. Varianta 1B byla upravena tak, aby všechny asfaltem stmelené vrstvy byly z asfaltového koberce mastixového, přičemž pro ložnou i podkladní vrstvu byla využita směs SMA 16 L S, jejíž návrh a zkoušení bylo předmětem této diplomové práce. Varianta 1C byla vytvořena dle konceptu



„věčných“ vozovek s tenkou obrusnou vrstvou v tloušťce 30 mm, tlustou podkladní vrstvou odolnou proti tvorbě trvalých deformací ze směsi SMA L 16 S, která je předmětem laboratorní části této diplomové práce a relativně tenkou podkladní vrstvou ze směsi RBL 16 s vysokou odolností proti únavě.

Jako výchozí zástupce skladby s hydraulicky stmelenu dolní podkladní vrstvou byla z katalogu vozovek TP 170 vybrána skladba D0-N-3-S-PI:

- SMA 11 S – 40 mm
- ACL 22 S – 80 mm
- ACP 22 S – 120 mm
- SC C8/10 – 180 mm
- podloží PI

Na základě této katalogové skladby byly vytvořeny varianty 2A, 2B a 2C stejně jako v předchozím případě. Tyto skladby lze najít v tabulce 12.

5.2.4 Vstupní parametry pro posouzení

Posuzovány byly výše uvedené skladby vozovky. Vstupní parametry pro výpočet vozovky byly použity následující:

- podloží: PI
- vodní režim podloží: pendulární
- namrzavost zeminy podloží: nenamrzavá
- charakteristická hodnota indexu mrazu: 400 °C
- $C_1 = 0,45$ (obousměrné komunikace, dva pruhy v jednom směru)
- $C_2 = 1,00$ (návrhová úroveň porušení D0, třída dopravního zatížení S)
- $C_3 = 0,50$ (běžné dopravní zatížení u netuhých vozovek)
- $C_4 = 1,00$ (rychlost 50 km/h a vyšší)
- $\delta_z = 1,08$
- $\delta_k = 1,50$
- počet TNV/24hod.: 20 000
- návrhová náprava: 100 kN
- délka návrhového období: 50 let

Součinitele nárůstu intenzity provozu TNV δ_z a δ_k byly zvoleny dle TP 225 [22] pro rok 2017 a 2050 protože prognóza intenzit automobilové dopravy je aktuálním vydání zpracována pouze právě do roku 2050. Dále charakteristiky podloží včetně indexu mrazu byly zvoleny náhodně, ale reálně pro podmínky panující v České republice. Koeficienty upravující dopravní zatížení C_1 až C_4 byly zvoleny tak, aby vyjádřily skutečnost, že posuzovaná skladba je uvažována pro dálniční vozovku, čemuž odpovídají intenzity TNV/24 hod. Hodnoty kolem 20 000 přejezdů TNV/24 hod. lze v současné době najít například v blízkosti Prahy na



dálnicích D0, D1, D5 nebo D8. Tyto hodnoty vychází ze sčítání dopravy v roce 2016 [20], které provedlo Ředitelství silnic a dálnic ČR. Délka návrhového období je v programu Laymed sice omezena na 30 let, nicméně návrhová metoda počítá s lineárním nárůstem celkového poměrného porušení, tudíž při vlastním výpočtu byla zadána délka návrhového období 25 let a výsledná hodnota D_{cd} byla vynásobena dvakrát, což dá ve výsledku právě padesátileté návrhové období, které dává pro výpočet „věčné“ vozovky větší smysl než standardní 25leté návrhové období.

U jednotlivých asfaltem stmelovaných vrstev byly ve výpočtovém programu Laymed zvoleny vstupní parametry uvedené v tabulce 10. V tomto programu nejsou nadefinovány směsi SMA L 16 S a RBL 16, proto bylo nutné jejich parametry zvolit. Hodnota modulu tuhosti při 15 °C byla zvolena na základě výsledků této diplomové práce, únavový parametr ϵ_6 ale testován nebyl, proto byl ponechán stejný jako u všech směsí typu SMA, které jsou v programu Laymed nadefinovány. Směs RBL 16 vychází ze směsi VMT 16, proto byl pro výpočet stanoven modul tuhosti 9000 MPa. Únavový parametr ϵ_6 se dle různých zkušeností velmi liší v závislosti na pojivu obsaženém v této směsi. V závislosti na pojivu byly při různých pokusech naměřeny hodnoty od 120 $\mu\epsilon$ do 220 $\mu\epsilon$, pro samotný výpočet byla nakonec zvolena hodnota $\epsilon_6 = 165 \mu\epsilon$.

Tabulka 10: Parametry směsí použitých pro posouzení

	Modul tuhosti [MPa]	Koeficient únavy ϵ_6 [$\mu\epsilon$]
ACO 11 S	9000	135
ACL 22 S	9000	135
ACP 22 S	7500	100
VMT 22 PMB	9000	135
SMA 11 S	5500	115
SMA L 16 S	8500	115
RBL 16	9000	165

V TP 170 je uvedena tabulka uvádějící možné záměny směsí pro jednotlivé vrstvy s kvalitativním srovnáním. Je zde uvedeno, že vrstvu SMA S lze nahradit vrstvou ACO S, nicméně vrstvě asfaltového betonu je přisuzována nižší kvalita, ale v případě parametrů, se kterými počítá program Laymed tomu tak není, což je důvod domnívat se, že skladby vozovek, kde bude použitý asfaltový beton budou při výpočtu vycházet lépe než skladby s vrstvami ze směsi SMA.

5.2.5 Posouzení variant dle TP 170

V tabulce 11 jsou uvedeny výsledky posouzení skladby vozovky D0-N-1-S-PI a variant z ní vycházejících. Je vidět, že samotná katalogová vozovka vykazuje dle výpočtu návrhovou životnost dosahující 50 let, když splnila podmínku celkového poměrného přetvoření po 50 letech $D_{cd, 50 \text{ let}}$ menší než



0,85. Při nahrazení vrstvy ACP 22 S za vrstvu z VMT 22 PMB ve variantě 1A mohlo díky lepším parametrům směsi VMT 22 PMB dosaženo snížení tloušťky této vrstvy a tedy celé vozovky o 10 mm. U varianty 1B došlo k potvrzení domněnky z minulé kapitoly, že výše nadefinované únavové parametry a moduly tuhosti budou výsledky této skladby znevýhodňovat právě ve prospěch varianty 1A. Oproti katalogové skladbě došlo o navýšení tloušťky vozovky o 5 mm kvůli použití mírně tlustší ložné vrstvy. Varianta 1C byla vytvořena dle konceptu „věčných“ vozovek s tenkou obrusnou vrstvou v tloušťce 30 mm, tlustou podkladní vrstvou odolnou proti tvorbě trvalých deformací ze směsi SMA L 16 S, která je předmětem laboratorní části této diplomové práce a relativně tenkou podkladní vrstvou ze směsi RBL 16 s vysokou odolností proti únavě. Aby tato vozovka vyhověla při posuzování návrhovou metodou dle TP 170, bylo nutné znatelně zvýšit tloušťku nestmelené podkladní vrstvy z MZK o 100 mm, což zmařilo snahy o tenčí vrstvu vozovky. Oproti katalogové skladbě se podařilo snížit tloušťku asfaltem stmelených vrstev o 40 mm z 270 mm na 230 mm.

Tabulka 11: Posouzení skladby vozovky D0-N-1-S-PI a variant z ní vycházejících

D0-N-1-S-PI		1A		1B		1C	
vrstva	tl. [mm]	vrstva	tl. [mm]	vrstva	tl. [mm]	vrstva	tl. [mm]
SMA 11 S	40	ACO 11 S	40	SMA 11 S	40	SMA 11 S	30
ACL 22 S	80	ACL 22 S	80	SMA L 16 S	85	SMA L 16 S	120
ACP 22 S	150	VMT 22	140	SMA L 16 S	150	RBL 16	80
MZK	250	MZK	250	MZK	250	MZK	350
asf. stm. vrstvy	270	asf. stm. vrstvy	260	asf. stm. vrstvy	275	asf. stm. vrstvy	230
celkem	520	celkem	510	celkem	525	celkem	580
$D_{cd,25 \text{ let}}$	0,396	$D_{cd,25 \text{ let}}$	0,423	$D_{cd,25 \text{ let}}$	0,391	$D_{cd,25 \text{ let}}$	0,420
$D_{cd,50 \text{ let}}$	0,792	$D_{cd,50 \text{ let}}$	0,845	$D_{cd,50 \text{ let}}$	0,781	$D_{cd,50 \text{ let}}$	0,840

Dále vybrána katalogová skladba D0-N-3-S-PI, která se od předchozí skladby lišila zejména tím, že spodní podkladní vrstvy byla tvořena hydraulicky stmelenou vrstvou SC C_{8/10}. Samotná katalogová skladba těsně nevyhověla při posouzení na padesátileté návrhové období, varianta 2A, kde byla stejně jako u varianty 1A nahrazena vrstva podkladní vrstvy z ACP 22 S za VMT 22 PMB, vyhověla při zachování tloušťek z katalogové skladby. U varianty 2B, kde byly použity ve všech asfaltem stmelených vrstvách použity směsi SMA, bylo nutné zvětšit tloušťku dolní podkladní vrstvy z SC C_{8/10} o 20 mm na 200 mm, aby tato varianta vyhověla. U varianty 2C inspirované konceptem „věčných“ vozovek zde díky pevnější dolní podkladní vrstvě oproti variantě 1C nedošlo k takovému nárůstu tloušťky vozovky oproti katalogové skladbě. Zde se povedlo snížit tloušťku asfaltem stmelených vrstev o 10 mm, nicméně kvůli navýšení vrstvy SC C_{8/10} došlo nakonec k navýšení tloušťky vozovky o 20 mm. Tyto výsledky jsou k vidění v tabulce 12.



Tabulka 12: Posouzení skladby vozovky D0-N-3-S-PI a variant z ní vycházejících

D0-N-3-S-PI		2A		2B		2C	
vrstva	tl. [mm]	vrstva	tl. [mm]	vrstva	tl. [mm]	vrstva	tl. [mm]
SMA 11 S	40	ACO 11 S	40	SMA 11 S	40	SMA 11 S	30
ACL 22 S	80	ACL 22 S	80	SMA L 16 S	80	SMA L 16 S	110
ACP 22 S	120	VMT 22	120	SMA L 16 S	120	RBL 16	90
SC C _{8/10}	180	SC C _{8/10}	180	SC C _{8/10}	200	SC C _{8/10}	210
asf. stm. vrstvy	240	asf. stm. vrstvy	240	asf. stm. vrstvy	240	asf. stm. vrstvy	230
celkem	420	celkem	420	celkem	440	celkem	440
D _{cd,25 let}	0,447	D _{cd,25 let}	0,397	D _{cd,25 let}	0,377	D _{cd,25 let}	0,374
D _{cd,50 let}	0,893	D _{cd,50 let}	0,794	D _{cd,50 let}	0,754	D _{cd,50 let}	0,749

5.2.6 Shrnutí

Z posouzení je vidět, že použití návrhové metody s výše uvedenými vstupními parametry nedává u „věčných“ vozovek tak dobré výsledky, jakých dosáhli polští autoři návrhu skladby vozovky rychlostní komunikace S8 mezi obcemi Opacz a Pasków, kteří používali francouzskou návrhovou metodu, která zohledňuje nejen tuhost a odolnost proti únavě při určitém přetvoření, ale zohledňuje i sklon únavové přímky. Česká návrhová metoda sice toto také zohledňuje, nicméně v programu Laymed je ve vstupních datech zadán pro všechny směsi stejně a výpočet tedy neovlivní.

Aby bylo možné „věčnou“ vozovku efektivně posoudit, bylo by nutné znát přesně všechny parametry vstupující do výpočtu.

6 Laboratorní část

6.1 Návrh směsi

Pro účely této diplomové práce byla navržena asfaltová směs typu SMA L 16 S a jako referenční byla použita směs ACL 16 S PmB 25/55-55 z kladenské obalovny společnosti POZEMNÍ KOMUNIKACE BOHEMIA, a.s.

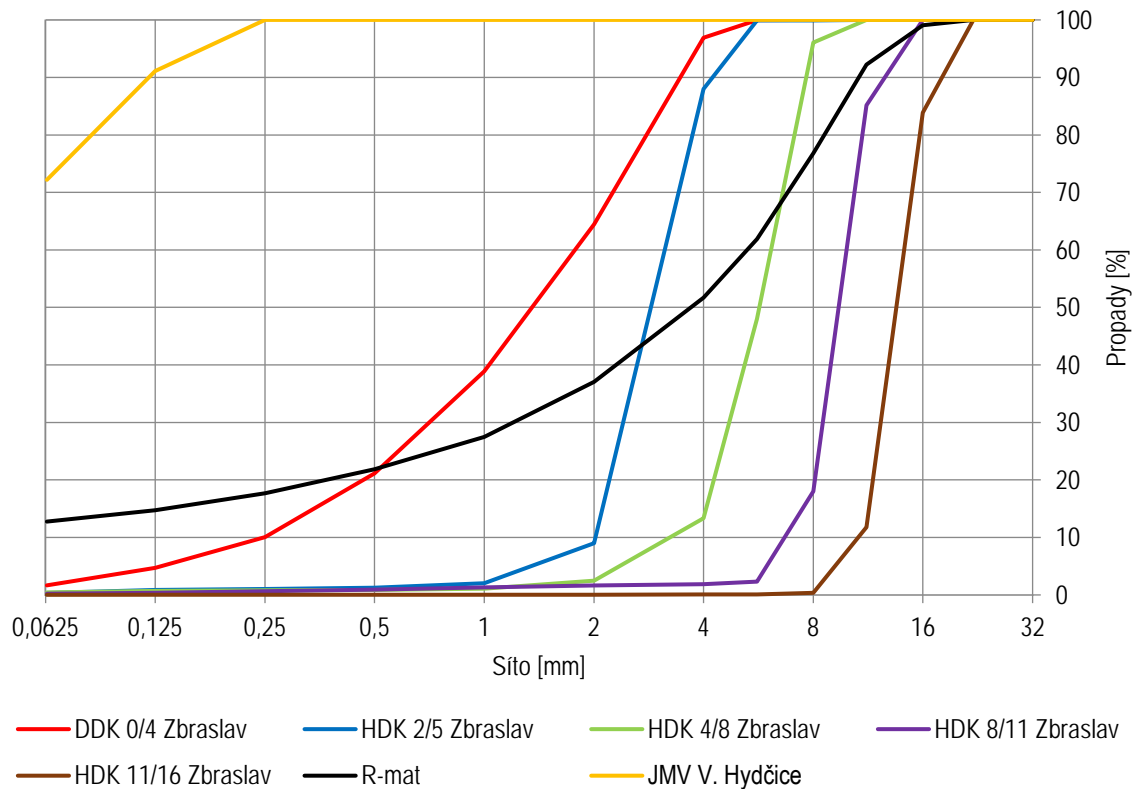
6.1.1 SMA L 16 S

6.1.1.1 Čára zrnitosti

V první řadě bylo třeba všechny dostupné frakce kameniva vysušit při teplotě 110 ± 5 °C do ustálené hmotnosti a připravit tak k provedení síťového rozboru dle ČSN EN 933-1. [20] Čáry zrnitostí těchto frakcí



jsou zobrazeny v grafu 5. a výsledné hodnoty propadů a zůstatků na jednotlivých sítích, ze kterých tento graf vychází, jsou uvedené v příloze v tabulce 33.



Graf 5: Čáry zrnitosti dostupných frakcí kameniva

Dostupný R-materiál byl frakce 0/11 a byl získán z obrusné vrstvy rychlostní silnice R7 (dnes dálnice D7).

Z dostupných frakcí kameniva mimo R-materiálu byla navržena směs SMA L 16 S, která splňovala obor zrnitosti německých Pokynů pro plánování a provádění alternativních asfaltových ložných vrstev H Al ABi (2015) [18]. Obory zrnitosti pro směsi typu SMA s maximálním zrnem kameniva velikosti 16 mm jsou v ČSN EN 13108-5 uvedeny pouze pro směsi typu SMA 16 a SMA 16+. Tyto obory jsou si v zásadě velmi podobné, jelikož se jedná o stejný typ asfaltové směsi, ale na první pohled je z tabulky 14 zřejmé, že H Al ABi (2015) [18] požaduje stanovené propady na méně sítích, za to však v mnohem užším rozsahu.



Tabulka 13: Složení navržené směsi

Frakce	Zastoupení
JMV V. Hydčice	9,70 %
DDK 0/4 Zbraslav	22,40 %
HDK 2/5 Zbraslav	8,80 %
HDK 4/8 Zbraslav	11,80 %
HDK 8/11 Zbraslav	17,20 %
HDK 11/16 Zbraslav	30,10 %
	100,00 %

Tabulka 14: Obory zrnitosti SMA 16 a součtová čára propadů [20] [18]

Síto [mm]	SMA L 16 S		SMA 16		SMA 16 +		Navržená směs [%]
	H AI ABi (2015)		ČSN EN 13108-5		ČSN EN 13108-5		
	min [%]	max [%]	min [%]	max [%]	min [%]	max [%]	
22	100	100	100	100	100	100	100,00
16	90	100	90	100	90	100	95,13
11,2	63	73	48	77	50	75	70,79
8	46	56	35	58	35	60	55,24
5,6							46,72
4			24	40	24	40	40,79
2	25	30	18	28	18	28	25,33
1							18,85
0,5							14,77
0,25							12,23
0,125			9	15	9	15	10,11
0,063	6	10	7	11	7	11	7,50
0							0,00

6.1.1.2 Optimalizace složení směsi kameniva SMA

Poté co byla směs navržena, bylo nutné ji optimalizovat. Optimalizace proběhla dle TP 109, přílohy C.

Cílem optimalizace složení směsi kameniva SMA je dosažení skeletového principu směsi, tzn. vzájemného dosednutí zrn hrubého drceného kameniva (HDK), omezení bočního vytlačování směsi při zatížení a dosažení vysoké odolnosti ztuhlé směsi proti vyjíždění kolejí. [21]

Optimalizace se provádí na cca 5 zkušebních záměsích s odstupňovaným množstvím HDK. Graficky se stanoví závislost zkušebních veličin, kterými jsou mezerovitost ztuhlé směsi V_m a mezerovitost směsi kameniva VMA, na obsahu HDK. Přejít na skeletový princip směsi se projeví více či méně výrazným zlomem průběhu velikosti výše uvedených charakteristik v závislosti na obsahu HDK. [21]



Návrh 5 zkušebních záměsí se provádí s použitím mezních čar oboru zrnitosti, které jsou v tomto případě dané pokyny H AI ABI (2015) [18]. Nejdříve bylo navrženo složení směsi kameniva pro tzv. střední záměs, tzn. složení s předpokládanou výslednou čarou zrnitosti. Tato záměs byla označena číslem 1. Následuje návrh dvou záměsí s vyšším obsahem HDK a dalších dvou záměsí s nižším obsahem HDK. Jednotlivé frakce HDK byly nechány přibližně ve stejném poměru a o tolik, o kolik se upravil obsah HDK, se upravil i obsah DDK tak, aby množství JMV zůstalo konstantní. [21]

Tabulka 15: Složení směsi kameniva zkušebních záměsí

Frakce	Zastoupení [%]				
	Záměs 1	Záměs 2	Záměs 3	Záměs 4	Záměs 5
JMV V. Hydčice	9,70	9,70	9,70	9,70	9,70
DDK 0/4 Zbraslav	22,40	20,90	25,20	23,80	21,60
HDK 2/5 Zbraslav	8,80	10,10	6,00	8,60	9,10
HDK 4/8 Zbraslav	11,80	11,90	11,00	11,20	12,00
HDK 8/11 Zbraslav	17,20	17,00	17,20	16,80	17,40
HDK 11/16 Zbraslav	30,10	30,40	30,90	29,90	30,20

Tabulka 16: Součtové čary propadů zkušebních záměsí a obor zrnitosti

Síť [mm]	SMA L 16 S		Záměs 1	Záměs 2	Záměs 3	Záměs 4	Záměs 5
	min [%]	max [%]	67,9 % HDK	69,4 % HDK	65,1 % HDK	66,5 % HDK	68,7 % HDK
22	100	100	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
16	90	100	95,14	95,10	95,01	95,18	95,13
11,2	63	73	70,89	70,66	70,19	71,13	70,77
8	46	56	55,42	55,28	54,66	55,98	55,15
5,6			46,97	46,81	46,59	47,87	46,57
4			41,07	40,77	41,21	42,16	40,59
2	25	30	25,52	24,67	27,05	26,38	25,04
1			18,97	18,41	19,99	19,49	18,67
0,5			14,83	14,52	15,38	15,11	14,67
0,25			12,26	12,12	12,50	12,39	12,18
0,125			10,12	10,06	10,23	10,18	10,09
0,063	6	10	7,50	7,48	7,54	7,52	7,49
0			0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Při pohledu na nedodržení dolního oboru zrnitosti u záměsí 2 na síť 2 mm je zřejmé, že již nebylo možné zvyšovat obsah HDK o více než 1,5 % jako u této záměsí a tudíž obsah druhé záměsí se zvýšeným podílem HDK se musel pohybovat mezi záměsí 2 a střední záměsí 1. U záměsí se sníženým obsahem HDK tento problém nenastal, a tak mohl být obsah HDK snížen téměř o 3 procenta.



Na těchto pěti záměsích byly dle ČSN EN 12697-8 určeny mezerovitost V_m a mezerovitost směsi kameniva VMA a výsledky jsou uvedené v tabulce 17.

Mezerovitost V_m se určí s přesností 0,1 % dle rovnice (2):

$$V_m = \frac{\rho_m - \rho_b}{\rho_m} \times 100 \% \quad (2)$$

- kde V_m je mezerovitost směsi s přesností 0,1 %;
 ρ_m maximální objemová hmotnost směsi v kg/m^3 ;
 ρ_b objemová hmotnost zkušebního tělesa v kg/m^3 .

Mezerovitost směsi kameniva VMA se určí s přesností 0,1 % dle rovnice (3):

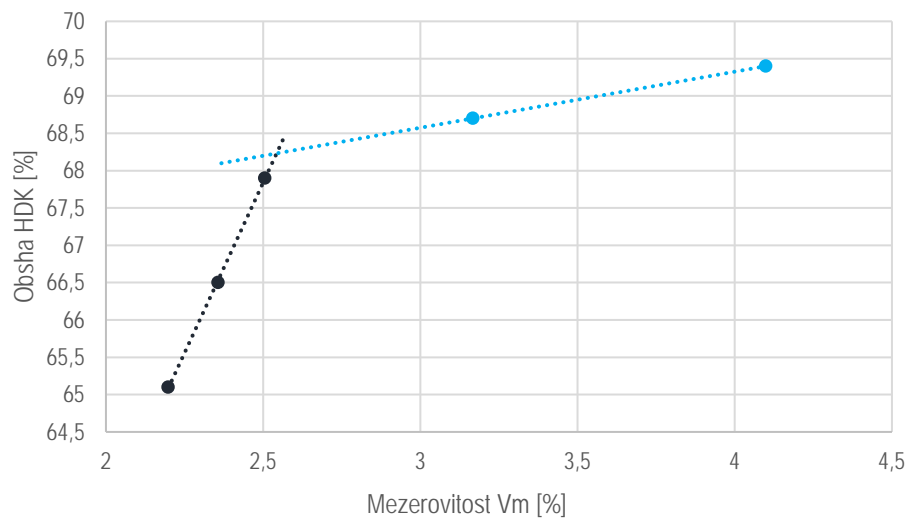
$$VMA = V_m + B \times \frac{\rho_b}{\rho_B} \quad (3)$$

- kde VMA je mezerovitost směsi kameniva v % s přesností 0,1 %;
 V_m mezerovitost zkušebního tělesa s přesností 0,1 %;
B obsah pojiva ve zkušebním tělese (ve 100 % směsi) v % s přesností 0,1 %;
 ρ_b objemová hmotnost zkušebního tělesa v kg/m^3 ;
 ρ_B objemová hmotnost pojiva v kg/m^3 .

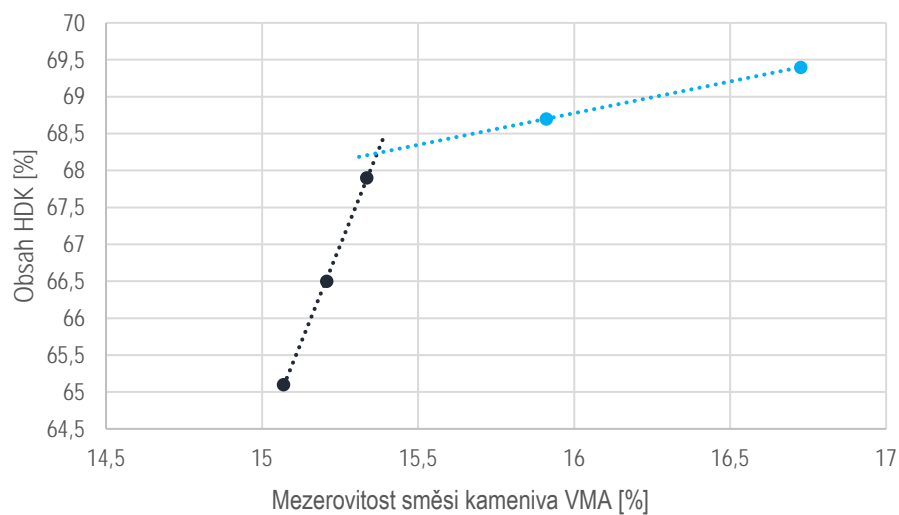
Výše popisovaná závislost je dobře patrná v tabulce 17 a ještě lépe na grafech 6 a 7.

Tabulka 17: Závislost VMA a V_m na HDK u jednotlivých záměsích

Záměs	Obsah HDK	Mezerovitost směsi kameniva	Mezerovitost
		VMA	V_m
	%	%	%
1	67,9	15,3	2,5
2	69,4	16,7	4,1
3	65,1	15,1	2,2
4	66,5	15,2	2,4
5	68,7	15,9	3,2



Graf 6: Mezerovitost V_m v závislosti na obsahu HDK



Graf 7: Mezerovitost směsi kameniva v závislosti na obsahu HDK

Jako optimální obsah HDK pro dosažení skeletového principu směsi lze z grafu odečíst 68,2 %. Byla tak vytvořena směs kameniva, která byla použita v této diplomové práci pro varianty V1 až V5 (o těchto variantách více v kapitole 6.1.1.5).

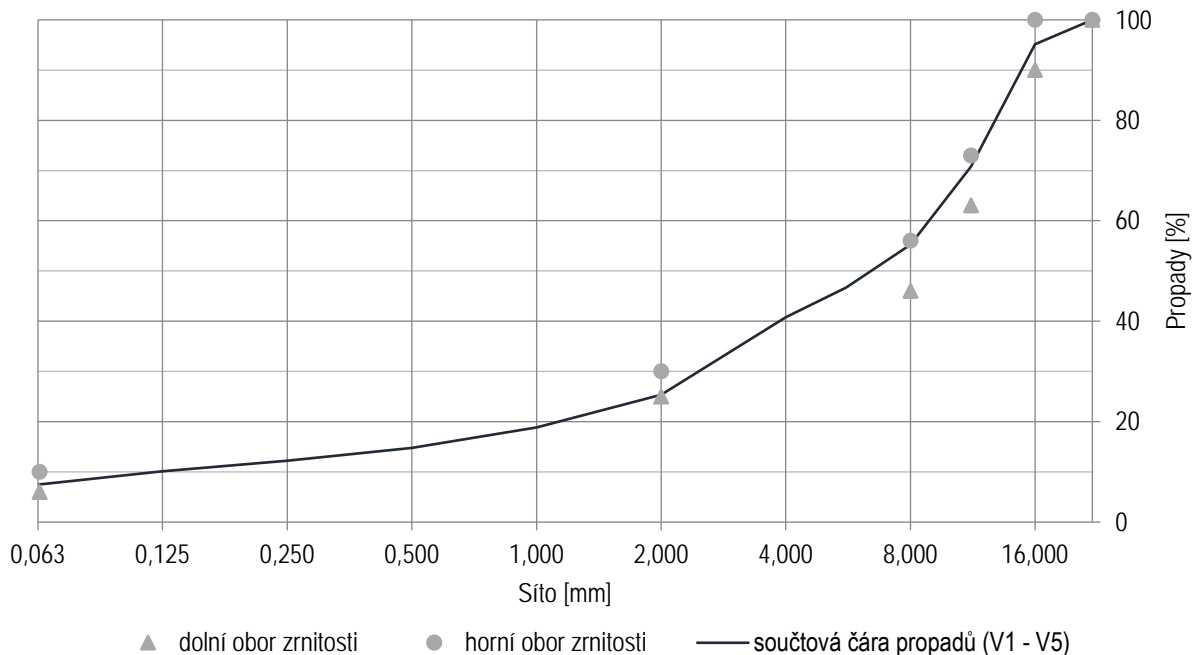


Tabulka 18: Složení směsi kameniva pro varianty V1 až V5

Frakce	Zastoupení [%]
JMV V. Hydčice	9,70
DDK 0/4 Zbraslav	22,40
HDK 2/5 Zbraslav	8,80
HDK 4/8 Zbraslav	11,80
HDK 8/11 Zbraslav	17,20
HDK 11/16 Zbraslav	30,10

Tabulka 19: Obory zrnitosti SMA L 16 S a součtová čára propadů směsi kameniva pro varianty V1 až V5

Síťo [mm]	SMA L 16 S		Propady [%]
	min [%]	max [%]	68,2 % HDK
22	100	100	100,00
16	90	100	95,13
11,2	63	73	70,79
8	46	56	55,24
5,6			46,72
4			40,79
2	25	30	25,33
1			18,85
0,5			14,77
0,25			12,23
0,125			10,11
0,063	6	10	7,50
0			0,00



Graf 8: Čára zrnitosti směsi kameniva pro varianty V1-V5

6.1.1.3 Množství pojiva

Po návrhu směsi kameniva bylo nutné určit množství pojiva. H AI ABI (2015) [18] požaduje pro směsi typu SMA L 16 S minimálně 5,2 %-hm. pojiva, ČSN EN 13108-5 se směsí typu SMA 16 S nepočítá, ale pro směsi SMA 16 a SMA 16 + požaduje minimálně 5,8 %-hm. pojiva. [16]

Vycházelo se z předpokladu, že vyšší množství pojiva požadované českou normou by mohlo mít negativní vliv u zkoušky vyjíždění kolem zejména u variant s měkčím asfaltovým pojivem, což u asfaltové směsi, která je navržena tak, aby odolávala trvalým deformacím, není žádoucí jev. Naopak nízký obsah asfaltového pojiva by dle předpokladů snížil lomovou houževnatost a únavové charakteristiky. Tento fakt by znamenal, že by tato směs byla náchylnější k tvorbě trhlin a ani toto není pro asfaltovou směs s dlouhou životností žádoucí. Kompromisem mezi minimálními hodnotami stanovenými H AI ABI (2015) [18] a ČSN EN 13108-5 [16] bylo pro směs SMA L 16 S navrženo 5,5 %-hm. pojiva.

Konkrétní druhy pojiva, které byly v rámci této práce pro navrženou směs typu SMA L 16 S navrženy, jsou uvedeny v kapitole 6.1.1.5.

Vzhledem vyššímu obsahu pojiva, než obsahují třeba asfaltové betony, je do asfaltových směsí typu SMA nutné přidat stabilizační přísadu, která působí jako tzv. „nosič pojiva“. K tomuto účelu byla použita přísada S-CEL 7G®. Jedná se o vláknitý granulát s přísadou speciálního vosku, který kromě umožnění zvýšení obsahu pojiva v obalovaných směsích dokáže snížit stékevost asfaltového pojiva z kameniva, zlepšit



tepelnou odolnost směsi a její fyzikálně – mechanické vlastnosti, zvyšuje odolnost proti trvalým deformacím a zvyšuje tak životnost asfaltové vrstvy, ve které byl použit. [22]



Obrázek 16: S-CEL 7G®

6.1.1.4 Návrh varianty s R-materiálem

Varianta V6 byla navržena s 30% obsahem R-materiálu, který by dokázal snížit počáteční investiční náklady.

Po extrakci a síťovém rozboru byla určena čára zrnitosti a poté bylo navrženo složení směsi kameniva pro tuto variantu. Snaha byla držet se co nejbližší čáře zrnitosti směsi kameniva pro varianty optimalizované V1 – V6.

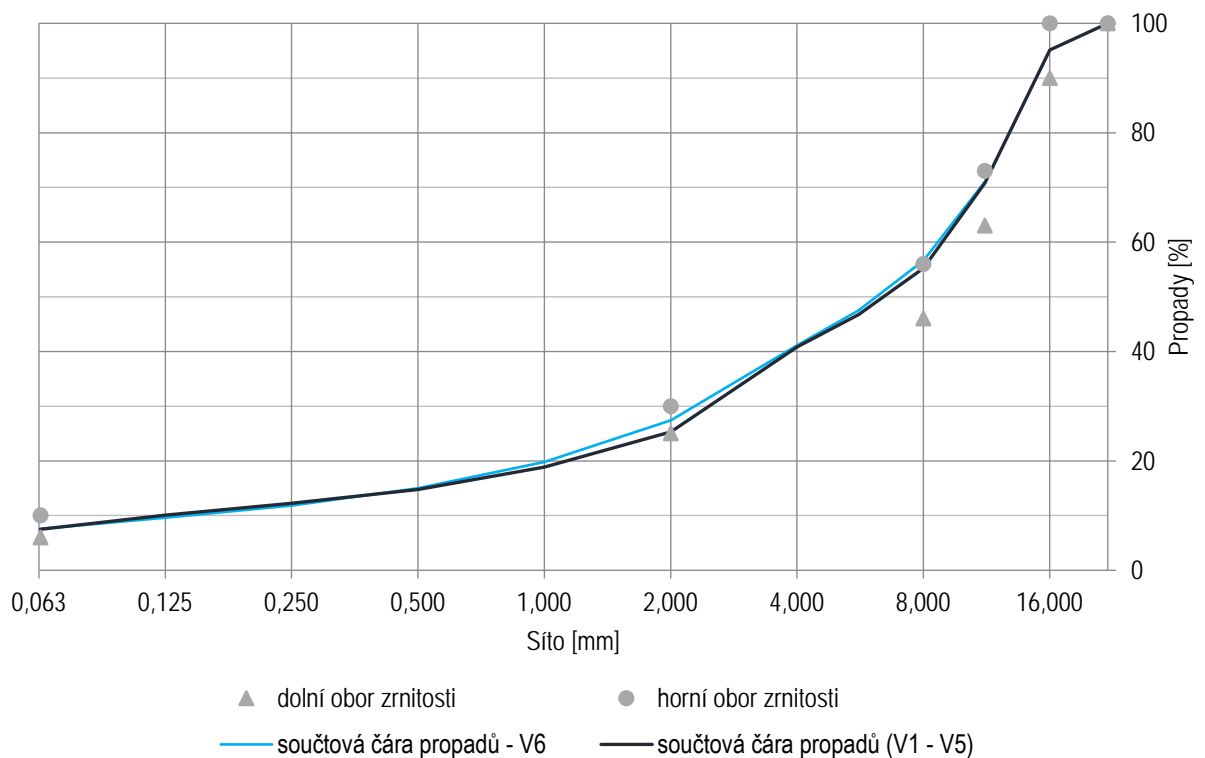
Tabulka 20: Složení směsi kameniva pro variantu V6

Frakce	Zastoupení [%]
JMV V. Hydčice	4,70
DDK 0/4 Zbraslav	16,90
HDK 2/5 Zbraslav	3,90
HDK 4/8 Zbraslav	6,60
HDK 8/11 Zbraslav	9,20
HDK 11/16 Zbraslav	28,70
R-mat	30,00



Tabulka 21: Obory zrnitosti SMA L 16 S a porovnání součtových čar propadů směsí kameniva pro varianty V1 až V5 a V6

Síto [mm]	SMA L 16 S		V1 - V5	V6
	min [%]	max [%]		
22	100	100	100,00	100,00
16	90	100	95,13	95,09
11,2	63	73	70,79	70,98
8	46	56	55,24	56,62
5,6			46,72	47,46
4			40,79	41,10
2	25	30	25,33	27,39
1			18,85	19,81
0,5			14,77	15,03
0,25			12,23	11,87
0,125			10,11	9,62
0,063	6	10	7,50	7,57
0			0,00	0,00



Graf 9: Porovnání čar zrnitosti s R-mat (V6) a bez něj (V1-V5)



Na grafu 9 je vidět, že směsi kameniva mají velmi podobnou zrnitost, jedinou lehce výraznější výjimku tvoří mírně odlišný propad na síť 2 mm. Je nutné také poznamenat, že u směsi kameniva pro variantu V6 se nepodařilo těsně dodržet obor zrnitosti na síť 8 mm vzhledem k zrnitostem jednotlivých frakcí.

Dle extrakce R-materiálu frakce 0/11 byl zjištěn rozpustný obsah asfaltu 4,7 %. Při dávkování R-materiálu do směsi v množství 30 % lze vypočítat, že do směsi se tímto způsobem dostane již 1,4 % asfaltového pojiva, což by znamenalo snížit původní obsah asfaltového pojiva z 5,5 % na 4,1 %. Vzhledem k nepoužití rejuvenátorů nebo jiných přísad omlazujících zestárlé asfaltové pojivo obsažené v použitém R-materiálu bylo konzervativně rozhodnuto o zvýšení množství nově přidávaného asfaltového pojiva na 4,3 %. Jako nově použité pojivo byl zvolen PmB 40/60-75 díky vysokému obsahu polymerové fáze. Toto asfaltové pojivo je vysoce modifikované (HiMA, Highly Modified Asphalt) a je tedy charakterizováno převrácením poměru asfaltové a polymerové fáze ve prospěch právě fáze polymerové.

6.1.1.5 Přehled variant směsi SMA L 16 S

V předchozích kapitolách byl detailně popsán postup návrhu asfaltové směsi SMA L 16 S. Tato směs byla nakonec vyrobena v šesti variantách, které se od sebe vzájemně lišily buď druhem použitého pojiva, případně jinou modifikací, v jedné variantě této směsi byl použit R-materiál.

6.1.1.5.1 V1 (PmB 25/55-60) a V2 (PmB 40/60-75)

První, označená jako V1, byla základní variantou a obsahovala 5,5 % polymerem modifikovaného pojiva PmB 25/55-60. Varianta V2 se od V1 lišila pouze použitím jiného modifikovaného pojiva, množství pojiva zůstalo zachováno. Pro V2 bylo použito pojivo PmB 40/60-75 v režimu HiMA.

Asfalty modifikované polymery mají fyzikálně mechanické vlastnosti změněné přidáním vhodných polymerních přísad. Obecně lze říci, že polymerem modifikované asfalty zlepšují chování asfaltových pojiv v oblasti nízkých a vysokých teplot, protože jsou méně citlivé na změny teploty. Za vysokých teplot nejsou tak měkké a za nízkých teplot nejsou tak tvrdé jako asfalty běžné. Dále mají lepší přilnavost ke kamenivu a nejsou tak náchylné ke stárnutí. Asfaltové směsi z nich vyrobené jsou pak trvanlivější a odolnější proti tvorbě mrazových trhlin (vliv příliš tvrdého asfaltu při nízkých teplotách) a tvorbě trvalých deformací (kromě jiných vlastností též vliv příliš měkkého asfaltu při vysokých teplotách). Ovlivnění vlastností však závisí na druhu a množství modifikátoru, na výchozím asfaltovém pojivu a dalších parametrech. [23]

6.1.1.5.2 V3 (50/70 CRmB)

V rešeršní části bylo uvedeno, že asfaltové směsi používané v konceptu LLP používají polymerem modifikovaná asfaltová pojiva, nicméně ve variantě V3 bylo použito asfaltové pojivo 50/70 CRmB. Pojivo gradace 50/70 bylo modifikováno 10 % aktivované mikromleté pryže (activated rubber powder, ARP) frakce 0-0,8 mm.



V současnosti se stále více mluví o ekologii a udržitelném rozvoji, dalším tématem jsou i zásoby ropy, které nejsou nevyčerpatelné. Všechny tyto důvody nahrávají snaze nahradit v asfaltových směsích co největší procento asfaltového pojiva jinou surovinou. Jednou z možností, jak toho docílit, je použít odpadní mleté gumy z ojetých pneumatik. Velkému rozšíření napomáhá i cena této modifikace, stojí totiž méně než desetinu toho, co stojí syntetické polymery nebo jiné speciálně vyvinuté přísady. [24]

Cenná druhotná surovina v podobě jemně mleté aktivované pryže vzniká zpracováním gumového granulátu na principu mechanochemie. Zdrojem granulátu jsou použité a následně recyklované pneumatiky osobních a nákladních automobilů. Aktivní prach je tvořen částicemi přírodního a syntetického kaučuku. Jediným způsobem výroby gumového prachu formou aktivace surovina získává vynikající mechanické a chemické vlastnosti v podobě vysoké jemnosti, zvětšení měrného povrchu a dokonalé homogenizaci směsi. V silničním stavitelství se používá jako aktivní pojivo modifikovaných asfaltových směsí, má však rozsáhlé použití nejen ve stavebnictví. [25]

6.1.1.5.3 V4 (PmB 25/55-60 + FORTA-FI)

Čtvrtá varianta V4 vychází z varianty V1. Je zde použité stejné pojivo (PmB 25/55-60), navíc však byly přidány vlákna FORTA-FI v poměrném množství 0,5 kg na 1 t asfaltové směsi.

Jedná se o směs polyolefinových a aramidových vláken, které tvoří tzv. 3D rozptýlenou výztuž. Vyztužením asfaltové směsi těmito vlákny dochází ke zlepšení mnoha jejích charakteristik, například dochází ke zvýšení tuhosti, odolnosti vůči tvorbě trvalých deformací i ke zlepšení únavového chování. [26]

Díky těmto skutečnostem je použití asfaltových směsí vyztužených vlákny FORTA-FI vhodné v úsecích s vysokou intenzitou dopravy, zejména těžkých nákladních vozidel. Stejně tak se tyto směsi hodí v místech, kde dochází k častému působení tangenciálních sil (například ve směrových obloucích s malým poloměrem) a k opakovanému brždění a rozjíždění (například v křižovatkách, u přechodů pro chodce či v místech, kde dochází často ke kongescím). [26]

Velkou výhodou použití vláken FORTA-FI je skutečnost, že není nutné provádět technologické zásahy do procesu pokládky a hutnění pokládaných asfaltových směsí. Vlákna FORTA-FI totiž nijak neovlivňují zpracovatelnost ani zhutnitelnost. [26]

Tyto charakteristiky slibují ve směsích používaných pro vozovky s dlouhou životností velký potenciál. Pokud by se naplnilo potvrzení tohoto potenciálu, lze těmito vlákny modifikovat prakticky jakoukoli směs a zlepšit tím některé její vlastnosti.



Obrázek 17: Vlákna FORTA-FI

6.1.1.5.4 V5 (PmB 25/55-60 + 1,5 % Sasobit REDUX)

V páté variantě, označené jako V5, bylo použité pojivo PmB 25/55-60, které bylo navíc modifikované ještě přísadou Sasobit REDUX v množství 1,5 %-hm. pojiva. Díky této přísadě bylo docíleno snížení pracovní teploty ze 160 °C, při které byly vyráběny všechny ostatní varianty, na teplotu 140 °C. Kromě snížení pracovních teplot snižuje viskozitu asfaltového pojiva a usnadňuje tak pokládku, dále pomáhá snižovat stárnutí asfaltového pojiva a minimalizovat tak riziko tvorby únavových a mrazových trhlin. [27]

Snížování pracovních teplot u asfaltových směsí je jedním ze současných trendů a motivací pro tvorbu této varianty byla potenciální možnost zkombinovat výhody nízkoteplotních asfaltových směsí s výhodami vozovek s dlouhou životností. Otázkou v tomto případě zůstává, zda nebude mít nízkoteplotní varianta směsi SMA zhoršené některé funkční vlastnosti, které by pak omezily možnost jejího použití v konceptu vozovek s dlouhou životností.

Nízkoteplotní asfaltové směsi je vhodné používat s ohledem na životní prostředí. Snížením pracovních teplot, a tedy i výrobních teplot, se výrazně sníží energetická náročnost výroby a tím i cenová náročnost. Snížení pracovních teplot asfaltových směsí napomáhá i snížení veškerých emisí a uvolňování výparů jak při výrobě, tak při samotné pokládce. Nízkoteplotní asfaltové směsi lze samozřejmě použít při běžných aplikacích asfaltových směsí, nicméně velmi výhodné je jejich použití ve vnitřních prostorech s omezenou možností odvětrávání, jelikož nižší produkce veškerých emisí a výparů učiní pokládku asfaltových směsí v tunelech, podzemních garážích a jiných uzavřených prostorech přijatelnější pro pokládkovou četbu a ostatní přítomné osoby. Další oblasti, kde lze nízkoteplotní asfaltové směsi s výhodou



použit, je pokládka asfaltového krytu na mostech či tam, kde je požadavek na co nejrychlejší uvedení do provozu.

Nízkoteplotního chování asfaltových směsí lze docílit vhodně zvolenými chemickými přísadami. První velkou skupinou těchto přísad jsou organické přísady na bázi syntetických vosků. Sem lze zařadit použitý Sasobit REDUX, dále například přísady Romonta, RH nebo VTB. Další skupinou organických přísad jsou ty na bázi amidů mastných kyselin, sem patří Licomont BS. Dále existují organické přísady na bázi aminů či povrchově aktivních látek ovlivňující smáčitelnost povrchu zrn kameniva a míru vnitřního tření. Zde lze uvést přísady Rediset WMX, IterLow T či Evotherm MA3. Lze použít i chemické přísady uplatňující nanotechnologické poznatky a zlepšující lubrikační efekt pojiva ve směsi. Jako zástupce této skupiny lze uvést přísadu Zycotherm. [28]

6.1.1.5.5 V6 (PmB 40/60-75 + 30 % R-mat)

Šestá varianta V6 se od předchozích 5 variant lišila svým složením, jelikož nebyla použita směs kameniva navržená postupem uvedeným v kapitolách 6.1.1.1 a 6.1.1.2, ale zde použitá směs kameniva navržena na základě postupu uvedeného v kapitole 6.1.1.4.

Stejně jako u V3 a V5 i zde byla snaha vytvořit variantu, která se snaží ctít ekologický přístup k této problematice. Jedna věc jsou omezené zásoby ropy, z níž se získává asfaltové pojivo, dále je to také možnost omezit těžbu kameniva, které se do asfaltových směsí přidává a v neposlední řadě je důležitá otázka, co se stane s materiálem, který se vybourá z opravovaných vozovek. Tento vybouraný R-materiál lze v určitém procentuálním zastoupení opět do nově budovaných nebo opravovaných vozovek znovu použít a snížit tak nároky na prostory určené ke skládkování vybouraného materiálu z asfaltových vozovek.

Německý předpis H Al ABi (2015) [20], na jehož základě došlo k návrhu směsi SMA L 16 S nijak obsah R-materiálu nespecifikuje. Dle ČSN EN 13108-5 [16] je do směsí SMA možné přidat R-materiál v množství do 10 % z celkové hmotnosti směsi pro obrusné vrstvy a do 20 % z celkové hmotnosti směsi pro vyrovnávací a ložné vrstvy. Navržená směs SMA L 16 S je určena pro ložné vrstvy, nicméně trendem je výzkum a pokládka pokusných úseků různých asfaltových směsí s podílem R-materiálu vyšším, než v současnosti platná norma dovoluje, proto i v této práci byl tento normou požadovaný limit překročen a do směsi bylo použito 30 % R-materiálu z celkové hmotnosti směsi, aby bylo zjištěno, nakolik je tato norma v daném ohledu konzervativní.

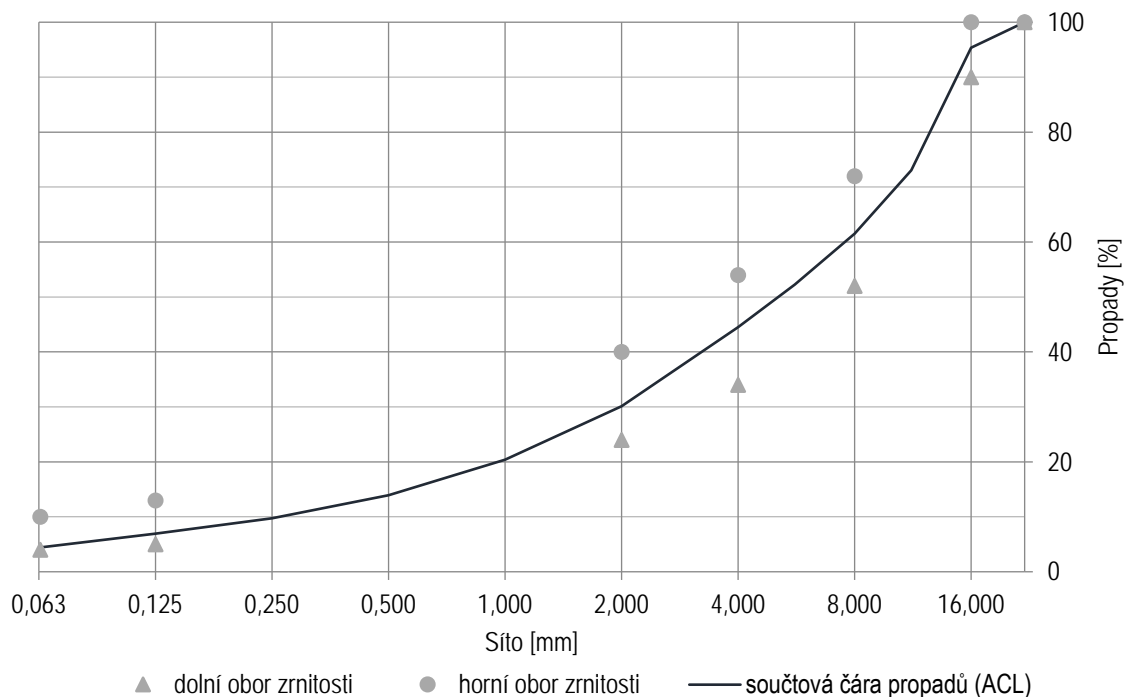
6.1.2 ACL 16 S PmB

Jako referenční směs byla použita ACL 16 S PmB 25/55-55 z kladenské obalovny společnosti POZEMNÍ KOMUNIKACE BOHEMIA, a.s. Jedná se o asfaltový beton pro ložné vrstvy se zvýšenou odolností proti tvorbě trvalých deformací. V laboratoři se tato směs hutní 2×75 úderem Marshallova pěchu.



Oproti směsi SMA je na první pohled patrné, že horní a dolní obor zrnitosti na jednotlivých sítích je jednak velmi odlišný a co se týče rozmezí, a také i značně benevolentnější, u SMA jsou tyto meze značně užší.

Požadavek na minimální obsah pojiva 4,2 % byl dodržen díky použití 4,4 % pojiva.



Graf 10: Čára zrnitosti směsi kameniva pro směs ACL 16 S

6.2 Výroba těles

6.2.1 Laboratorní výroba směsi

Kamenivo se musí skládat ze směsi kameniva o požadované zrnitosti. Pokud kamenivo včetně fileru ještě nejsou suché, vysuší se na konstantní hmotnost v odvětrávané sušárně nastavené na $(110 \pm 5) ^\circ\text{C}$. Kamenivo a filer se poté zváží s přesností na 0,1 % hmotnosti. Navážka odpovídá složení asfaltové směsi a hmotnosti dávky, která má být vyrobena. Pokud se použijí přísady (jako např. vlákna), zváží se se stejnou přesností. [29]

Pojivo se zahřeje na předepsanou teplotu $\pm 5 ^\circ\text{C}$ umístěním jedné nebo více nádob s pojivem do odvětrávané sušárny na dobu 3 až 5 hodin. Před mícháním se nádoby otevřou, pojivo se ručně promíchá a zkontroluje se teplota. [29]



Před mícháním se mísicí nádoba nebo nádrž laboratorní míchačky předehřeje na požadovanou referenční teplotu ± 5 °C. Zvážené vzorky kameniva s filerem nebo bez fileru se nasypou do mísicí komory. Do předehřáté směsi kameniva se přidá pojivo, a pokud se požaduje, i přísady. Přesné množství pojiva se odměřuje vážením nádoby s přesností na ± 1 % hmotnosti během přidávání. Složky se smísí v mísicí misce (mísicí komoře). Pokud se nepřidal do směsi filer, míchání se zastaví přibližně po 10 s, přidá se filer a znovu se spustí míchání. Směs se míchá, dokud nedojde k požadovanému obalení kameniva pojivem. Směs se vizuálně posoudí, aby se zajistilo, že je směs homogenní. Míchání se ukončí v době stanovené podle tabulky 22. [29]

Tabulka 22: Doba míchání asfaltové směsi v laboratoři [29]

Druh směsi	Pojivo	R-materiál	Mechanické míchání	Ruční míchání
Asfaltový koberec mastixový	Silniční pojivo	žádný	4 min	5 min
		obsahuje	5 min	podle potřeby
	Modifikované	žádný / obsahuje	5 min	podle potřeby
Jiná směs než asfaltový koberec mastixový	Silniční pojivo	žádný	3 min	5 min
		obsahuje	5 min	podle potřeby
	Modifikované	žádný / obsahuje	5 min	podle potřeby

Pokud se ve směsi použijí přísady, jejich přimíchání se musí provést podle pokynů výrobce. [29]

6.2.2 Marshallova tělesa

Směs vyrobená postupem v předchozí kapitole a nahřátá na požadovanou teplotu se naplní do formy v přesně daném množství tak, aby vyrobená Marshallova tělesa měla po hutnění tvar válce o průměru $(101,6 \pm 0,1)$ mm a výšku $(63,5 \pm 2,5)$ mm. Po naplnění formy se ihned započne se zhutňováním v rázovém zhutňovači předem určeným počtem úderů. Poté se válcová forma obsahující horké zkušební těleso se uloží na jednu z válcových podložek, aby zkušební těleso leželo přímo na této podložce. Zkušební těleso se ochladí na vzduchu nebo ventilátorem na teplotu přibližně 40 °C a poté se vysune z formy výtlačným zařízením. [30]

Pro účely této práce bylo tímto způsobem vyrobeno od každé varianty 9 těles hutněných 2×50 údery a dalších 9 těles hutněných 2×25 údery.

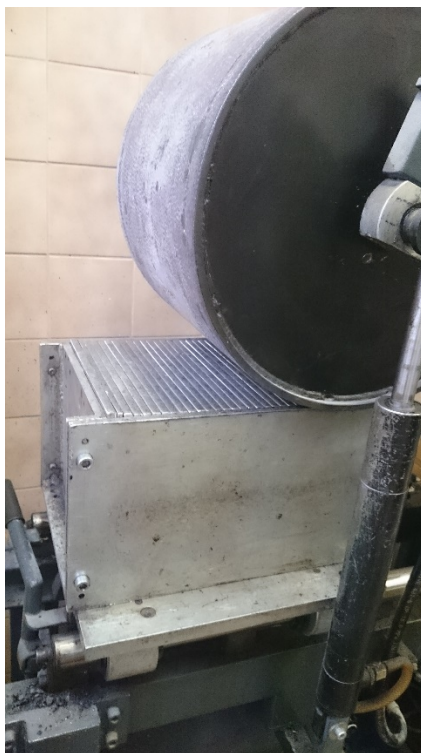
6.2.3 Desky

Navážka pro desky jednotlivých variant byla určena ze znalosti požadovaných rozměrů 260×320×60 mm a z objemových hmotností stanovených pro každou variantu zvlášť na Marshallových tělesech hutněných 2×50 údery.



Forma lamelového zhutňovače byla lehce postříkána separačním prostředkem proti nalepování materiálu na stěny a poté byla naplněna směsí připravenou dle kapitoly 6.2.1. Do formy se uložily hutnicí lamely a válec se na ně spustil a uvedl do pohybu až do doby dosednutí válce na formu. Poté byla zhutněná deska vyndána z formy a nechala se zchladnout. [31]

Pro účely této práce byly od každé varianty vyrobeny 2 desky výše uvedeným způsobem.



Obrázek 18: Lamelový zhutňovač

6.2.4 Stárnutí těles

V důsledku přirozených vlastností asfaltového pojiva dochází v asfaltových směsích k degradaci (termooxidativnímu stárnutí), což v nemalé míře ovlivňuje jejich chování v konstrukci vozovky, proto i v této diplomové práci byla laboratornímu stárnutí vystavena předem určená sada těles od každé varianty včetně referenční směsi. Simulace laboratorního stárnutí byla na tělesech provedena dle prEN 12697-52 [32] po dobu 5 dní při teplotě 85 °C v sušárně s nucenou cirkulací vzduchu.

Na 6 zestárlých Marshallových tělesech od každé varianty byly odzkoušeny moduly tuhosti při 15 °C, načež byly rozříznuty a dále připraveny na zkoušku šíření trhliny ohybem na půlválcovém zkušebním tělese při 0 °C a 15 °C. Pro každou z těchto teplot bylo připraveno 6 půlválcových těles. Posledními zestárlými tělesy byly trámečky určené ke zkoušce tahu za ohybu. Pro teploty 0 °C a -10 °C bylo připraveno shodně po 2 trámečcích.



6.3 Provádění laboratorní zkoušky

Na tělesech vyrobených dle kapitoly 6.2, bylo provedeno 7 zkoušek, jejichž stručný popis je uveden v následujících 7 kapitolách (6.3.1 - 6.3.7), výsledky těchto zkoušek jsou prezentovány v kapitolách 6.4.1 - 6.4.5.

6.3.1 Stanovení modulů tuhosti zkouškou v příčném tahu na válcových zkušebních tělesech (IT-CY)

Stanovení modulů tuhosti bylo provedeno dle ČSN EN 12697-26 [33]. Pro tuto zkoušku bylo od každé varianty vyrobeno 9 Marshallových těles hutněných 2×50 údery a na nich byly moduly tuhosti změřeny při 15 °C. Od každé varianty byly určeny moduly při 0 °C, 27 °C a 40 °C, u těchto teplot pouze na 4 tělesech. Nakonec bylo od každé varianty 6 těles zestárnuo dle kapitoly 6.2.4 a na těchto zestárých tělesech byly stanoveny moduly tuhosti při 15 °C.

Po vytemperování na požadovanou teplotu byla tělesa postupně po jednom upnuta upínacími šrouby do zkušebního zařízení a byly nastaveny dva lineární snímače posunu. Stanovení modulů tuhosti funguje na principu vyvození předem dané horizontální deformace pulzem síly působícím na těleso. Na každém tělese byl stanoven modul tuhosti $2x$, a to na průměrech na sebe navzájem kolmých, dle rovnice (4):

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

kde je E	naměřený modul tuhosti, vyjádřený v MPa;
F	maximální hodnota použitého svislého zatížení, vyjádřená v N;
z	amplituda horizontální deformace zjištěná v průběhu zatěžovacího cyklu, vyjádřená v mm;
h	průměrná tloušťka zkušebního tělesa, vyjádřená v mm;
v	Poissonovo číslo. [33]

6.3.2 Stanovení pevnosti v příčném tahu (ITS)

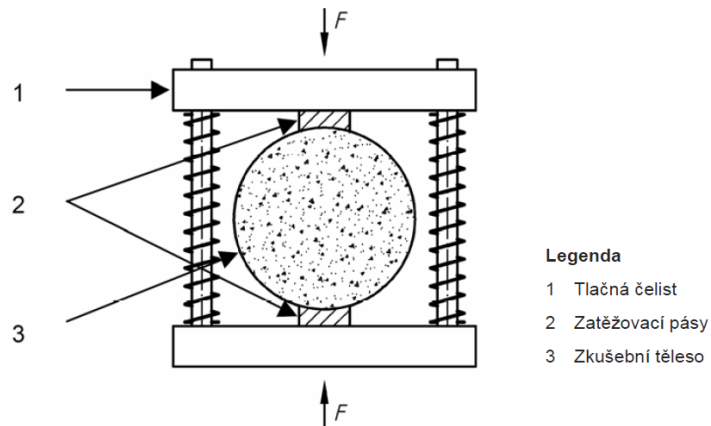
Zkouška stanovení pevnosti byla provedena na tělesech temperovaných za sucha dle ČSN EN 12697-23 [34], na tělesech temperovaných ve vodě dle ČSN EN 12697-12 [35] a na tělesech, která prošla zmrazovacím cyklem, dle americké normy AASTHO T283 [36]. Stanovila se tak i odolnost zkušebního tělesa vůči vodě, respektive vůči mrazu.

Od každé varianty bylo vyrobeno 9 Marshallových těles hutněných 2×25 údery, která byla poté rozdělena do tří skupin po třech tělesech. Na jedné z těchto skupin byla stanovena pevnost v příčném tahu (ITS) dle níže stručně popsaného postupu. Na druhé skupině byla stanovena odolnost asfaltové směsi vůči



vodě postupem popsáním v kapitole 6.3.3 a na třetí skupině byla stanovena odolnost asfaltové směsi proti účinkům mrazu postupem popsáním v kapitole 6.3.4.

Tělesa temperovaná za sucha byla temperována v sušárně na 15 °C a poté stlačena v lisu rychlostí 50 mm/min až do dosažení maximálního zatížení. [34]



Obrázek 19: Umístění tělesa v lisu při zkoušce stanovení pevnosti v příčném tahu [34]

Pro každé zkušební těleso se vypočítá pevnost v příčném tahu ITS (indirect tensile strength) podle vzorce (5):

$$ITS = \frac{2P}{\pi DH} \quad (5)$$

a stanoví se průměrná hodnota,

- kde ITS je pevnost v příčném tahu, v MPa,
P maximální zatížení, v N, zaokrouhlené na celá čísla;
D průměr zkušebního tělesa, v milimetrech, na jedno desetinné místo;
H výška zkušebního tělesa, v milimetrech, na jedno desetinné místo. [34]



Obrázek 20: Marshallovo těleso v zatěžovacím lisu při zkoušce stanovení pevnosti v příčném tahu

6.3.3 Stanovení odolnosti asfaltové směsi vůči vodě (ITSR)

Zkouška stanovení odolnosti zkušebního tělesa vůči vodě byla provedena na tělesech temperovaných ve vodě dle ČSN EN 12697-12. [35]

Tělesa temperovaná ve vodě byla nejprve umístěna do vakuové komory s vodou, ve které byl vytvořen absolutní tlak 6,7 kPa. Po 60 minutách v této komoře byla tělesa na 72 ± 4 hodiny přemístěna do vodní lázně o teplotě $40 \text{ }^\circ\text{C}$, nakonec byla před zkouškou temperována ve vodě při $15 \text{ }^\circ\text{C}$ a byla stejně jako tělesa temperovaná na vzduchu stlačena v lisu rychlostí 50 mm/min až do dosažení maximálního zatížení. [35]

Nakonec se určí poměr ITSR (indirect tensile strength ratio) jako poměr pevnosti v příčném tahu u těles temperovaných ve vodě a na vzduchu dle vzorce (6):

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

kde ITSR je poměr pevností v příčném tahu, v %,
 ITS_w pevností v příčném tahu těles temperovaných ve vodě, v MPa,
 ITS_d pevností v příčném tahu těles temperovaných na vzduchu, v MPa. [35]

6.3.4 Stanovení odolnosti asfaltové směsi proti účinkům mrazu

Stanovení odolnosti asfaltové směsi proti účinkům mrazu není uveden v žádné české normě, jde o postup vycházející z americké normy AASHTO T 283. [36]



Postup je obdobný jako při stanovení odolnosti asfaltové směsi vůči vodě. Tělesa nejprve strávila 20 minut ve vakuové komoře, potom byla vložena do igelitového sáčku. Ke každému tělesu bylo přidáno do igelitového sáčku 10 ml vody a uzavřený sáček byl vložen na minimálně 16 hodin do mrazáku. Po vyndání z mrazáku následovalo přemístění těchto těles do vodní lázně o teplotě 60 °C na 24 hodin a nakonec byla temperována při 15 °C ve vodě jako tělesa při zkoušce pro stanovení odolnosti asfaltové směsi vůči vodě a stejně tak byla stlačena v lisu rychlostí 50 mm/min až do dosažení maximálního zatížení. [36]

Zbývá určit poměr $ITSR_f$ (indirect tensile strength ratio - freeze) jako poměr pevnosti v příčném tahu u těles prošlých zmrazovacím cyklem a nakonec temperovaných ve vodě a těles temperovaných na vzduchu dle vzorce (7):

$$ITSR_f = 100 \cdot \frac{ITS_f}{ITS_d} \quad (7)$$

kde $ITSR_f$ je poměr pevností v příčném tahu, v %,
 ITS_f pevností v příčném tahu těles prošlých zmrazovacím cyklem, v MPa,
 ITS_d pevností v příčném tahu těles temperovaných ve vodě, v MPa. [36]

6.3.5 Šíření trhliny zkouškou ohybem na půlválcovém zkušebním tělese

Tato zkouška proběhla dle ČSN EN 12697-44 [37]. Marshallova tělesa hutněná 2×50 údery byla seříznuta na výšku 50 mm a poté rozříznuta na dvě půlválcová tělesa. Od každé varianty bylo na 6 nezestárlých tělesech odzkoušeno šíření mrazové trhliny při 0 °C, na dalších 6 zestárlých tělesech byla odzkoušena taktéž mrazová trhlina při 0 °C a na posledních 6 zestárlých tělesech dané varianty byla odzkoušena únavová trhlina při 15 °C.

Půlválcové zkušební těleso s naříznutou drážkou uprostřed je zatěžováno třibodovým ohybem tak, že střed spodního líce zkušebního tělesa je vystaven napětí v tahu. V průběhu zkoušky se deformace zvyšuje při konstantní rychlosti 2,5 mm/min. Odpovídající zatížení se zvyšuje na maximální hodnotu F_{max} , která se přímo vztahuje k odolnosti zkušebního tělesa vůči lomu. Vzorce pro získání kritické hodnoty odolnosti vůči lomu $K_{ic,i}$ jsou uvedené v normě ČSN EN 12697-44. [37]



Obrázek 21: Půlválcové těleso v lisu, záznam zkoušky pomocí dataloggeru Almemo



Obrázek 22: Odzkoušené půlválcové těleso ACL 91



Obrázek 23: Odzkoušené půlválcové těleso V672



6.3.6 Zkouška pojiždění kolem

Zkouška, která ukazuje náchylnost k vzniku trvalých deformací v asfaltové směsi, proběhla dle ČSN EN 12697-22+A1 [38]. Od každé varianty byly v laboratoři vyrobeny dvě desky, které byly v malém zkušebním zařízení vytemperovány na teplotu 50 °C. Zařízení bylo uvedeno do pohybu a byla zaznamenávána vertikální deformace. Po 10 000 zatěžovacích cyklech byla zkouška ukončena. [38]

Ze zkoušky se získá hodnota PRD_{AIR} , což je průměrná hloubka vyjeté koleje zkoušené asfaltové směsi vyjádřená v procentech po 10 000 zatěžovacích cyklech, a přírůstek hloubky vyjeté koleje udávaný v mm/10³ zatěžovacích cyklů WTS_{AIR} počítaný dle vzorce (8): [38]

$$WTS_{AIR} = \frac{d_{10\,000} - d_{5\,000}}{5} \quad (8)$$

kde WTS_{AIR} je přírůstek hloubky vyjeté koleje, v mm/10³ zatěžovacích cyklů;
 $d_{10\,000}$, $d_{5\,000}$ hloubka vyjeté koleje po 10 000 a 5 000 cyklech, v mm.



Obrázek 24: Malé zkušební zařízení

6.3.7 Tah za ohybu

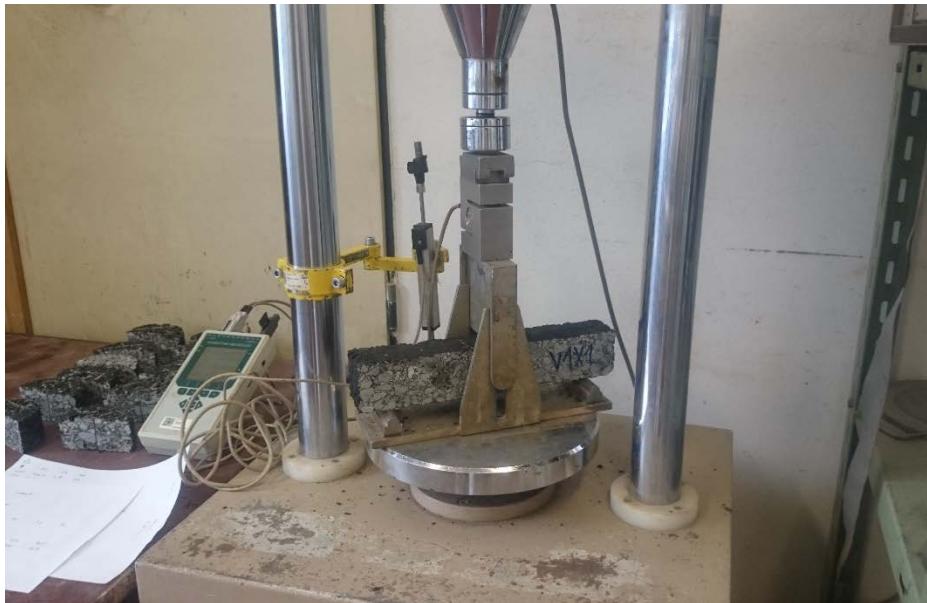
Zkouška proběhla dle postupu uvedeného dle TP 151 [15]. Trámečky o rozměrech 60x50x320 mm z každé varianty byly rozděleny na dvě poloviny podle teplot zkoušky. Jedna polovina byla zkoušena při 0 °C, druhá skupina byla zkoušena při -10 °C. U každé z těchto teplot byla polovina těchto trámečků zestárnutá, druhá byla ponechána nezestárnutá.



Tělesa byla po vytemperování na požadovanou teplotu umístěna do lisu a poté zatěžována lisem 1,25 mm/min až do dosažení maximální síly. Z naměřených hodnot se pro měřenou rychlost vypočítá pevnost v tahu za ohybu R_i [MPa]. Určí se výpočtem ze vzorce (9): [15]

$$R_i = \frac{3}{2} \times \frac{Pl}{bh^2} \quad (9)$$

kde P je největší dosažená síla v N,
 l vzdálenost podpor zkušební tělesa v mm,
 b šířka zkušební tělesa v mm,
 h výška zkušební tělesa v mm. [15]



Obrázek 25: Trámeček při zkoušce v tahu za ohybu ve zkušebním zařízení

6.4 Vyhodnocení prováděných laboratorních zkoušek

6.4.1 Stanovení modulů tuhosti zkouškou v příčném tahu na válcových zkušebních tělesech (IT-CY)

Zkouška byla provedena na Marshallových tělesech dle ČSN EN 12697-26 [33], princip a postup je ve stručnosti popsán v této diplomové práci v kapitole 6.3.1.

Při 0 °C rozdílů ve výsledcích nebyly u všech variant směsi SMA nijak výrazné, lehce vyšší modul tuhosti než ostatní varianty vykazovala varianta V3, ve které bylo použité pojivo 50/70 CRmB, tedy



modifikované jemně mletou pryží. Varianta V4 dosáhla při této teplotě stejného výsledku jako varianta V1, se kterou je prakticky shodná, jen do ní byly přimíchány vlákna FORTA-FI. Při této teplotě byla tuhost asfaltové směsi natolik velká, že vlákna tvořící 3D výztuž u varianty V4 neměly možnost se aktivovat a tuhost směsi tím zvýšit. Z varianty V1 vychází i varianta V5. Pojivo PmB 25/55-60 bylo modifikováno 1,5 % Sasobitu a při této teplotě zůstaly moduly tuhosti stejné i zde. Porovnáme-li výsledky variant V2 a V6, které obě obsahují pojivo PmB 40/60-75, ale V6 obsahuje 30 % R-materiálu, zjistíme, že výsledky se o mnoho neliší, byť varianta V2 má modul tuhosti vyšší o více než 800 MPa. To může být zapříčiněno tím, že při návrhu varianty V6 obsahující R-materiál bylo určeno množství nového pojiva konzervativně, a navíc při výrobě várky směsi pro Marshallova tělesa této varianty došlo k přimíchání ještě dalšího pojiva navíc z důvodu chyby při dávkování pojiva. Vyšší obsah pojiva přinese směsi větší elasticitu, což se projeví snížením modulů tuhosti. Při zkoušení modulů tuhosti u dalších teplot byla ovšem tendence právě opačná. Zde se zjevně více projevil vliv zestárlého asfaltového pojiva, které bylo obsaženo v přidaném R-materiálu. Srovnáme-li výsledky variant V1 a V2 obsahujících polymerem modifikované asfalty různé gradace, lehce vyšší modul tuhosti byl naměřen u varianty V2 s vyšší gradace, které je ovšem svým obsahem polymerové fáze klasifikované jako HiMA. Referenční směs ACL 16 S měla modul tuhosti oproti všem variantám mnohem vyšší, u některých činil rozdíl až 30 %.

Při teplotě 15 °C se již projevil vliv vláken FORTA-FI u V4 zvýšením modulu tuhosti o 21 % oproti V1. Nízkoteplotní varianta V5 vykazala mírně vyšší moduly tuhosti oproti V1, ze které vychází. Při této teplotě byly moduly u variant V1 a V2 s modifikovaným asfaltovým pojivem prakticky rovnocenné. Varianta V6 měla moduly tuhosti oproti V2 vyšší o více než 10 %. I zde byl stále patrný vliv zestárlého pojiva z přidaného R-materiálu. Zdaleka nejvyšších modulů tuhosti u variant směsi SMA bylo dosaženo u V3, referenční směs ACL 16 S v tomto ohledu vyšla oproti všem variantám směsi SMA mnohem lépe, až o více než 60 %.

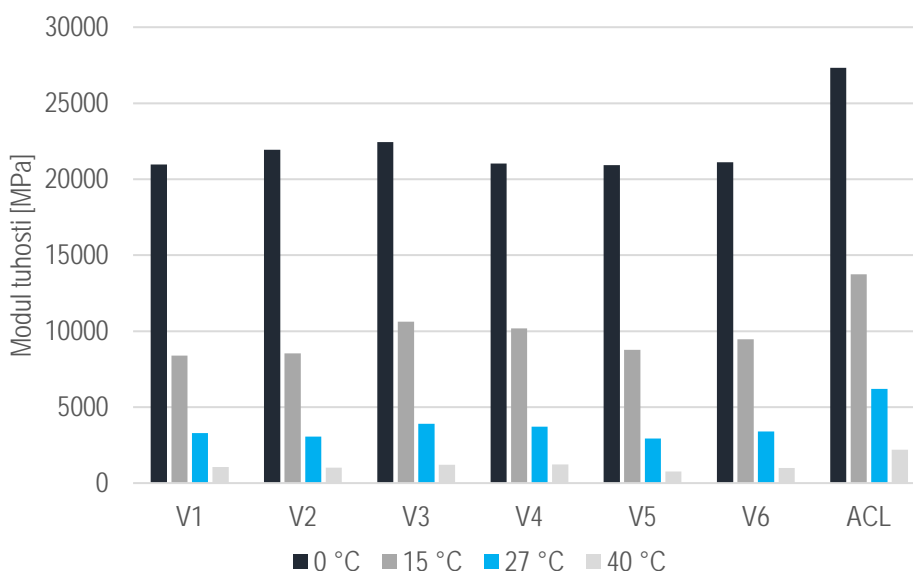
Při teplotě 27 °C byl vzájemný poměr výsledků mezi všemi variantami SMA přibližně stejný jako při 15 °C. Referenční směs dosáhla při této teplotě až dvojnásobných modulů tuhosti.

Teplota 40 °C znamenala pro variantu V5 o čtvrtinu nižší moduly tuhosti než u V1, naopak V4 měla oproti V1 procentuálně ještě o něco lepší výsledek než při teplotě 27 °C. Moduly tuhosti V2 a V6 jsou zde prakticky stejné. Varianta V3 tentokrát neměla nejlepší výsledek z variant směsi SMA, těsně ji předběhla již zmíněná varianta V4 obsahující vlákna FORTA-FI. Stejně jako u teploty 27 °C byly moduly tuhosti referenční směsi oproti všem variantám zhruba dvojnásobné.



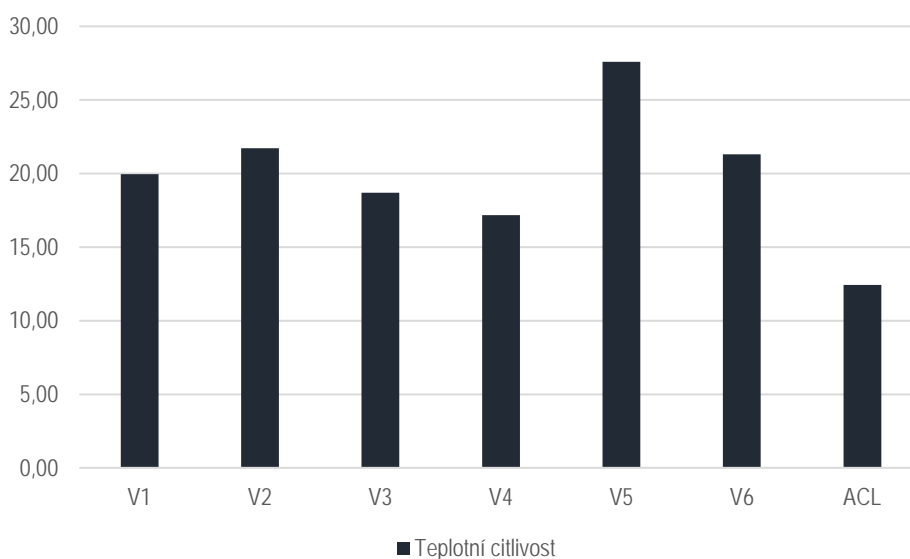
Tabulka 23: Shrnutí výsledků modulů tuhosti nezestárých těles včetně teplotní citlivosti směsi

Varianta a její specifikace		Moduly tuhosti [MPa]				Teplotní citlivost
		0 °C	15 °C	27 °C	40 °C	
V1	PmB 25/55-60	20966	8394	3284	1051	19,96
V2	PmB 40/60-75	21929	8535	3063	1010	21,71
V3	50/70 CRmB	22435	10623	3905	1200	18,69
V4	PmB 25/55-60 + FORTA-FI	21029	10187	3715	1224	17,18
V5	PmB 25/55-60 + 1,5 % Sasobit	20934	8779	2931	759	27,58
V6	PmB 40/60-75 + 30 % R- mat	21105	9471	3400	991	21,30
ACL	PmB 25/55-55	27319	13739	6203	2199	12,43



Graf 11: Modul tuhosti všech směsi při všech zkušebních teplotách

Důležitým ukazatelem u této zkoušky je teplotní citlivost, která je definována jako podíl modulů tuhosti při nejnižší a nevyšší zkušební teplotě, zde se jedná o 0 °C a 40 °C. U varianty V4 se ukázal pozitivní vliv vláken FORTA-FI oproti V1, naopak použití přísady Sasobit REDUX u nízkoteplotní varianty V5 teplotní citlivost zhoršilo. Varianty V2 a V6 dosáhly prakticky stejných výsledků. Varianta V3 s CRmB dosáhla dobrých výsledků, nižší teplotní citlivost ze směsi SMA měla jen V4. Referenční směs ovšem dosáhla mnohem nižší teplotní citlivosti díky skutečnosti, že při 40 °C dosáhla vysokého modulu tuhosti.



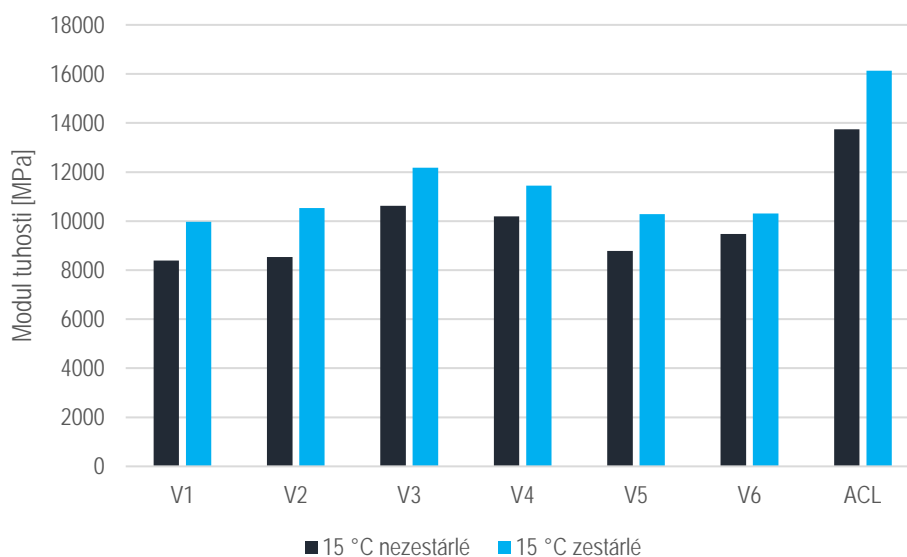
Graf 12: Teplotní citlivost jednotlivých směsí

Po stanovení modulů tuhosti bylo od každé varianty odebráno 6 těles z 9, aby byly vystaveny laboratornímu stárnutí popsaném v kapitole 6.2.4. Při procesu stárnutí se asfaltové pojivo stává tužším, ale křehčím. Dochází tak k nárůstu pevnosti, na druhou stranu se směs stává křehčí, tedy náchylnější k tvorbě poruch, například trhlin. V tabulce 25 a grafu 13 jsou shrnuty výsledky měření modulů tuhosti na zestárých tělesech při teplotě 15 °C, při dalších teplotách nebyla tato zkouška na zestárých tělesech prováděna. Nárůst modulu tuhosti je vyjádřený indexem stárnutí, který je definován jako poměr modulu tuhosti na zestárých tělesech ku modulu tuhosti na nezestárých tělesech, vždy u jedné konkrétní směsi. Nejvyšší index stárnutí byl zjištěn u variant V1 a V2, tedy variant obsahujících PmB, naopak nejnižší byl zjištěn u V6. V této variantě se díky 30% obsahu R-materiálu vyskytovalo díky několika letům v konstrukci vozovky zatížené dopravou i klimatickými podmínkami přirozeně zestárlé asfaltové pojivo a laboratorní simulace stárnutí se na této variantě neprojevila v takové míře jako u ostatních variant obsahujících pouze nové asfaltové pojivo. Menší vliv stárnutí lze pozorovat i u varianty V4, kde byla směs s PmB 25/55-60 doplněna vlákny FORTA-FI.

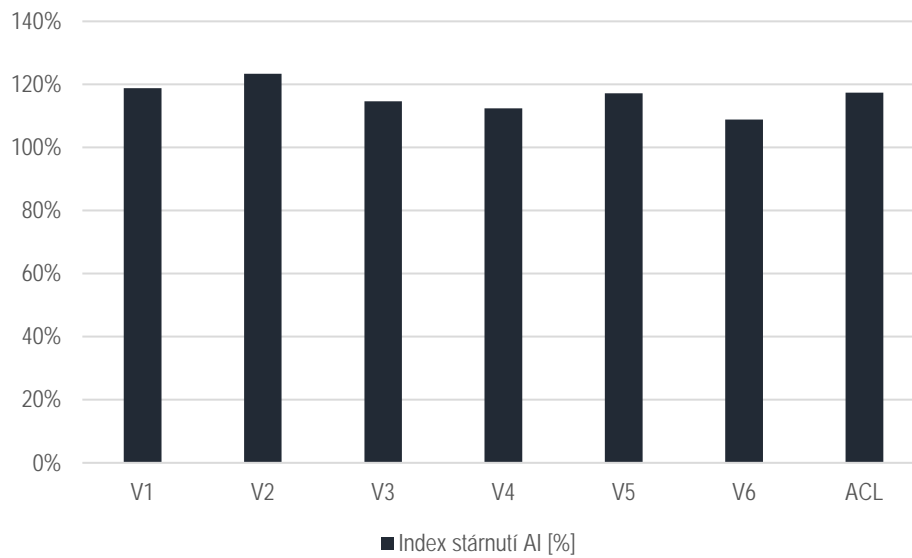


Tabulka 24: Porovnání modulů tuhosti měřených při 15 °C na nezestárých a zestárých tělesech včetně indexu stárnutí

	Modul tuhosti při 15 °C [MPa]		Index stárnutí AI [%]
	nezestárlé	zestárlé	
V1	8394	9973	119%
V2	8535	10530	123%
V3	10623	12181	115%
V4	10187	11449	112%
V5	8779	10286	117%
V6	9471	10306	109%
ACL	13739	16128	117%



Graf 13: Porovnání modulů tuhosti měřených při 15 °C na nezestárých a zestárých tělesech



Graf 14: Index stárnutí tuhosti jednotlivých směsí

6.4.2 Stanovení pevnosti v příčném tahu

Kompletní souhrn výsledků zkoušky stanovení pevnosti v příčném tahu pro tělesa temperovaná na suchu, pro tělesa temperovaná ve vodě a pro tělesa prošlá zmrazovacím cyklem jsou k vidění v tabulce 26.



Tabulka 25: Souhrn výsledků ze zkoušky stanovení pevnosti v příčném tahu

Těleso	Cyklus	Síla porušení tělesa	Příčná deformace	Pevnost v příčném tahu	Poměrné přetvoření	Modul pružnosti
		[kN]	[mm]	[MPa]	[%]	[MPa]
V1	suché	27,75	2,67	2,77	8,87	62,03
	mokrý	19,87	4,15	1,97	13,78	28,52
	mráz	20,17	3,20	2,00	10,55	20,17
V2	suché	31,71	2,97	3,10	9,70	63,53
	mokrý	22,96	3,57	2,26	11,73	38,25
	mráz	23,48	3,91	2,37	13,21	23,48
V3	suché	29,40	2,91	2,87	9,51	60,13
	mokrý	20,67	3,66	2,04	12,11	33,50
	mráz	19,59	2,86	1,93	9,41	19,59
V4	suché	25,89	2,97	2,61	10,01	51,84
	mokrý	26,46	2,94	2,66	9,92	53,44
	mráz	23,54	3,03	2,34	10,15	23,54
V5	suché	24,76	2,92	2,47	9,73	50,42
	mokrý	23,53	3,18	2,36	10,74	43,85
	mráz	23,55	3,46	2,35	11,51	23,55
V6	suché	30,02	3,24	3,11	11,25	55,01
	mokrý	29,87	3,12	3,10	10,85	56,88
	mráz	29,87	2,92	3,09	10,13	29,87
ACL	suché	23,70	2,13	2,32	6,99	66,11
	mokrý	16,95	2,03	1,67	6,71	49,57
	mráz	12,81	2,55	1,25	8,40	12,81

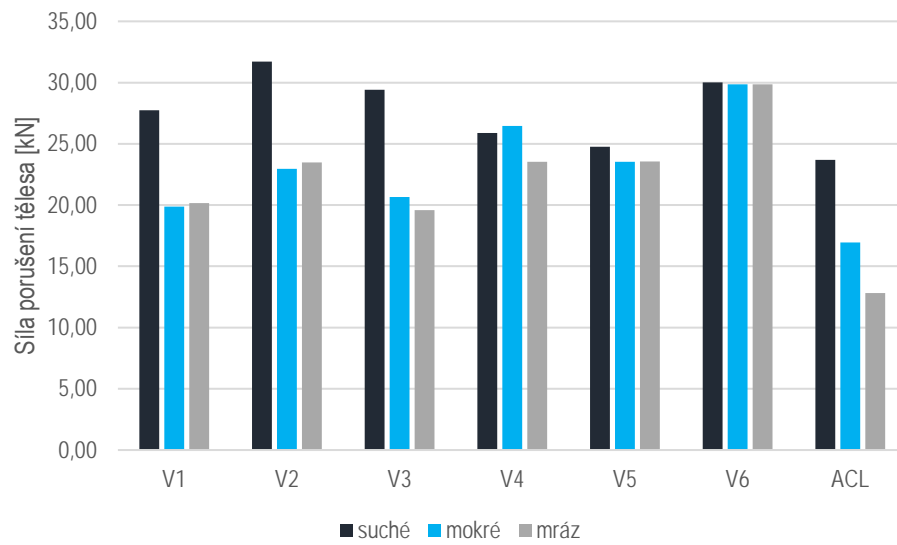
V grafu 15 jsou zobrazeny síly potřebné pro porušení zkušební tělesa a v následujícím grafu je zobrazena pevnost v příčném tahu, která je přímo úměrná právě síle potřebné pro porušení zkušební tělesa. Největší síly bylo třeba pro porušení těles temperovaných na vzduchu u varianty V2 s pojivem PmB 40/60-75. Varianta V6 s R-materiálem a stejným pojivem jako v případě V2 dosáhla výsledků jen o něco málo horších. Zajímavým poznatkem je, že varianta V1 (PmB 25/55-60) měla vyšší pevnost v příčném tahu než V4 (PmB 25/55-60 + FORTA-FI) u těles temperovaných na sucho. Oproti výchozí variantě V1 měla varianta V5 (PmB 25/55-60 + 1,5 % Sasobit) taktéž nižší pevnost v příčném tahu. Referenční směs ACL 16 S byla v této zkoušce překonána všemi variantami směsi SMA.

U těles temperovaných ve vodě lze pozorovat v zásadě dvě skupiny, v nichž jsou si jednotlivé zastoupené varianty podobné podle ITSR. Tento poměr lze vidět v tabulce 27 a grafu 17. První tři varianty dosáhly pouze lehce nad 70 %. Německý předpis H AI ABi (2015) nepožaduje žádnou minimální hodnotu ITSR, nicméně požadavek na minimální hodnotu 80 %, který požaduje ČSN EN 13108-1 [16] pro směs ACL 16 S u prvních třech variant dosažen nebyl. Stačila však mírná modifikace a výsledky byly hned lepší. Přidáním vláken FORTA-FI stoupl poměr ITSR u varianty V4 dokonce nad 100 % a takové výsledky je třeba brát s rezervou. Tělesa, která prošla cyklem zahmující pobyt ve vodní lázni by tímto měla být určitým

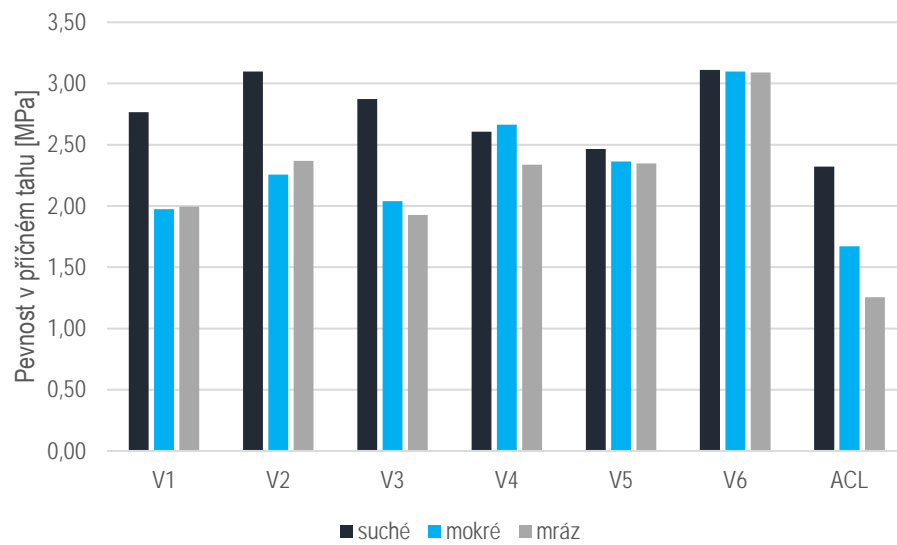


způsobem porušena, a tudíž by hodnota ITSR měla být nižší než 100 %. Někdy u této zkoušky podobný výsledek vyjde, což v tomto případě mohlo být nepřesností při temperování zkušebních těles na požadovanou teplotu, kdy i změna zkušební teploty o 1 °C může mít značný vliv na výsledek zkoušky. Od varianty V4, kde z naměřených hodnot tento výsledek vyšel, byla vyrobena další zkušební sada Marshallových těles hutněných 2×25 údery a zkouška byla provedena znovu, nicméně se stejnými výsledky, čímž se vyloučila chyba při přípravě nebo samotném provádění zkoušky. Varianta V5 (PmB 25/55-60 + 1,5 % Sasobit) dosáhla oproti výchozí variantě V1 v mokřím cyklu mnohem lepších výsledků, což se také promítlo v hodnotě ITSR přesahující 95 %. Varianta V6 (PmB 40/60-75 + 30 % R-mat) obsahovala, jak již bylo poznamenáno, více pojiva z důvodu kombinace konzervativního návrhu s chybou při dávkování pojiva při výrobě, což vyústilo ve výrazně nižší mezerovitost, která měla značně pozitivní vliv na výsledek této zkoušky. Při pobytu těles této varianty ve vodní lázni o teplotě 40 °C nemohla voda působit na dostatečně velkém povrchu včetně toho uvnitř tělesa na to, aby jejich strukturu degradovala. Pravým opakem v tomto ohledu je referenční směs ACL 16 S obsahující 4,4 % pojiva a mnohem vyšší mezerovitostí než všechny varianty směsi SMA, zejména však oproti V6. ITSR přesahující lehce 70 % tak není rozhodně špatným výsledkem.

U těles prošlých zmrazovacím cyklem byly z naměřeny velmi podobné výsledky jako u těles temperovaných ve vodě – u V1 a V2 bylo dosaženo nepatrně lepších výsledků, u V3 a V4 lehce horších, u V5 a V6 se náročnější podmínky, kterými zkušební tělesa prošla, na pevnostních charakteristikách nijak nepodepsaly, zjevně ze stejných důvodů, které se postaraly o dobré výsledky u těles temperovaných ve vodě. Ve stínu variant směsi SMA zůstává referenční směs ACL 16 S, která dosáhla téměř pouze poloviční pevnosti v příčném tahu oproti tělesům temperovaným na suchu. Tento poměr by šel zlepšit například zvýšením množství asfaltového pojiva ve směsi, nicméně to by znamenalo zhoršení některých funkčních vlastností (například modulů tuhosti), navíc tato směs se pohybovala na dolní hranici normou stanovené mezerovitosti směsi, proto by u této směsi nebylo zvýšení obsahu asfaltového pojiva řešením.



Graf 15: Síla při porušení zkušebního tělesa všech variant

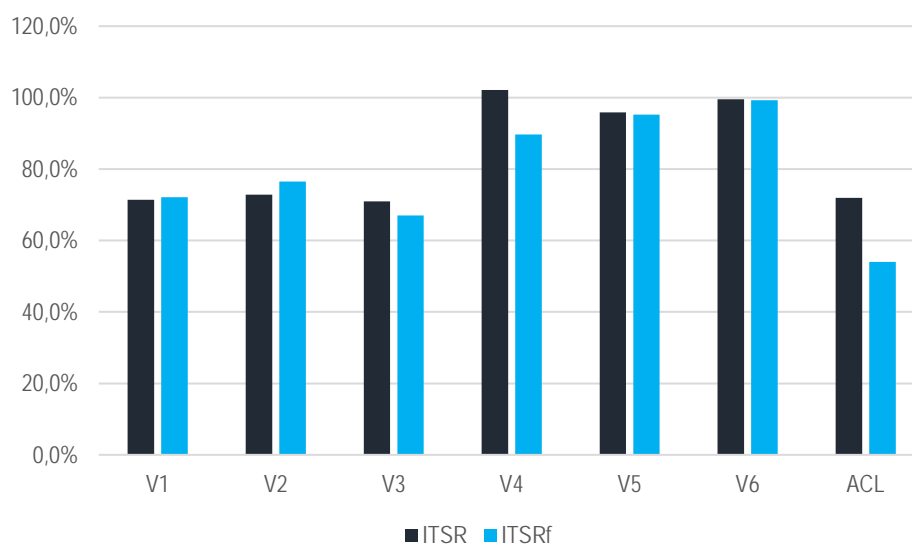


Graf 16: Pevnost v příčném tahu všech variant



Tabulka 26: Shrnutí výsledků ITSR a ITSRf všech variant

	ITSR	ITSRf
V1	71,4%	72,1%
V2	72,8%	76,5%
V3	71,0%	67,0%
V4	102,1%	89,7%
V5	95,8%	95,2%
V6	99,6%	99,3%
ACL	72,0%	54,0%



Graf 17: Výsledky ITSR a ITSRf všech variant

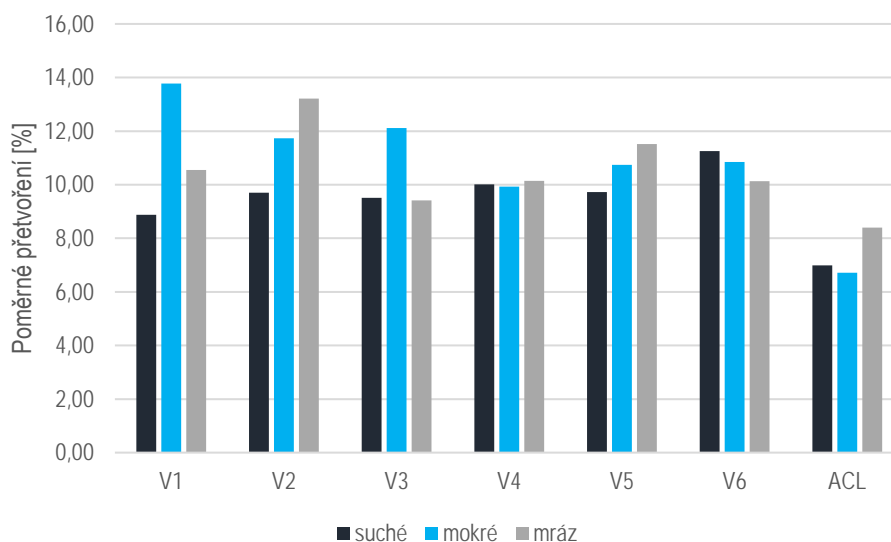
Z maximální síly při porušení a příslušné příčné deformace tělesa lze určit modul pružnosti. Z grafu 19 je jasné patrné, že u prvních pěti variant směsi SMA lze pozorovat korelaci mezi modulem pružnosti u těles temperovaných na sucho a pevností v příčném tahu u těles temperovaných stejným způsobem. Je to dané skutečností, že modul pružnosti je nepřímo úměrný příčné deformaci při porušení tělesa, která se u prvních pěti variant nijak výrazně nelišila. V tomto sledovaném parametru se ovšem vymyká varianta V6 a referenční směs ACL. Varianta V6 dosáhla díky vyššímu obsahu asfaltového pojiva větší příčné deformace před porušením než zbylé varianty, což vyústilo v nižší modul pružnosti. Právě opačného výsledku dosáhla referenční směs. Mnohem menší příčná deformace oproti předchozím variantám pomohla směsi ACL dosáhnout nejvyššího modulu pružnosti.

U těles temperovaných ve vodě lze naopak pozorovat jistou korelaci s ITSR. Tělesa s méně porušenou strukturou (V4 – V6) měla modul pružnosti srovnatelný s modulem pružnosti určeným na

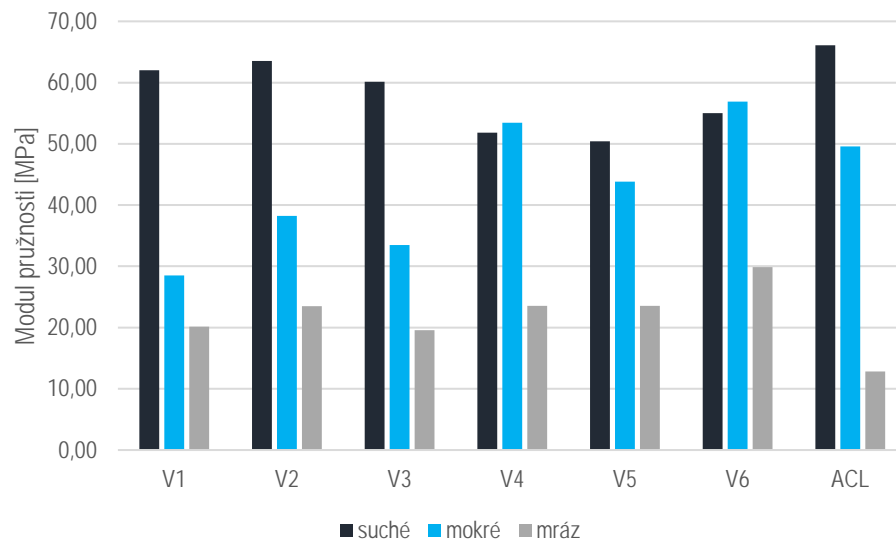


tělesech příslušných variant temperovaných na vzduchu. Tělesa více degradovaná pobytem ve vodní lázni (V1 – V3) měla modul pružnosti prakticky pouze poloviční oproti svým protějškům temperovaným na vzduchu. Referenční směs ACL dosáhla relativně vysokého modulu pružnosti, stejně jako v předchozím případě díky malé dosažené příčné deformaci při porušení tělesa.

U těles prošlých zmrazovacím cyklem lze pozorovat dramatický pokles modulu pružnosti. Varianty V1 – V5 se v tomto ohledu příliš neliší, vyšší modul pružnosti byl naopak vypočten u varianty V6. U těles temperovaných na sucho byl vyšší obsah asfaltového pojiva v tomto ohledu spíše na obtíž, zde naopak pomohl díky nižší mezerovitosti, která napomohla nižší degradaci při vystavení zkušebních těles této sady zmrazovacímu cyklu. Referenční směs byla zmrazovacím cyklem natolik porušená, že byl zjištěn modul pružnosti naprosto minimální.



Graf 18: Dosažené poměrné přetvoření všech variant



Graf 19: Modul pružnosti všech variant

6.4.3 Šíření trhliny zkouškou ohybem na půlválcovém zkušebním tělese

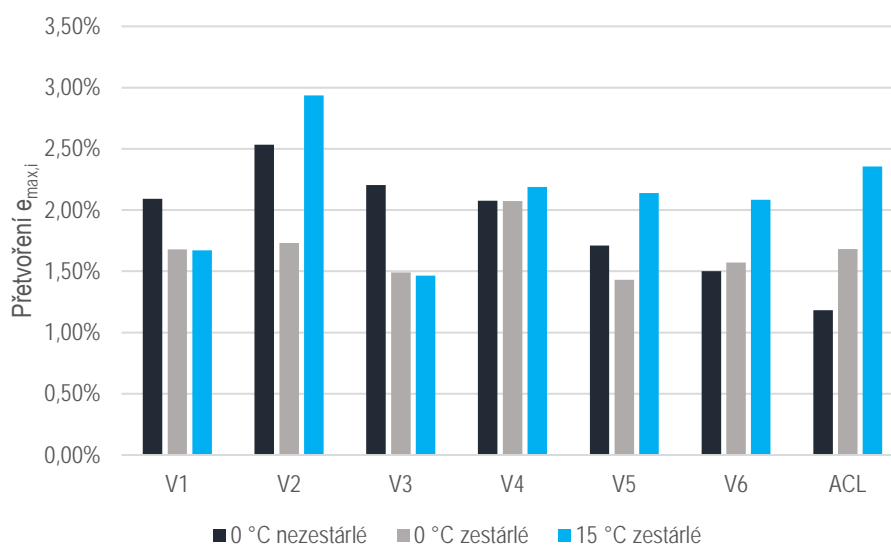
Důležitou vlastností asfaltových vrstev v konstrukci vozovky je odolávat tvorbě trhlin. Z tohoto důvodu byla provedena zkouška šíření trhliny ohybem na půlválcovém tělese. Výsledky jsou shrnuté v následující tabulce, detailněji jsou jednotlivé dílčí popsány u příslušných grafů.



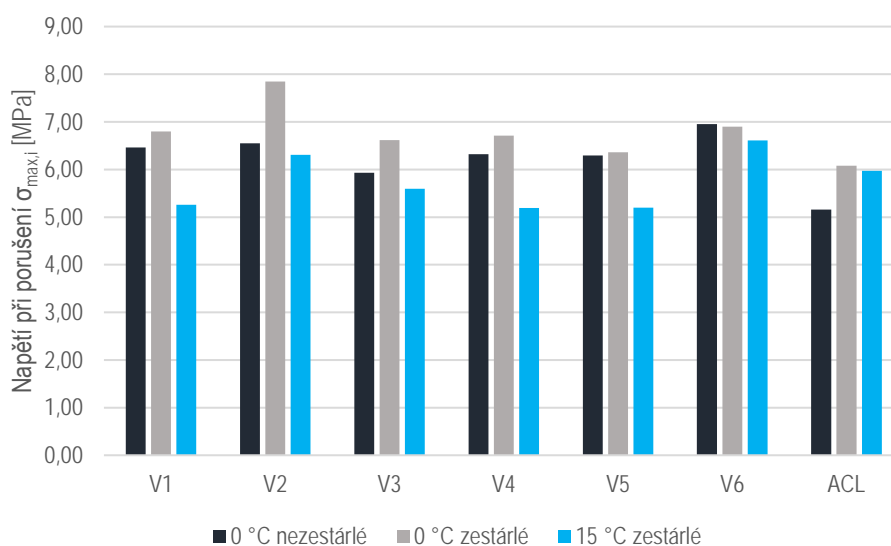
Tabulka 27: Souhrn výsledků ze zkoušky šíření trhliny zkouškou ohybem na půlválcovém zkušebním tělese

	Teplota zkoušení [°C]	Specifikace	Přetvoření $\epsilon_{\max,i}$ [%]	Napětí při porušení $\sigma_{\max,i}$ [MPa]	Kritická hodnota $K_{Ic,i}$ (2011) [N/mm ^{3/2}]	Kritická hodnota $K_{Ic,i}$ (2016) [N/mm ^{3/2}]	Energie do maximální hodnoty [J]	Celková energie zkoušky [J]
V1	0 °C	nezestárlé	2,09%	6,46	47,8	44,6	3,699	6,158
	0 °C	zestárlé	1,68%	6,80	50,7	46,9	2,780	4,218
	15 °C	zestárlé	1,67%	5,26	39,2	36,2	2,561	5,647
V2	0 °C	nezestárlé	2,53%	6,55	48,7	45,1	3,804	6,480
	0 °C	zestárlé	1,73%	7,85	58,3	54,1	3,220	5,329
	15 °C	zestárlé	2,94%	6,31	46,8	43,5	5,477	10,214
V3	0 °C	nezestárlé	2,20%	5,93	44,1	40,9	3,280	6,333
	0 °C	zestárlé	1,49%	6,61	49,2	45,6	2,506	3,909
	15 °C	zestárlé	1,46%	5,59	41,4	38,6	2,352	5,101
V4	0 °C	nezestárlé	2,08%	6,32	47,0	43,6	3,456	6,076
	0 °C	zestárlé	2,07%	6,71	51,2	46,1	3,269	4,911
	15 °C	zestárlé	2,19%	5,19	38,4	35,8	3,203	7,370
V5	0 °C	nezestárlé	1,71%	6,30	46,9	43,4	2,385	3,594
	0 °C	zestárlé	1,43%	6,36	47,2	43,9	2,283	3,119
	15 °C	zestárlé	2,14%	5,20	38,6	35,9	3,011	6,384
V6	0 °C	nezestárlé	1,50%	6,95	51,8	47,9	2,434	3,212
	0 °C	zestárlé	1,57%	6,90	51,2	47,6	2,740	3,733
	15 °C	zestárlé	2,08%	6,61	49,0	45,6	4,000	7,612
ACL	0 °C	nezestárlé	1,18%	5,16	38,4	35,6	1,448	2,263
	0 °C	zestárlé	1,68%	6,08	45,1	41,9	2,599	2,996
	15 °C	zestárlé	2,35%	5,97	44,3	41,2	3,296	4,317

U dosaženého přetvoření je zajímavé všimnout si vysokých hodnot naměřených u varianty V2 s PmB 40/60-75. Jedná se o pojivo v režimu HiMA (Highly Modified Asphalt, vysoce modifikovaný asfalt), charakterizované převrácením asfaltové a polymerové fáze ve prospěch polymeru, které má velmi dobré únavové vlastnosti, což lze pozorovat u hodnoty příslušné zkoušky únavové trhliny při 15 °C. Velkého přetvoření dosáhla tato varianta i při zkoušení mrazové trhliny při 0 °C a ukázala tak dobré elastické vlastnosti, které této variantě poskytlo pojivo HiMA. U varianty 4 se projevila vlákna FORTA-FI zejména u zestárlých těles, kdy pomohla směsi se zestárlých asfaltovým pojivem k větší elasticitě. Větší elasticitu dodala zestárlému asfaltovému pojivu i přísada Sasobit REDUX ve variantě V5 v porovnání s variantou V1.

Graf 20: Přetvoření $\varepsilon_{max,i}$

U dosaženého napětí při porušení zkušebního půlválcového tělesa nedošlo u jednotlivých variant k příliš velkému rozptylu naměřených hodnot, lehce vyššího napětí dosáhly pouze varianty V2 a V6, kde bylo použité pojivo v režimu HiMA.

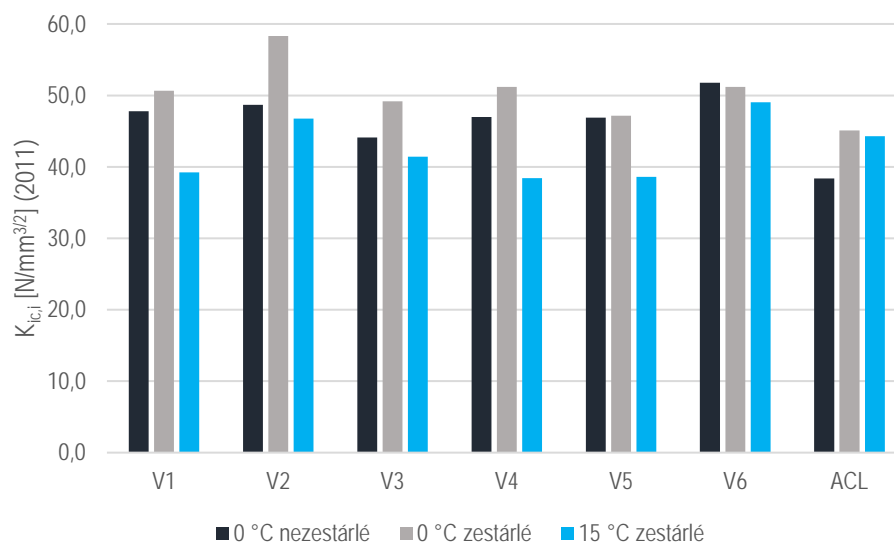
Graf 21: Napětí při porušení $\sigma_{max,i}$

Důležitým parametrem u této zkoušky je lomová houževnatost $K_{ic,i}$ vyjadřující odolnost proti vzniku trhliny. Zde jsou uvedeny výsledky lomové houževnatosti dle ČSN EN 12697-44 (2011) a prEN 12697-44 (2016). V revidované normě prEN 12697-44 jsou upravené dva vztahy. Jeden je pro výpočet geometrického

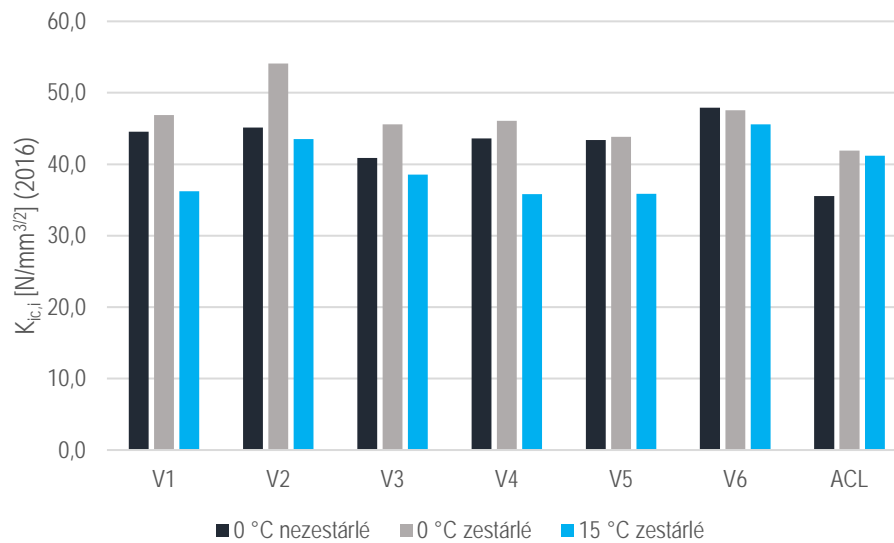


faktoru zkušebního tělesa, druhý přímo pro výpočet lomové houževnatosti. Z těchto důvodů vychází dle revidované normy lomová houževnatost ve všech případech zhruba o 7 % nižší.

Jelikož hodnota lomové houževnatosti je přímo úměrná napětí při porušení zkušebního tělesa a geometrický faktor, na němž je v obou případech výpočtu lomová houževnatost taktéž přímo úměrná, se u jednotlivých těles liší jen velmi málo, výsledné grafy vypadají velmi podobně. Mezi jednotlivými variantami se výsledné hodnoty příliš neliší, nicméně je zde vidět pozitivní vliv pojiva v režimu HiMA (varianty V2, V6), na druhou stranu je možná trochu překvapivě zjištění, že vlákna FORTA-FI u V4 nepřinesly oproti V1 žádné zlepšení odolnosti vůči lomu. Dalším zajímavým poznatkem je mírné snížení lomové houževnatosti u varianty V5, kde byla použita přísada Sasobit REDUX, oproti V1 při zkoušení mrazové trhliny na zestárých tělesech. U všech variant směsi SMA byla vypočtena mnohem vyšší lomová houževnatost při zkoušení nezestárých těles na 0 °C oproti referenční směsi ACL, u zkoušení únavové trhliny při 15 °C byla oproti referenční směsi ACL z variant směsi SMA ovšem lepší jen V2 a V6 s pojivem v režimu HiMA.



Graf 22: Lomová houževnatost $K_{ic,i}$ [N/mm^{3/2}] dle ČSN EN 12697-44 (2011)



Graf 23: Lomová houževnatost $K_{ic,i}$ [N/mm^{3/2}] dle prEN 12697-44 (2016)

Průběh zkoušky byl zaznamenáván dataloggerem, který zaznamenával závislost velikost působící síly a deformaci zkoušeného půlválcového tělesa. Na základě vynesení této závislosti do grafu vznikl pro každé zkoušené těleso pracovní diagram, které lze vidět níže v grafech 26, 27 a 28. Při odečtení plochy pod křivkou získáme energii této zkoušky pro každé těleso. Pro účely této práce byly stanoveny dvě hodnoty energie. První byla měřena pouze do maximální hodnoty působící síly, při které se těleso porušilo. V grafech je označovaná jako „energie do maximální hodnoty“. Druhá hodnota energie, v grafech označovaná jako „celková energie zkoušky“, byla měřena až do chvíle, kdy se velikost působící síly dostala prakticky na nulu, úplný konec zkoušky byl stanoven při hodnotě působící síly 0,1 kN.

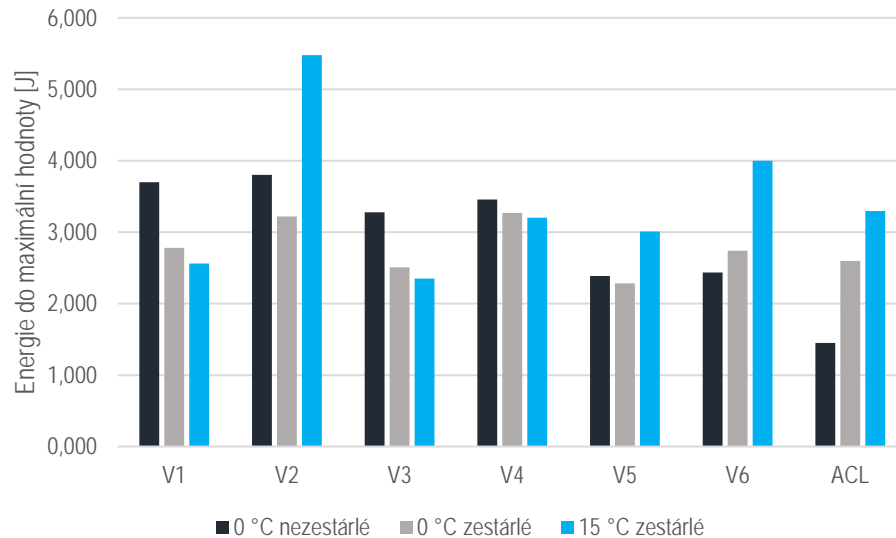
Při pohledu na následující grafy 24 a 25 lze z výsledků této zkoušky odvodit následující závěry. Na nezestárlých tělesech při 0 °C jsou si energie u variant V1 – V4 velmi podobné, ale V5 a V6 jsou zřetelně nižší. Je zde poznat negativní vliv přísady Sasobit REDUX u V5 oproti V1 na výsledek této zkoušky. Velmi zajímavým poznatkem je, že u této varianty došlo k porušení všech těles kromě jednoho křehkým lomem, což se u nezestárlých těles při zkoušení mrazové trhliny při 0 °C stalo už jen u varianty V6 s R-materiálem, která byt' nebyla laboratorně zestárlá, určité množství zestárlého asfaltového pojiva obsahovala. Křehkým lomem byla porušena i nezestárlá tělesa při 0 °C i u referenční směsi ACL.

U zestárlých těles zkoušených při 0 °C došlo ke křehkému lomu na všech tělesech všech variant včetně referenční směsi ACL. Stárnutí pojiva zvyšuje jeho tuhost, ale pojivo se tak stává zároveň křehčím. Zde lze pozorovat pozitivní vliv vláken FORTA-FI u V4 v porovnání s V1 na výsledné hodnoty energie nutné k porušení zkušebního tělesa.

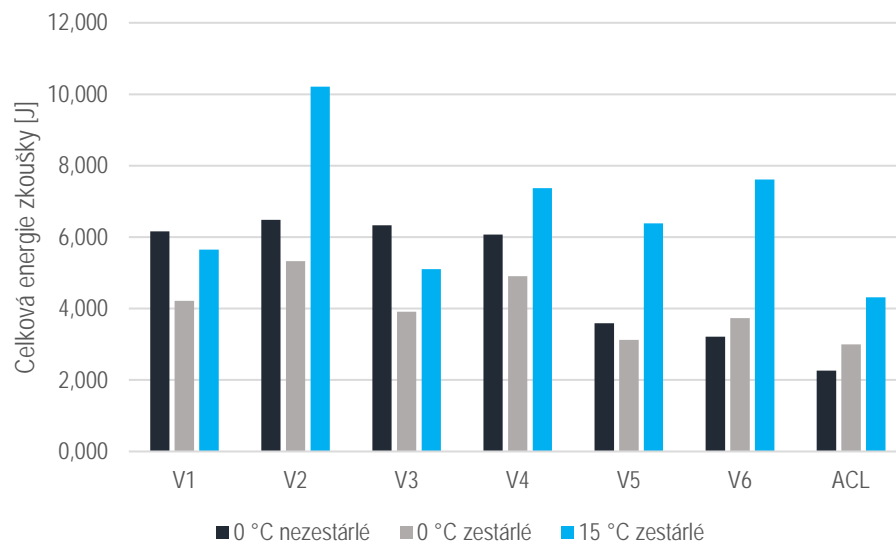
U zestárlých těles zkoušených při 15 °C na únavovou trhlinu je jasně vidět dominance asfaltového pojiva HiMA ve variantách V2 a V6, stejně tak je vidět pozitivní vliv vláken FORTA-FI u V4 i zde. Naopak



asfaltové pojivo modifikované jemně mletou pryží ve variantě V3 dosáhlo nejhoršího výsledku z testovaných variant. Referenční směs ACL měla při této teplotě jako jediná tělesa, která byla porušena křehkým lomem.

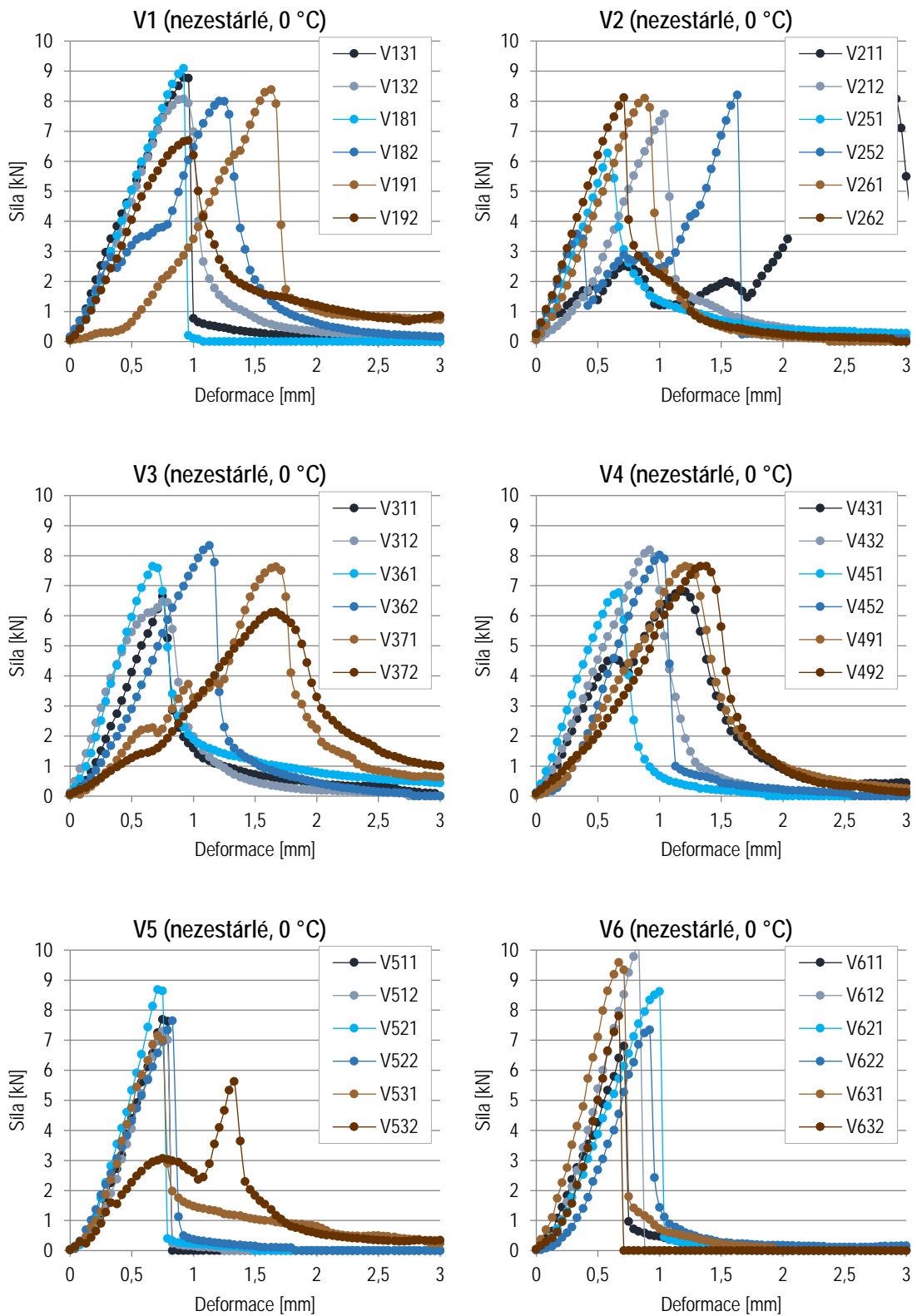


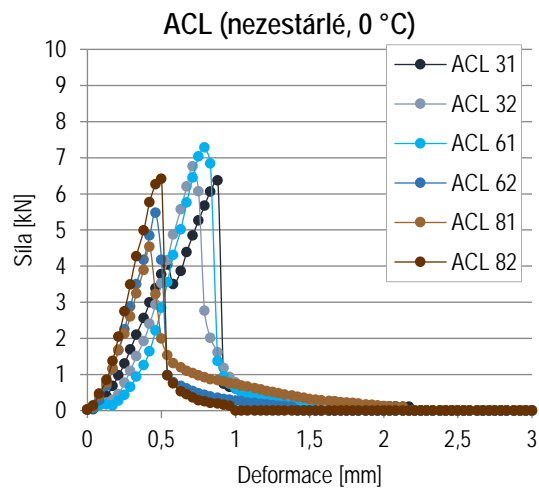
Graf 24: Energie do maximální hodnoty



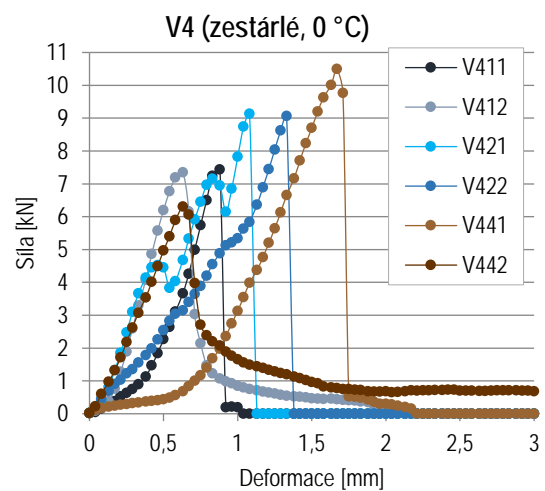
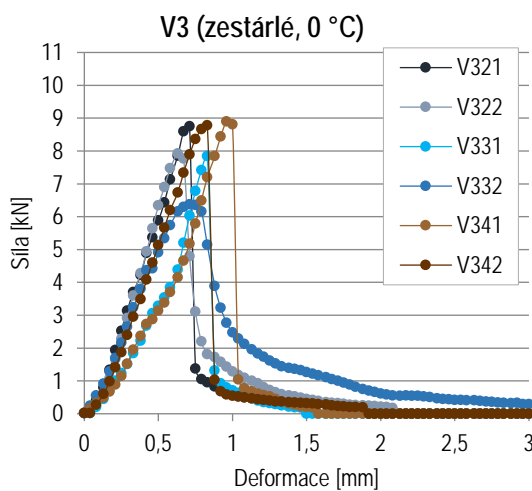
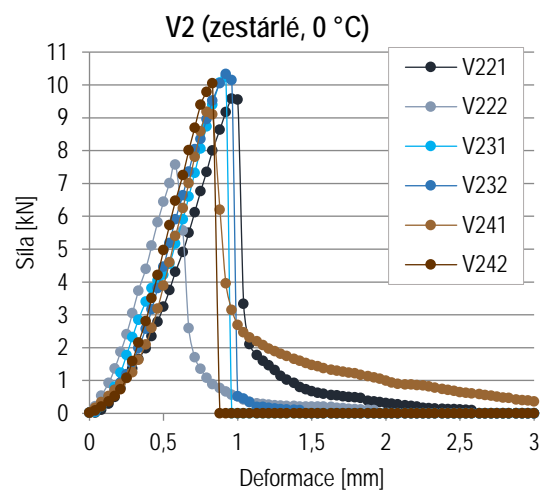
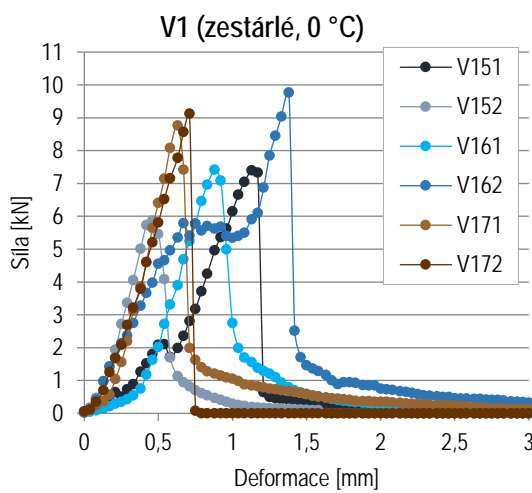
Graf 25: Celková energie zkoušky

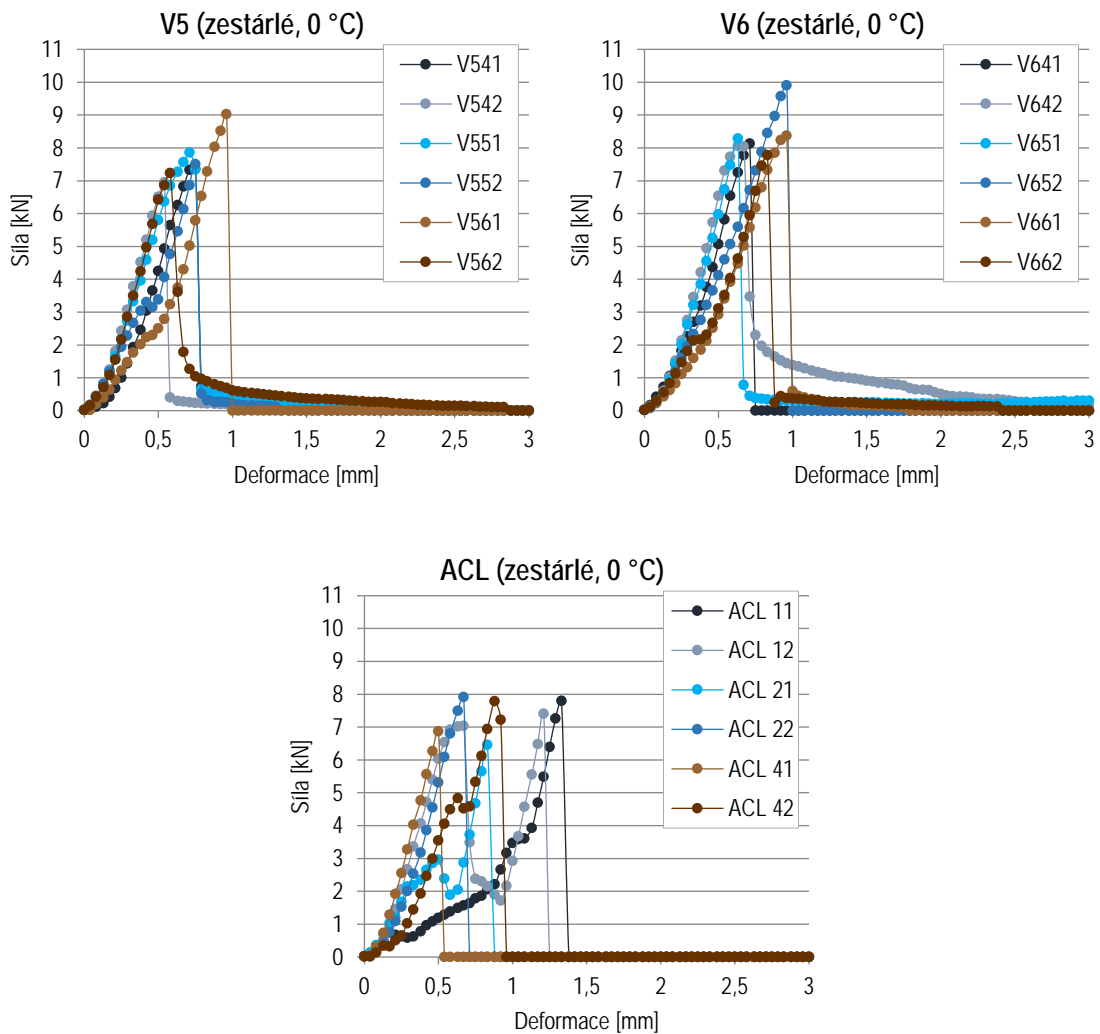
Pracovní diagramy všech těles všech směsí jsou vidět v následujících grafech. Zejména u zestárlých těles zkoušených při 0 °C je dobře vidět porušení křehkým lomem zmiňované výše.



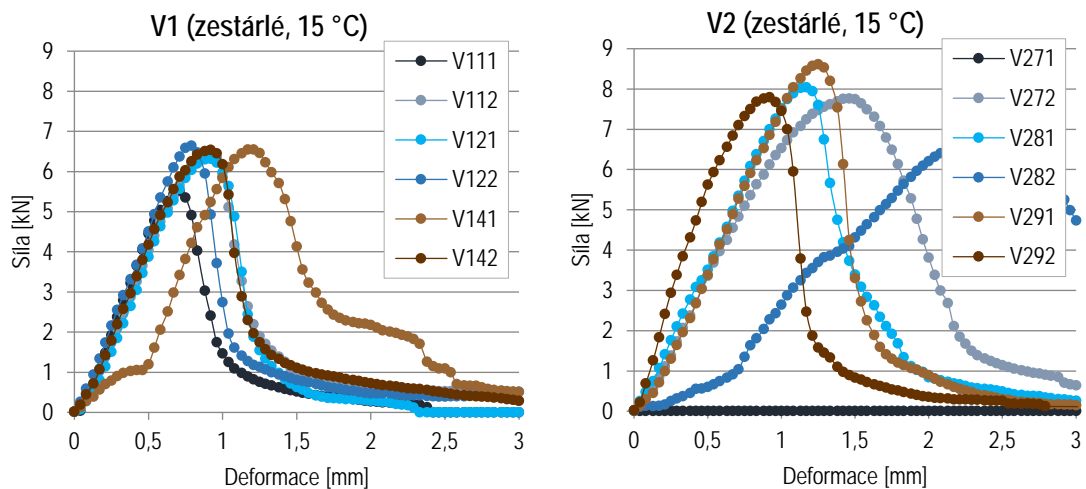


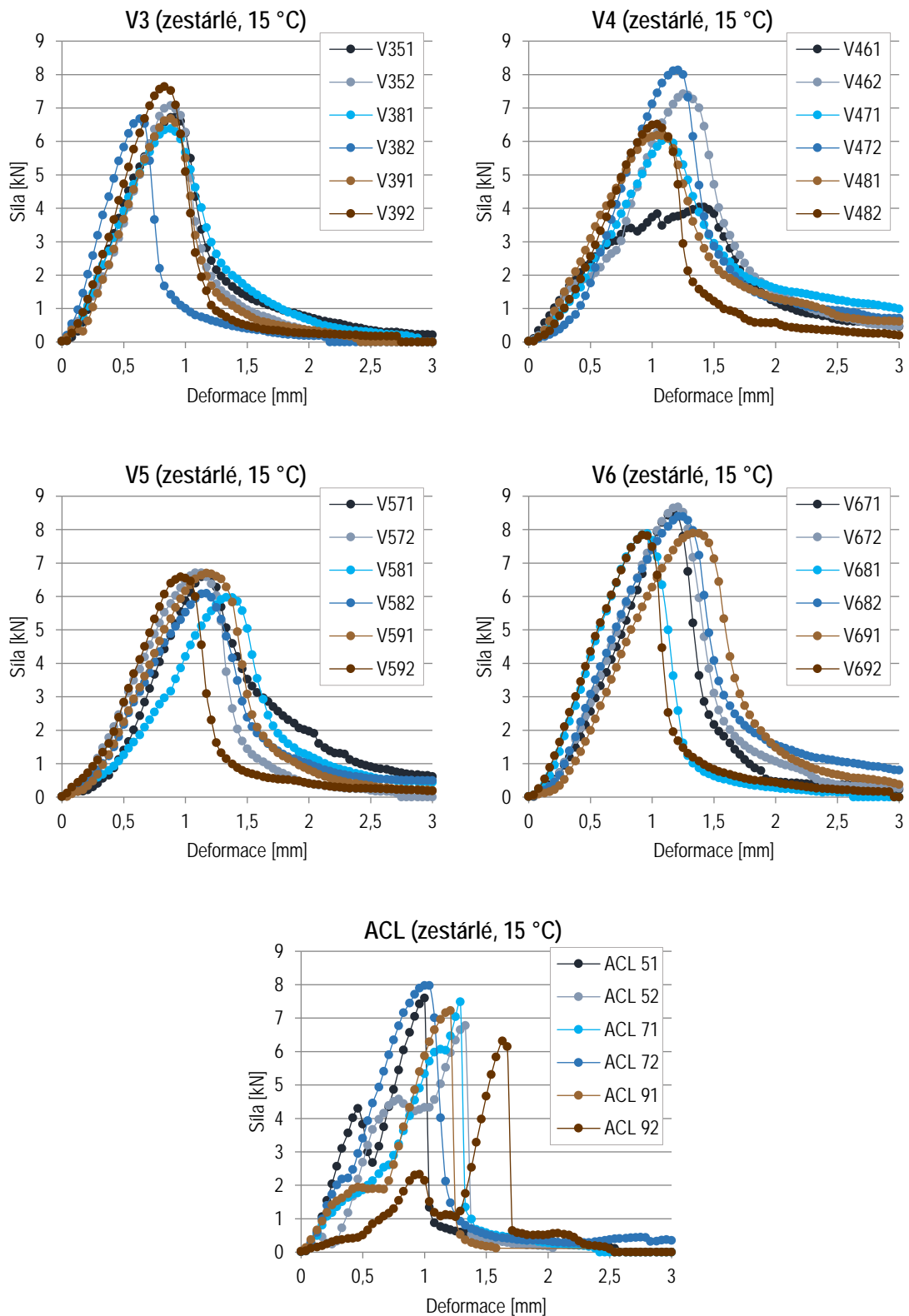
Graf 26: Pracovní diagramy všech variant směsi SMA (V1-V6) a ACL při 0 °C na nezestárlých tělesech





Graf 27: Pracovní diagramy všech variant směsi SMA (V1-V6) a ACL při 0 °C na zestárlých tělesech





Graf 28: Pracovní diagramy všech variant směsi SMA (V1-V6) a ACL při 15 °C na zestárlých tělesech



6.4.4 Stanovení odolnosti proti trvalým deformacím

Zkouška stanovení odolnosti proti trvalým deformacím je zásadní, jelikož v konceptu vozovek s dlouhou životností je největší požadavek kladený na ložné vrstvy právě schopnost trvalým deformacím odolávat.

Důležitým parametrem je $d_{10\,000}$ jakožto hloubka vyjeté koleje po 10 000 zatěžovacích cyklech, WTS_{AIR} vyjadřující přírůstek hloubky vyjeté koleje na 1 000 zatěžovacích cyklů a PRD_{AIR} , což je hloubka vyjeté koleje po 5 000 zatěžovacích cyklech vyjádřená v procentech z celkové tloušťky desky. Všechny výše zmíněné parametry byly vypočítány zprůměrováním hodnot naměřených na dvou zkušebních deskách. Protokoly včetně grafu zobrazující průběh této zkoušky lze nalézt v příloze, označené jako grafy 38 až 44

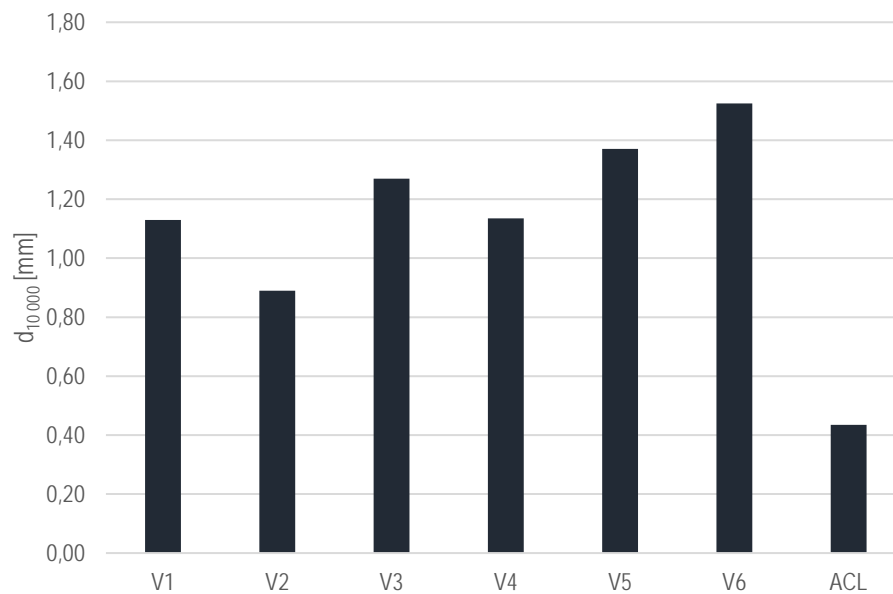
Zdaleka nejlépe si v tomto ohledu vedla varianta V2, u které hloubka vyjeté koleje po 10 000 zatěžovacích cyklech nepřesáhla ani jeden milimetr. Po zprůměrování zde vyšla hloubka vyjeté koleje $d_{10\,000}$ 0,89 mm. Tato směs obsahující polymerem modifikované asfaltové pojivo v režimu HiMA byla následována další směsí s PmB. Jedná se o variantu V1 s PmB, které ovšem v režimu HiMA není. Společně s V4 měla prakticky shodný výsledek (hodnota $d_{10\,000}$ 1,13 mm, resp. 1,14 mm), z čehož by se mohlo zdát, že vlákna FORTA-FI mají velmi mírně negativní vliv, nicméně vezmeme-li v úvahu hodnotu PRD_{AIR} , je jasně patrné, že vliv vláken FORTA-FI je u V4 přesně opačný – velmi mírně pozitivní vliv. Desky vyráběné v laboratoři totiž i přes důslednou výrobu nemají všechny požadovanou výšku přesně 60 mm, ale v řádu desetin milimetru se mohou lišit, což se v této hodnotě může nepatrně projevit. Hodnota PRD_{AIR} je počítána z hloubky koleje po 5 000 zatěžovacích cyklech, nicméně pokud by se počítala z hloubky koleje po 10 000 zatěžovacích cyklech, i zde je vychází V4 mírně lépe (1,91 % u V1 a 1,90 % u V4). Pro statisticky přesnější výsledky by však bylo nutné provést tuto zkoušku na více vzorcích od každé varianty. V těsném závěsu za variantami V1 a V4 lze najít variantu V3 s pojivem modifikovaným jemně mletou pryží (s naměřenou hodnotou $d_{10\,000}$ 1,27 mm), dále nízkoteplotní variantu V5, kdy zde použitá přísada Sasobit REDUX měla za následek zvětšení hloubky vyjeté koleje o 21 % (1,37 mm). Varianta V6 s R-materiálem a vyšším množstvím pojiva měla oproti V2, ve které bylo použité stejné pojivo, na konci zkoušky vyjetou kolej hlubší o 71 %. Referenční směs ACL 16 S měla v této zkoušce jasně navrch, díky poloviční hloubce vyjeté koleje po 10 000 zatěžovacích cyklech oproti nejlepší variantě V2.

ČSN EN 13108-1 [16] požaduje pro směsi typu ACL 16 S maximální poměrnou hloubku vyjeté koleje PRD_{AIR} 3,0 %, což referenční směs s přehledem splnila, německý předpis H AI ABi (2015) [20] udává u směsi SMA L 16 S požadavek na 5,0 %. Na první pohled benevolentnější požadavek je dán jinou zkušební normou, která požaduje zkušební zařízení s ocelovým kolem, které způsobuje zkušebním tělesům při jinak stejných zkušebních podmínkách větší deformace. ČSN EN 13108-5 [18] má pro směsi SMA se zvýšenou odolností proti trvalým deformacím také požadavek na maximální hodnotu PRD_{AIR} 5,0 %, ale zde se jedná o směsi pro obrusné vrstvy. Při posouzení výsledků směsi SMA L 16 S podle hodnot požadovaných pro směsi typu ACL S lze konstatovat, že v této zásadní zkoušce podle tohoto měřítka vyhoví všechny varianty.

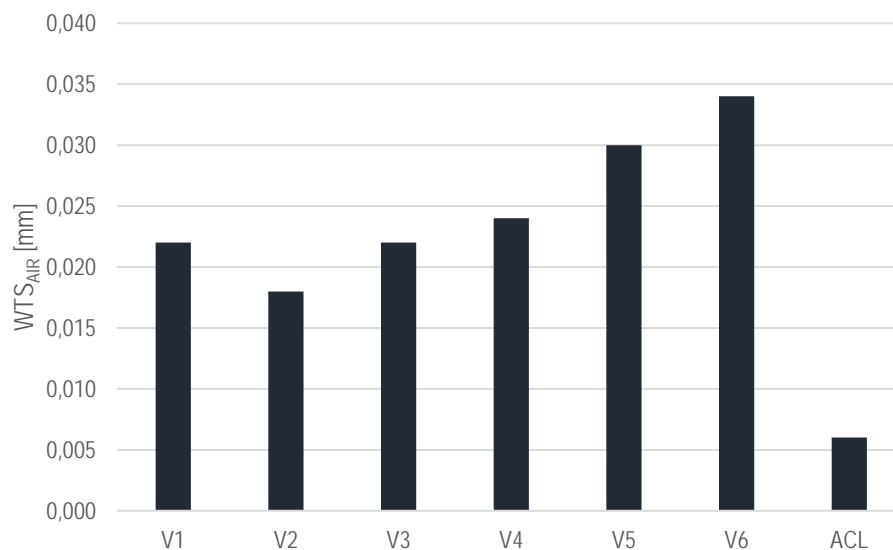


Tabulka 28: Souhrn výsledků zkoušky stanovení odolnosti proti trvalým deformacím

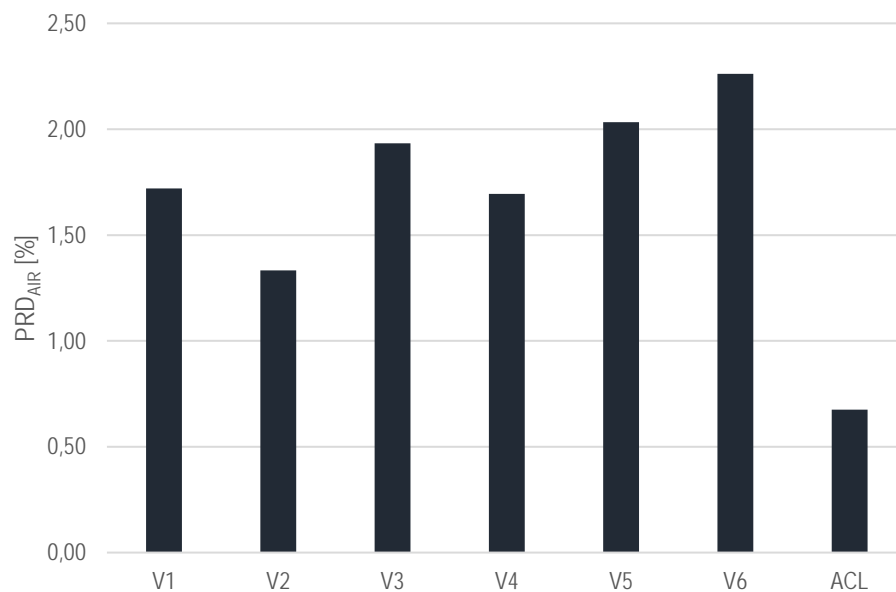
	$d_{10\,000}$ [mm]	WTS_{AIR} [mm]	PRD_{AIR} [%]
V1	1,13	0,022	1,72
V2	0,89	0,018	1,33
V3	1,27	0,022	1,93
V4	1,14	0,024	1,69
V5	1,37	0,030	2,03
V6	1,53	0,034	2,26
ACL	0,44	0,006	0,68



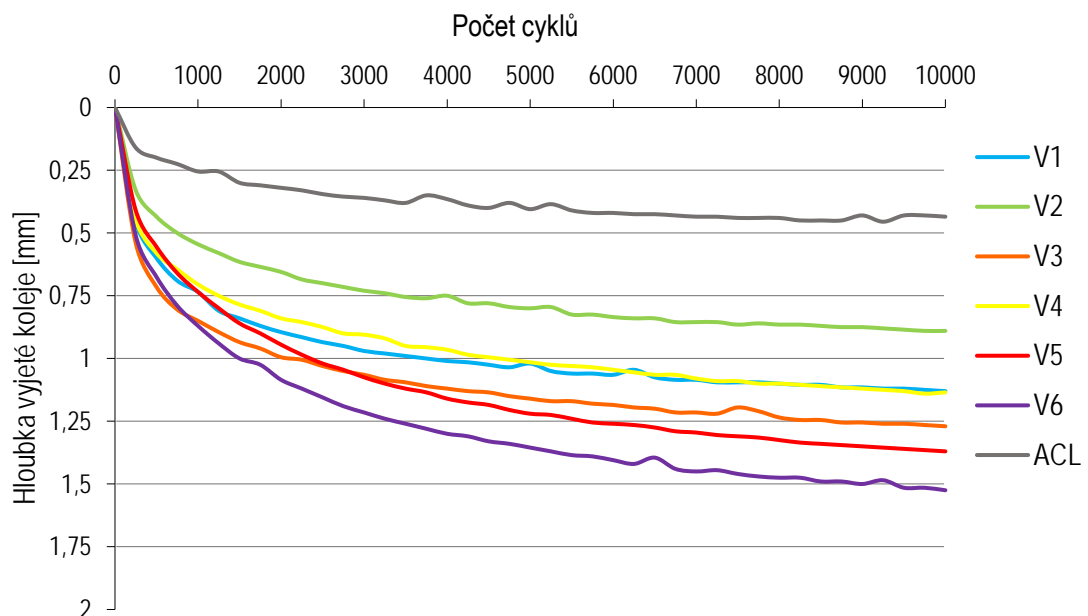
Graf 29: Hloubka vyjeté koleje po 10 000 zatěžovacích cyklech



Graf 30: Přrůstek hloubky vyjeté koleje na 1 000 zatěžovacích cyklů



Graf 31: Poměrná hloubka vyjeté koleje po 5 000 zatěžovacích cyklech



Graf 32: Průběh zkoušky stanovení odolnosti proti trvalým deformacím

6.4.5 Tah za ohybu

Trámečky nařezané z desek byly podrobeny zkoušce tahu za ohybu při 0 °C a -10 °C, u obou teplot byla zkoušena tělesa nezestárlá i zestárlá, nicméně u této zkoušky bylo zkušebních těles málo, což se negativně projevilo na vypovídací hodnotě zkoušky. Po každou teplotu byly od každého stavu tělesa nezestárlé/zestárlé k dispozici pouze dvě tělesa. U některých měření byly problémy s funkčností



dataloggeru, který neodečítal správně závislost síly na deformaci a z tohoto důvodu chybí pracovní diagramy některých těles.

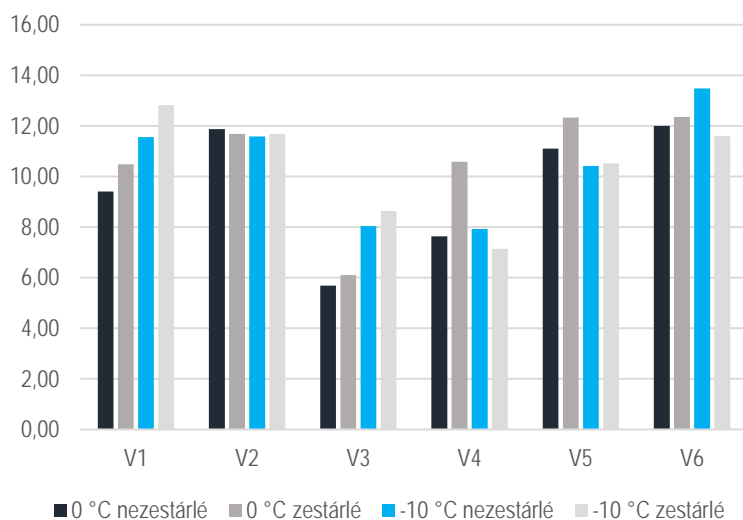
V tabulce 30 a grafu 33 je na první pohled jasně vidět, že jasně nejhorších výsledků ze zkoušených variant dosáhla V3, která obsahovala pojivo 50/70 modifikované jemně mletou pryží. Překvapivě špatným výsledkem zarazila V4 vycházející z varianty V1. Tato varianta oproti výchozí variantě obsahuje vlákna FORTA-FI, která by při této zkoušce měla pomoci, případně by neměla mít vliv žádný. Při teplotě 0 °C bylo zaznamenáno zhoršení o 19 % oproti V1 na nezestárých tělesech, naopak na zestárých tělesech byly naměřeny výsledky prakticky stejné jako u V1. Nicméně při teplotě -10 °C bylo zhoršení na nezestárých a zestárých tělesech znatelnější – o 31 %, resp. 44 %. Takový rozptyl v naměřených hodnotách, zvláště jsou-li tyto hodnoty dost vzdálené od očekávaných výsledků, ukazuje na výše zmíněný problém nedostatku zkušebních těles, aby byla zkouška provedena na dostatečně velkém statistickém vzorku. Při porovnání variant V1 a V2 obsahujících různé druhy modifikovaného asfaltového pojiva ukazují, že při teplotě 0 °C dosahuje lepších výsledků pojivo HiMA obsažené ve variantě V2, avšak při teplotě -10 °C má PmB 25/55-60 z varianty V1 vlastnosti již srovnatelné. Přísada Sasobit REDUX měla pozitivní vliv na výsledky zkoušky při 0 °C, avšak při -10 °C zaznamenala oproti výchozí variantě V1 o něco horší výsledky. Ve variantě V6, která obsahovala taktéž pojivo HiMA stejně jako u varianty V2, došlo vzhledem k vyššímu obsahu pojiva k dalšímu zlepšení výsledků, zejména při -10 °C. Zkoušce tahu za ohybu byly podrobeny pouze všechny varianty směsi SMA bez referenční směsi ACL 16 S, jelikož trámečky této směsi byly v laboratoři využity v rámci jiného projektu.

Německý předpis H AI ABi (2015) [20] nemá na pevnost v tahu za ohybu žádné požadavky, určitou minimální hodnotu u této zkoušky požaduje TP 151 [17] pro směsi VMT, při 0 °C požaduje minimálně 6,00 MPa, což kromě varianty V3 s pojivem 50/70 modifikovaným jemně mletou pryží splnily všechny varianty.



Tabulka 29: Pevnost v tahu za ohybu

Varianta	Pevnost v tahu za ohybu [MPa]				Index stárnutí AI [%]	
	0 °C		-10 °C		0 °C	-10 °C
	nezestárlé	zestárlé	nezestárlé	zestárlé		
V1	9,40	10,49	11,55	12,83	112%	111%
V2	11,87	11,68	11,58	11,69	98%	101%
V3	5,69	6,10	8,04	8,63	107%	107%
V4	7,64	10,58	7,93	7,15	139%	90%
V5	11,10	12,33	10,42	10,52	111%	101%
V6	12,01	12,36	13,49	11,59	103%	86%



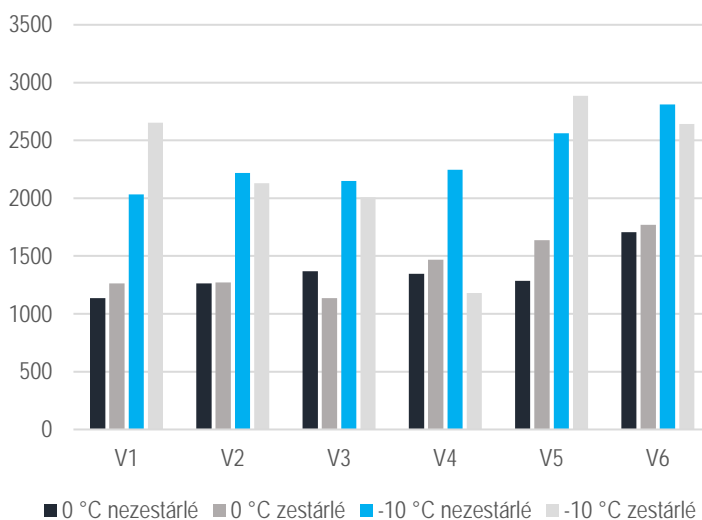
Graf 33: Pevnost v tahu za ohybu

Modul tuhosti v tahu za ohybu byl u všech variant směsi SMA vesměs srovnatelný, byť je zde vidět o něco lepších výsledků u varianty V5, kde lze zejména při -10 °C pozorovat ztužení směsi, ačkoli to mělo v tomto případě negativní vliv na pevnost v tahu za ohybu. U varianty V6 se ukázalo větší množství pojiva HiMA jako způsob jistého ztužení směsi. Stejně jako u pevnosti v tahu za ohybu přinesla varianta V4 s vlákny FORTA-FI zhoršení zkoušených parametrů, zde ovšem pouze na zestárlých tělesech při -10 °C, což lze přisuzovat neadekvátní velikosti statistického vzorku.



Tabulka 30: Modul tuhosti v tahu za ohybu

Varianta	Modul tuhosti v tahu za ohybu [MPa]				Index stárnutí AI [%]	
	0 °C	0 °C	-10 °C	-10 °C	0 °C	-10 °C
	nezestárlé	zestárlé	nezestárlé	zestárlé		
V1	1136	1264	2033	2654	111%	131%
V2	1262	1271	2219	2131	101%	96%
V3	1367	1137	2149	2007	83%	93%
V4	1345	1467	2247	1181	109%	53%
V5	1286	1637	2561	2885	127%	113%
V6	1706	1771	2810	2642	104%	94%



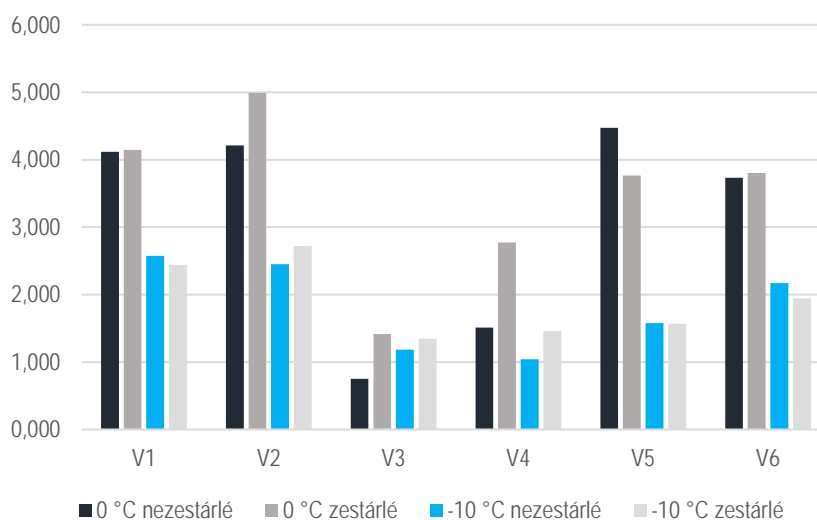
Graf 34: Modul tuhosti v tahu za ohybu

Při pohledu na energii potřebnou pro dosažení maximální síly a tedy porušení vzorku je jasně vidět, že V3 s pojivem 50/70 modifikovaným jemně mletou pryží lze porušit oproti zbylým variantám velmi snadno a s vyvinutím značně nižší energie. V případě nezestárlých těles zkoušených při 0 °C se jedná o snížení energie nutné pro porušení tělesa o 82 %. Podobný jev lze z tabulky 32 a grafu 35 vyčíst i pro V4 s vlákny FORTA-FI, nicméně stejně jako u pevnosti v tahu za ohybu ani zde není důvod pro špatné výsledky této varianty, které jsou velmi odlišné od výchozí varianty V1. U těchto dvou variant je navíc v tabulce 32 vidět i naprosto odlišné a téměř nereálné indexy stárnutí porovnávající výsledky zjištěné u zestárlých těles a u nezestárlých těles. Zde je to dáno výše zmíněnými problémy s funkcí dataloggeru, když nezaznamenával správně velikost deformace v průběhu zkoušky a zkreslil tak tím pracovní diagramy některých zkušebních těles.



Tabulka 31: Energie zkoušky do maximální síly

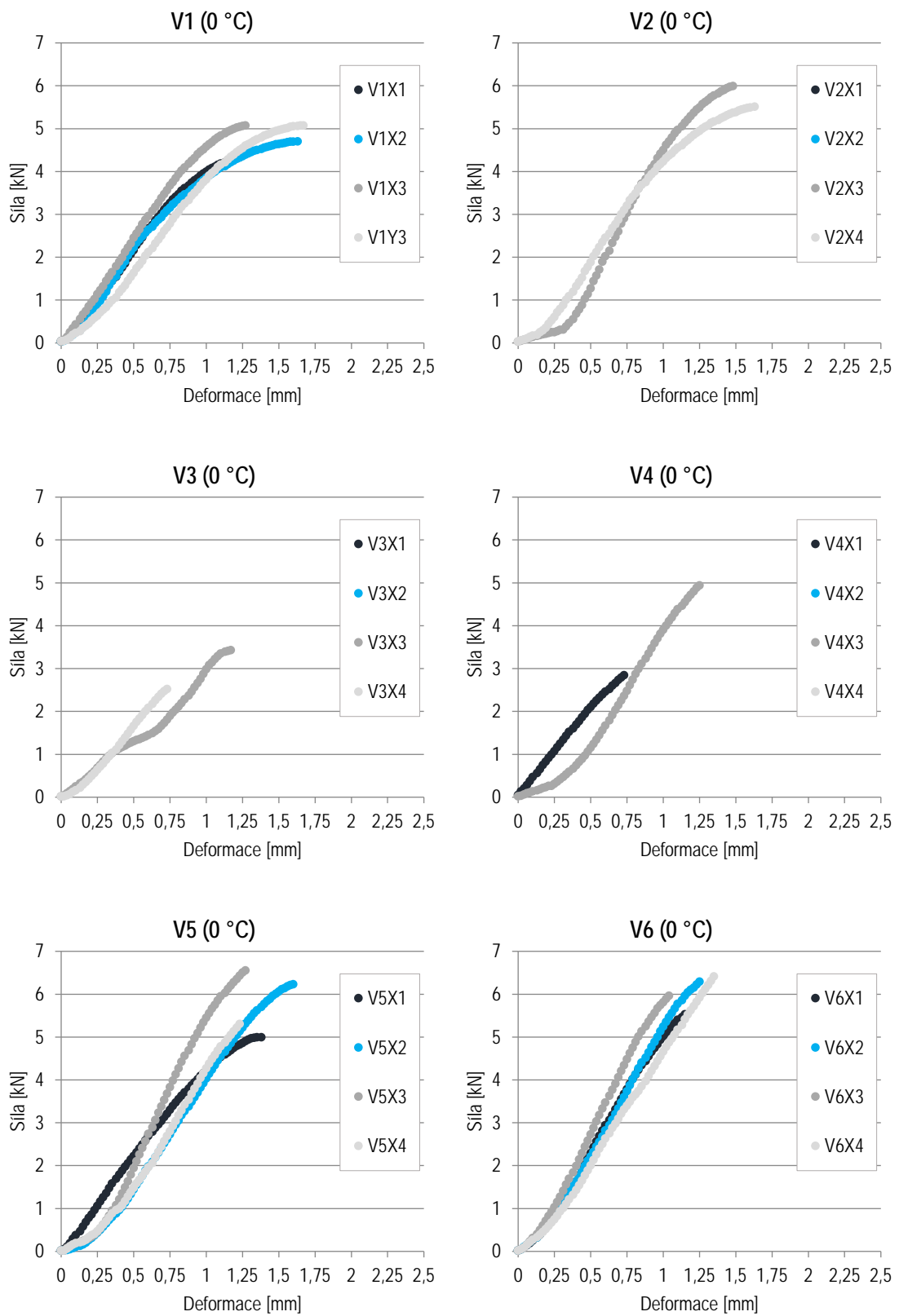
Varianta	Energie do maximální hodnoty [J]				Index stárnutí AI [%]	
	0 °C		-10 °C		0 °C	-10 °C
	nezestárlé	zestárlé	nezestárlé	zestárlé		
V1	4,118	4,143	2,574	2,439	101%	95%
V2	4,214	4,991	2,449	2,722	118%	111%
V3	0,753	1,418	1,184	1,343	188%	113%
V4	1,512	2,775	1,041	1,459	183%	140%
V5	4,471	3,767	1,578	1,565	84%	99%
V6	3,730	3,805	2,169	1,944	102%	90%



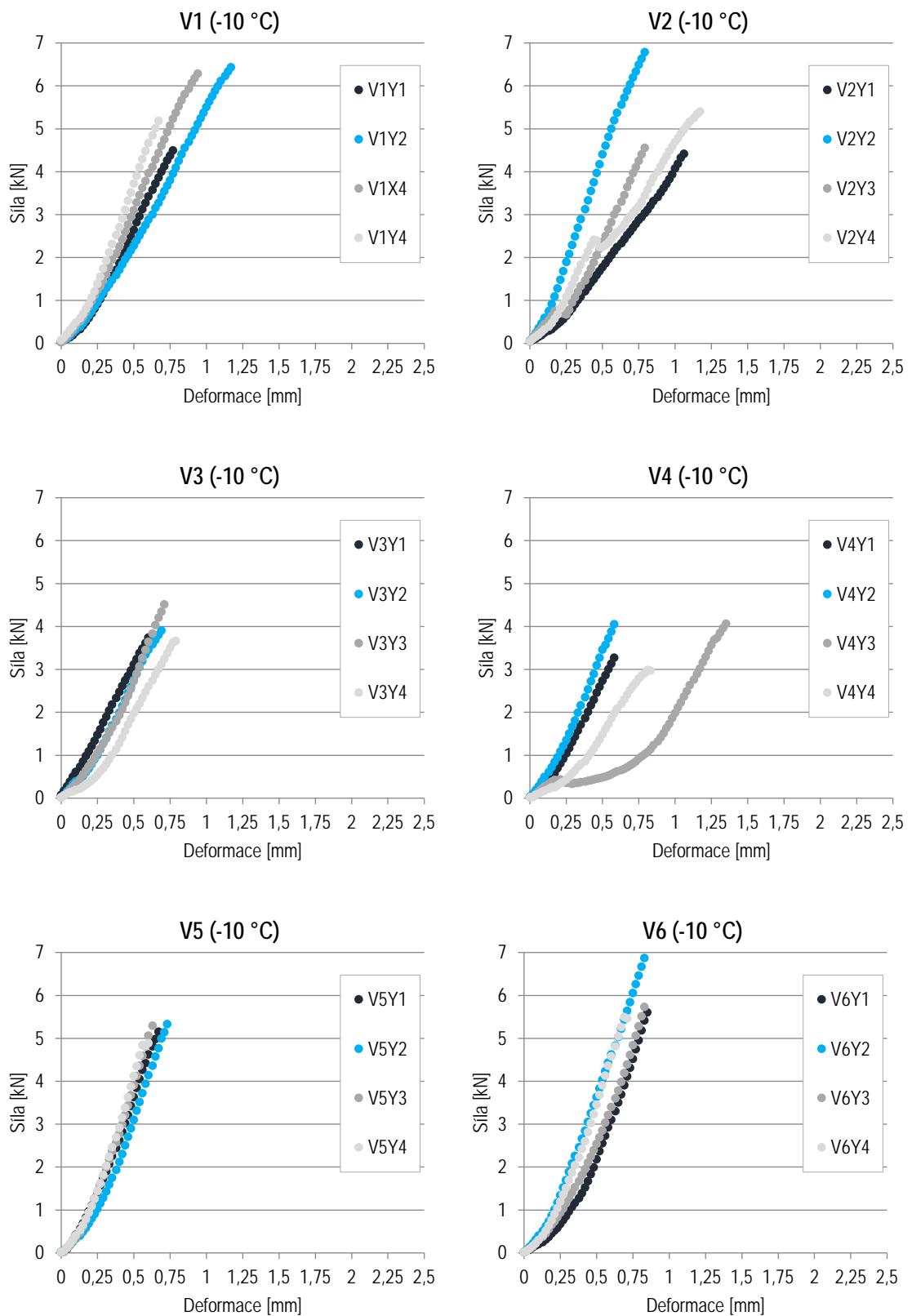
Graf 35: Energie zkoušky do maximální síly

V grafu 36 nejsou u variant V2, V3 a V4 vykresleny z důvodu problému s funkčností datalooggeru pracovní diagramy u těles V2X1 a V2X2 (nezestárlá tělesa, 0 °C), V3X1 a V3X2 (nezestárlá tělesa, 0 °C) a V4X2 (nezestárlé těleso, 0 °C). Jako poslední chybí ještě pracovní diagram tělesa V4X4 (zestárlé těleso, 0 °C), jelikož toto těleso bylo poškozeno před provedením zkoušky a jeho nižší pevnost by měla negativní vliv na již tak nízkou vypovídací hodnotu zkoušky u této varianty.

V grafu 37 zobrazující pracovní diagramy variant směsi SMA při zkoušení tahu za ohybu při -10 °C je dobře vidět strmější nárůst než během zkoušení při 0 °C. Je to z toho důvodu, že s klesající teplotou má směr stále nižší elasticitu a deformace jsou mnohem nižší. Tento fakt je dobře vidět i v předchozím grafu znázorňujícím velikost energie potřebnou k porušení tělesa při maximální síle. Tato energie je počítána jako plocha pod křivkou, proto je o mnohem nižší.



Graf 36: Pracovní diagramy všech variant směsi SMA (V1-V6) při 0 °C



Graf 37: Pracovní diagramy všech variant směsi SMA (V1-V6) při -10 °C



7 Závěr

Koncept vozovek s dlouhou životností nabízí velmi lákavé řešení kvality netuhých vozovek. Použitím vhodných a kvalitních materiálů do všech vrstev vozovky lze docílit mnohem delší návrhové životnosti než u konvenčních skladeb vozovky. Kvalitní materiály navýší počáteční investiční náklady, ale díky své trvanlivosti pomohou k mnohem nižším provozním nákladům na údržbu. Z toho vyplývají i méně časté a hlavně kratší uzavírky kvůli pracím na silnici, což snižuje spotřebu času uživatelů těchto komunikací.

V této práci byly shrnuty poznatky z realizace vozovek s dlouhou životností v zahraničí. V USA a ve Velké Británii přišli v minulosti na to, že zvětšení tloušťky asfaltových vrstev vede k vyšší životnosti. Na stávajících komunikacích lze tento poznatek uplatňovat, ale nejedná se o ekonomicky nejvíce vhodný způsob prodloužení životnosti netuhé vozovky. Vhodnější je navrhnout novou skladbu vozovky tak, aby každá vrstva plnila to, co se od ní požaduje. Tenká obrusná vrstva by měla mít dostatečné protismykové vlastnosti a další vhodné parametry, například nízkohlučné vlastnosti. Ložná vrstva dostatečné tloušťky by měla zajišťovat odolnost proti tvorbě trvalých deformací, podkladní vrstva by měla mít velmi dobré protiúnavové vlastnosti, aby nedocházelo k tvorbě únavových trhlin prostupujících celým asfaltovým souvrstvím, což později vede k dalším poruchám vozovky. Celá konstrukce vozovky by měla stát na dostatečně únosném podloží. Tímto způsobem se již v zahraničí začínají budovat některé komunikace, byl zde popsán například úsek polské rychlostní komunikace S8.

Během vlastního návrhu takové komunikace v programu Laymed nebylo přes veškerou snahu dosaženo subtilnější, avšak únosnější konstrukce vozovky, jako se to povedlo například u výše zmíněného úseku polské rychlostní komunikace S8. Je to dáno jednak rozdílnou návrhovou metodou a také tím, jak jsou nadefinovány jednotlivé materiály vstupující do výpočtu. Pro přesnější výpočet by bylo nutné znát detailně všechny parametry těchto materiálů.

V poslední části této práce byly zveřejněny výsledky návrhu, optimalizace a zkoušení směsi SMA L 16 S. Samotný návrh proběhl podle německých Pokynů pro plánování a provádění alternativních asfaltových ložných vrstev H Al ABi (2015), jelikož v Německu se tento typ asfaltové směsi určených do ložných vrstev již používá a české normy tuto směs nijak nedefinují. Následuje stručný popis prováděných následujících laboratorních zkoušek: stanovení modulu tuhosti v příčném tahu na válcových zkušebních tělesech (IT-CY), stanovení pevnosti v příčném tahu (ITS), stanovení odolnosti asfaltové směsi vůči vodě (ITSR), stanovení odolnosti asfaltové směsi proti účinkům mrazu, šíření trhliny zkouškou ohybem na půlválcovém zkušebním tělese, zkouška poježdění kolem a zkouška tahu za ohybu.

Z výsledků těchto zkoušek vyšlo najevo, že polymerem modifikovaný asfalt 40/60-75 v režimu HiMA dosáhl lepších výsledků než polymerem modifikovaný asfalt 25/55-60. Tato skutečnost se projevila zejména při zkoušce šíření únavové trhliny při 15 °C, kde bylo pro porušení zkušebních těles druhé varianty obsahující pojivo HiMA potřeba o 80 % více energie. Třetí varianta s pojivem 50/70 CRmB byla u většiny zkoušek těsně v závěsu za ostatními variantami, ale například u zkoušky v tahu za ohybu byla zřetelná



absence polymerem modifikovaného pojiva. Nežestálá tělesa při 0 °C totiž dosahovala pouze zhruba poloviční pevnosti v tahu za ohybu. U čtvrté varianty došlo díky použití vláken FORTA-FI ke zlepšení většiny sledovaných vlastností. Došlo například ke zvýšení modulů tuhosti či k zvýšení energie potřebné k porušení zkušební tělesa při zkoušce šíření únavové trhliny na zestárých tělesech při 15 °C. Velmi výrazně vzrostla díky použití vláken odolnost asfaltové směsi vůči účinkům vody. Například na velikost trvalých deformací ale nemělo použití těchto vláken žádný vliv. U páté, nízkoteplotní varianty došlo při použití přísady Sasobit REDUX ke zhoršení téměř všech sledovaných vlastností, nicméně ve většině případů šlo pouze o nepatrné zhoršení v řádu jednotek procent. Výrazný kvalitativní posun byl zaznamenán stejně jako u předchozí varianty u stanovení odolnosti asfaltové směsi vůči účinkům vody. Lepší obalení kameniva asfaltovým pojivem díky přísadě Sasobit REDUX učinilo tuto variantu mnohem méně náchylnou k účinkům vody, což se projevilo na velmi vysoké hodnotě ITSR 95,8 %. Dobré výsledky této nízkoteplotní směsi nijak neomezily její potenciál použití ve vozovkách budovaných podle konceptu vozovek s dlouhou životností. Poslední varianta navrhované směsi SMA obsahovala 30 % R-materiálu a díky konzervativnímu návrhu o něco větší množství asfaltového pojiva než u předchozích variant. Bylo zde použité pojivo v režimu HiMA. Tato skutečnost se velmi pozitivně projevila u výsledků pevnosti v příčném tahu a u výsledků stanovení odolnosti asfaltové směsi vůči účinkům vody a mrazu. Použití R-materiálu nijak výrazně nezhoršilo žádnou sledovanou vlastnost s výjimkou poměrné hloubky koleje, kde i přesto tato varianta splnila požadavek ČSN EN 13108-1, která se sice týká asfaltových betonů, ale jako jediný předpis použitý pro posouzení výsledků v této práci obsahoval požadavky na velikost poměrné hloubky vyjeté koleje pro směsi se zvýšenou odolností proti tvorbě trvalých deformací. Samotné zhoršení ovšem jde na vrub spíše většímu množství pojiva než použití R-materiálu. Bylo tak prokázáno, že použití R-materiálu ve směsi SMA L 16 S je možné i ve větším množství.

Pro dosažení co nejlepších výsledků by bylo možné zkombinovat několik výše popsanych variant, například by bylo zajímavé vyzkoušet nízkoteplotní variantu s pojivem v režimu HiMA a s vyšším obsahem R-materiálu, která by pro zlepšení některých vlastností mohla být ještě vyztužena vlákny FORTA-FI.

Uvedení konceptu vozovek s dlouhou životností do České republiky již nestojí v cestě absence vhodných materiálů, nyní je řada na projektantech a příslušných investorech, aby se zasadili o rozvoj této technologie i v České republice a pomohli tak kvalitní dopravní infrastrukturou k lepším zítřkům.



8 Bibliografie

1. **European Asphalt Pavement Association.** Sustainable roads – Long-Life Asphalt Pavements. *Version for "bankers"*. 2007.
2. **European Asphalt Pavement Association.** Long-Life Asphalt Pavements. *Technical version*. 2007.
3. **Maher, M. L. J. a Uzarowski, L.** *From Theory to Practice: Rich Bottom Layer Design*.
4. **Newcomb, David E., Willis, Richard a Timm, David H.** *Perpetual Asphalt Pavements - A Synthesis*.
5. **Newcomb, David E., Buncher, Mark a Huddleston, Ira J.** Concepts of Perpetual Pavements. *Transportation Research Circular, Number 503*. 2001.
6. **Newcomb, Dave a Timm, Dave.** Michigan Asphalt Conference. *Perpetual Pavement Design An Introduction to the PerRoad Program*. 2016.
7. **Stoklásek, Svatopluk.** Zpravodaj SILNICE MOSTY 2/2014. *Základní principy návrhu asfaltových vozovek s velmi dlouhou životností (tzv. "trvalých vozovek") - část 1*. 2014.
8. **Navarro, Carlos Solis.** *Long-life Asphalt Pavements*. 2013.
9. **National Programme on Technology Enhanced Learning.** Lecture : Pavement Materials. *Analysis and design of concrete pavements*. [Online] [Citace: 23. 11 2017.] <http://nptel.ac.in/courses/105104098/TransportationII/lecture3/3-4-rich-bottom-bituminous.htm>.
10. **Stoklásek, Svatopluk.** Zpravodaj SILNICE MOSTY 3/2014. *Základní principy návrhu asfaltových vozovek s velmi dlouhou životností (tzv. "trvalých vozovek") - část 2*. 2014.
11. **Ferne, Brian a kolektiv.** ELLPAG Phase 1: A Guide to the Use of Long-Life Fully- Flexible Pavements. 2004.
12. **Manufactured Sand.** *Taurian Engineering*. [Online] [Citace: 24. 10 2017.] <http://www.taurianengg.com/images/services/Manufactured%20Sand/2.jpg>.
13. **TP 170.** *Navrhování vozovek pozemních komunikací*. 2004.
14. **Zborowski, Aleksander a kolektiv.** Konference Asfaltové vozovky '17. *Koncepce "věčných" asfaltových vozovek - nová úroveň ve vývoji teorie netuhých vozovek*. 2017.
15. *Technické kvalitativní podmínky staveb pozemních komunikací, Kapitola 7 Hutněné asfaltové vrstvy*. Duben 2008.
16. **ČSN EN 13108-1.** *Asfaltové směsi – Specifikace pro materiály – Část 1: Asfaltový beton*. 2008.
17. **TP 151.** *Asfaltové směsi s vysokým modulem tuhosti (VMT)*. 2001.
18. **ČSN EN 13108-5.** *Asfaltové směsi - Specifikace pro materiály - Část 5: Asfaltový koberec mastixový*. 2008.
19. **Hýzl, Petr.** Praktické aplikace v pozemních komunikacích. *Modul 6: Asfaltové směsi*.



20. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen Arbeitsgruppe Asphaltbauweisen. *Hinweise für die Planung und Ausführung von alternativen Asphaltbinderschichten H AI ABI*. 2015.
21. **Zajíček, Jan**. Technologie stavby vozovek - Poruchy a opravy vozovek (SENS 11). *Úvod do navrhování vozovek*. 2016.
22. TP 225. *Prognóza intenzit automobilové dopravy (II. vydání)*. 2012.
23. Sčítání dopravy. *Celostátní sčítání dopravy 2016*. [Online] Ředitelství silnic a dálnic ČR. [Citace: 5. 12 2017.] <http://scitani2016.rsd.cz>.
24. ČSN EN 933-1. *Zkoušení geometrických vlastností kameniva - Část 1: Stanovení zmitosti - Sítový rozbor*. 2012.
25. TP 109, Změna č. 1. *Asfaltové hutněné vrstvy se zvýšenou odolností proti tvorbě trvalých deformací*. 2000.
26. Silniční vlákna – S-CEL 7 G®. *CIUR a.s.* [Online] [Citace: 11. 10 2017.] <http://www.ciur.cz/produkty/obsah/silnicni-vlakna-s-cel-7-g>.
27. **Zajíček, Jan a kolektiv**. *Technologie stavby vozovek*. Praha : Informační centrum ČKAIT, 2015. ISBN 978-80-87438-59-6.
28. **Plítz, Jiří**. *Využití odpadní mleté gumy do protihlukových asfaltových krytů*. 2013.
29. Aktivní gumový prach. *Lavaris s.r.o.* [Online] [Citace: 28. 10 2017.] <http://www.lavaris.cz/aktivni-gumovy-prach-agp.html?lang=cs>.
30. **Žalman, Lubomír, Špaček, Petr a Mondschein, Petr**. *Možnosti aplikace vláken FORTA FI ve směsi typu ACO jako příměsi pro zlepšení životnosti asfaltové úpravy*. 2013.
31. Sasol Performance Chemicals, Wax Division, Asphalt Additives. Sasobit REDUX. *Product information*.
32. **Valentin, Jan a kolektiv**. *Porovnání chování nízkoteplotních asfaltových směsí typu SMA*.
33. ČSN EN 12697-35. *Asfaltové směsi - Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka - Část 35: Laboratorní výroba směsi*. 2016.
34. ČSN EN 12697-30. *Asfaltové směsi - Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka - Část 30: Příprava zkušebních těles rázovým zhutňovačem*. 2012.
35. ČSN EN 12697-33+A1. *Asfaltové směsi - Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka - Část 33: Příprava zkušebních těles zhutňovačem desek*. 2008.
36. PrEN 12697-52. *Bituminous mixtures – test methods – Part 52: Conditioning address oxidative ageing*. 2014.
37. ČSN EN 12697-26. *Asfaltové směsi – Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka – Část 26: Tuhost*. 2012.
38. ČSN EN 12697-23. *Asfaltové směsi - Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka - Část 23: Stanovení pevnosti v příčném tahu*. 2005.



39. ČSN EN 12697-12. *Asfaltové směsi – Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka – Část 12: Stanovení odolnosti zkušebního tělesa vůči vodě*. 2009.
40. AASHTO T 283. *Resistance of compacted asphalt mixtures to moisture-induced damage*. 2008.
41. ČSN EN 12697-44. *Asfaltové směsi - Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka - Část 44: Šíření trhliny zkouškou ohybem na půlválcovém zkušebním tělese*. 2011.
42. ČSN EN 12697-22+A1. *Asfaltové směsi – Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka – Část 22: Zkouška poježdění kolem*. 2007.

9 Seznam tabulek

Tabulka 1: Požadované minimální moduly přetvárnosti na pláni vozovky v závislosti na druhu zeminy a zlepšení podloží vozovky (aktivní zóně) [13].....	21
Tabulka 2: Příklady vhodných způsobů údržby na základě poznatků z Nizozemí [11]	27
Tabulka 3: Trvanlivost obrusných vrstev na dálnicích nebo silnicích s vysokými intenzitami provozu [2]..	28
Tabulka 4: Trvanlivost obrusných vrstev na méně zatížených komunikacích [2]	28
Tabulka 5: Obory zrnitosti jednotlivých směsí dle příslušných předpisů [16] [17] [20] [18].....	37
Tabulka 6: Další vybrané požadavky na jednotlivé směsi [16] [17] [20] [18]	39
Tabulka 7: Návrhové úrovně porušení vozovky [13]	40
Tabulka 8: Třídy dopravního zatížení [13].....	40
Tabulka 9: Nejmenší přípustná tloušťka vrstev z nenamrzavých materiálů [13]	41
Tabulka 10: Parametry směsí použitých pro posouzení.....	44
Tabulka 11: Posouzení skladby vozovky D0-N-1-S-PI a variant z ní vycházejících.....	45
Tabulka 12: Posouzení skladby vozovky D0-N-3-S-PI a variant z ní vycházejících.....	46
Tabulka 13: Složení navržené směsi	48
Tabulka 14: Obory zrnitosti SMA 16 a součtová čára propadů [20] [18]	48
Tabulka 15: Složení směsi kameniva zkušebních záměsí	49
Tabulka 16: Součtové čáry propadů zkušebních záměsí a obor zrnitosti	49
Tabulka 17: Závislost VMA a V_m na HDK u jednotlivých záměsí.....	50
Tabulka 18: Složení směsi kameniva pro varianty V1 až V5.....	52
Tabulka 19: Obory zrnitosti SMA L 16 S a součtová čára propadů směsi kameniva pro varianty V1 až V5	52
Tabulka 20: Složení směsi kameniva pro variantu V6.....	54
Tabulka 21: Obory zrnitosti SMA L 16 S a porovnání součtových čar propadů směsí kameniva pro varianty V1 až V5 a V6	55
Tabulka 22: Doba míchání asfaltové směsi v laboratoři [29].....	61



Tabulka 24: Shrnutí výsledků modulů tuhosti nezestárých těles včetně teplotní citlivosti směsi.....	71
Tabulka 25: Porovnání modulů tuhosti měřených při 15 °C na nezestárých a zestárých tělesech včetně indexu stárnutí.....	73
Tabulka 26: Souhrn výsledků ze zkoušky stanovení pevnosti v příčném tahu.....	75
Tabulka 27: Shrnutí výsledků ITSR a ITSRf všech variant.....	78
Tabulka 28: Souhrn výsledků ze zkoušky šíření trhliny zkouškou ohybem na půlválcovém zkušebním tělese.....	81
Tabulka 29: Souhrn výsledků zkoušky stanovení odolnosti proti trvalým deformacím.....	91
Tabulka 30: Pevnost v tahu za ohybu.....	94
Tabulka 31: Modul tuhosti v tahu za ohybu.....	95
Tabulka 32: Energie zkoušky do maximální síly.....	96
Tabulka 33: Propady a zbytky na jednoitlivých sítích všech dostupných frakcí kameniva.....	109
Tabulka 34: Rozměry Marshallových těles hutněných 2×50 údery (optimalizace směsi SMA L 16 S)	110
Tabulka 35: Optimalizace směsi SMA L 16 S.....	111
Tabulka 36: Stanovení maximální objemové hmotnosti směsi SMA L 16 S.....	112
Tabulka 37: Rozměry Marshallových těles hutněných 2×50 údery (V1, V2, V3).....	113
Tabulka 38: Rozměry Marshallových těles hutněných 2×50 údery (V4, V5, V6).....	114
Tabulka 39: Rozměry Marshallových těles hutněných 2×75 údery (ACL 16 S).....	115
Tabulka 40: Objemová hmotnost, mezerovitost a mezerovitost směsi kameniva u variant V1, V2 a V3 (Marshallova tělesa).....	116
Tabulka 41: Objemová hmotnost, mezerovitost a mezerovitost směsi kameniva u variant V4, V5 a V6 (Marshallova tělesa).....	117
Tabulka 42: Objemová hmotnost, mezerovitost a mezerovitost směsi kameniva u referenční směsi ACL 16S (Marshallova tělesa).....	118
Tabulka 43: Rozměry Marshallových těles hutněných 2×25 údery (V1, V2, V3).....	119
Tabulka 44: Rozměry Marshallových těles hutněných 2×25 údery (V4, V5).....	120
Tabulka 45: Rozměry Marshallových těles hutněných 2×25 údery (V6, ACL 16 S).....	121
Tabulka 46: Objemová hmotnost Marshallových těles hutněných 2×25 údery (varianty V1, V2, V3 a V4).....	122
Tabulka 47: Objemová hmotnost Marshallových těles hutněných 2×25 údery (varianty V5 a V6, referenční směs ACL 16 S).....	123
Tabulka 48: Výsledky stanovení pevnosti v příčném tahu a stanovení odolnosti asfaltové směsi vůči vodě a proti účinkům mrazu (varianty V1, V2 a V3).....	124
Tabulka 49: Výsledky stanovení pevnosti v příčném tahu a stanovení odolnosti asfaltové směsi vůči vodě a proti účinkům mrazu (varianty V4 a V5).....	125



Tabulka 50: Výsledky stanovení pevnosti v příčném tahu a stanovení odolnosti asfaltové směsi vůči vodě a proti účinkům mrazu (varianta V6 a referenční směs ACL 16 S)	126
Tabulka 51: Moduly tuhosti na nezestárých tělesech při teplotách 0 °C, 15 °C, 27 °C a 40 °C (V1).....	127
Tabulka 52: Moduly tuhosti na nezestárých tělesech při teplotách 0 °C, 15 °C, 27 °C a 40 °C (V2).....	128
Tabulka 53: Moduly tuhosti na nezestárých tělesech při teplotách 0 °C, 15 °C, 27 °C a 40 °C (V3).....	129
Tabulka 54: Moduly tuhosti na nezestárých tělesech při teplotách 0 °C, 15 °C, 27 °C a 40 °C (V4).....	130
Tabulka 55: Moduly tuhosti na nezestárých tělesech při teplotách 0 °C, 15 °C, 27 °C a 40 °C (V5).....	131
Tabulka 56: Moduly tuhosti na nezestárých tělesech při teplotách 0 °C, 15 °C, 27 °C a 40 °C (V6).....	132
Tabulka 57: Moduly tuhosti na nezestárých tělesech při teplotách 0 °C, 15 °C, 27 °C a 40 °C (ACL 16 S)	133
Tabulka 58: Moduly tuhosti na zestárých tělesech při teplotě 15 °C (varianty V1, V2, V3 a V4).....	134
Tabulka 59: Moduly tuhosti na zestárých tělesech při teplotě 15 °C (varianty V5 a V6, referenční směs ACL 16 S).....	135
Tabulka 60: Rozměry těles pro zkoušku šíření trhliny ohybem (0 °C, nezestárlé).....	136
Tabulka 61: Výsledky zkoušky šíření trhliny (0 °C, nezestárlé; V1, V2, V3, V4) – 1/2	137
Tabulka 62: Výsledky zkoušky šíření trhliny (0 °C, nezestárlé; V1, V2, V3, V4) – 2/2	138
Tabulka 63: Výsledky zkoušky šíření trhliny (0 °C, nezestárlé; V5, V6, ACL 16 S) – 1/2	139
Tabulka 64: Výsledky zkoušky šíření trhliny (0 °C, nezestárlé; V5, V6, ACL 16 S) – 2/2	140
Tabulka 65: Rozměry těles pro zkoušku šíření trhliny ohybem (0 °C, zestárlé).....	141
Tabulka 66: Výsledky zkoušky šíření trhliny (0 °C, zestárlé; V1, V2, V3, V4) – 1/2	142
Tabulka 67: Výsledky zkoušky šíření trhliny (0 °C, zestárlé; V1, V2, V3, V4) – 2/2	143
Tabulka 68: Výsledky zkoušky šíření trhliny (0 °C, zestárlé; V5, V6, ACL 16 S) – 1/2	144
Tabulka 69: Výsledky zkoušky šíření trhliny (0 °C, zestárlé; V5, V6, ACL 16 S) – 2/2	145
Tabulka 70: Rozměry těles pro zkoušku šíření trhliny ohybem (15 °C, zestárlé).....	146
Tabulka 71: Výsledky zkoušky šíření trhliny (15 °C, zestárlé; V1, V2, V3, V4) – 1/2	147
Tabulka 72: Výsledky zkoušky šíření trhliny (15 °C, zestárlé; V1, V2, V3, V4) – 2/2	148
Tabulka 73: Výsledky zkoušky šíření trhliny (15 °C, zestárlé; V5, V6, ACL 16 S) – 1/2	149
Tabulka 74: Výsledky zkoušky šíření trhliny (15 °C, zestárlé; V5, V6, ACL 16 S) – 2/2	150
Tabulka 75: Rozměry trámečků (V1, V2 a V3).....	158
Tabulka 76: Rozměry trámečků (V4, V5 a V6).....	159
Tabulka 77: Výsledky zkoušky tah za ohybu (V1, V2 a V3) - 1/2	160
Tabulka 78: Výsledky zkoušky tah za ohybu (V1, V2 a V3) - 2/2	161
Tabulka 79: Výsledky zkoušky tah za ohybu (V4, V5 a V6) - 1/2	162
Tabulka 80: Výsledky zkoušky tah za ohybu (V4, V5 a V6) - 2/2	163



10 Seznam obrázků

Obrázek 1: Trvalé deformace ve všech vrstvách konstrukce vozovky [5]	12
Obrázek 2: Trvalé deformace pouze krytových vrstev [6]	12
Obrázek 3: Únavová trhлина "bottom-up" [5]	13
Obrázek 4: Schematické znázornění vlivu tloušťky na velikost přetvoření ve vozovce [7]	13
Obrázek 5: Trhлина "top-down" [8]	14
Obrázek 6: Princip únavového prahu [7]	15
Obrázek 7: Asfaltová vozovka typu "full-depth" [10]	17
Obrázek 8: Předrcený písek [12]	19
Obrázek 9: Skladba navržené "věčné" vozovky pro rychlostní komunikaci S8 a srovnání s tradiční asfaltovou vozovkou [14]	24
Obrázek 10: Směs SMA L 22 S za hladící lištou finišeru	34
Obrázek 11: Tloušťka vrstvy směsi SMA L 22 S před zhutněním	34
Obrázek 12: Hutnění směsi SMA L 22 S	35
Obrázek 13: Kontrola míry zhutnění	35
Obrázek 14: Směs SMA L 22 S po zhutnění	36
Obrázek 15: Ilustrační porovnání struktury směsi AC a SMA [2]	38
Obrázek 16: S-CEL 7G®	54
Obrázek 17: Vlákna FORTA-FI	58
Obrázek 18: Lamelový zhutňovač	62
Obrázek 19: Umístění tělesa v lisu při zkoušce stanovení pevnosti v příčném tahu [34]	64
Obrázek 20: Marshallovo těleso v zatěžovacím lisu při zkoušce stanovení pevnosti v příčném tahu	65
Obrázek 21: Půlválcové těleso v lisu, záznam zkoušky pomocí dataloggeru Almemo	67
Obrázek 22: Odzkoušené půlválcové těleso ACL 91	67
Obrázek 23: Odzkoušené půlválcové těleso V672	67
Obrázek 24: Malé zkušební zařízení	68
Obrázek 25: Trámeček při zkoušce v tahu za ohybu ve zkušebním zařízení	69

11 Seznam grafů

Graf 1: Trvanlivost obrusných vrstev na dálnicích nebo silnicích s vysokými intenzitami provozu [2]	28
Graf 2: Trvanlivost obrusných vrstev na méně zatížených komunikacích [2]	29
Graf 3: Podmínky možnosti modernizace vozovky na koncept LLP [11]	30
Graf 4: Obory zrnitosti jednotlivých směsí dle příslušných předpisů	38



Graf 5: Čáry zrnitosti dostupných frakcí kameniva	47
Graf 6: Mezerovitost V_m v závislosti na obsahu HDK	51
Graf 7: Mezerovitost směsi kameniva v závislosti na obsahu HDK.....	51
Graf 8: Čára zrnitosti směsi kameniva pro varianty V1 - V5	53
Graf 9: Porovnání čar zrnitosti s R-mat (V6) a bez něj (V1- V5)	55
Graf 10: Čára zrnitosti směsi kameniva pro směs ACL 16 S	60
Graf 11: Moduly tuhosti všech směsi při všech zkušebních teplotách	71
Graf 12: Teplotní citlivost jednotlivých směsí	72
Graf 13: Porovnání modulů tuhosti měřených při 15 °C na nezestárých a zestárých tělesech	73
Graf 14: Index stárnutí tuhosti jednotlivých směsí.....	74
Graf 15: Síla při porušení zkušebního tělesa všech variant	77
Graf 16: Pevnost v příčném tahu všech variant.....	77
Graf 17: Výsledky ITSR a ITSRf všech variant.....	78
Graf 18: Dosažené poměrné přetvoření všech variant.....	79
Graf 19: Modul pružnosti všech variant.....	80
Graf 20: Přetvoření $\varepsilon_{max,i}$	82
Graf 21: Napětí při porušení $\sigma_{max,i}$	82
Graf 22: Lomová houževnatost $K_{ic,i}$ [N/mm ^{3/2}] dle ČSN EN 12697-44 (2011)	83
Graf 23: Lomová houževnatost $K_{ic,i}$ [N/mm ^{3/2}] dle prEN 12697-44 (2016)	84
Graf 24: Energie do maximální hodnoty	85
Graf 25: Celková energie zkoušky	85
Graf 26: Pracovní diagramy všech variant směsi SMA (V1-V6) a ACL při 0 °C na nezestárých tělesech	87
Graf 27: Pracovní diagramy všech variant směsi SMA (V1-V6) a ACL při 0 °C na zestárých tělesech	88
Graf 28: Pracovní diagramy všech variant směsi SMA (V1-V6) a ACL při 15 °C na zestárých tělesech	89
Graf 29: Hloubka vyjeté koleje po 10 000 zatěžovacích cyklech.....	91
Graf 30: Přírůstek hloubky vyjeté koleje na 1 000 zatěžovacích cyklů.....	91
Graf 31: Poměrná hloubka vyjeté koleje po 5 000 zatěžovacích cyklech.....	92
Graf 32: Průběh zkoušky stanovení odolnosti proti trvalým deformacím	92
Graf 33: Pevnost v tahu za ohybu	94
Graf 34: Modul tuhosti v tahu za ohybu.....	95
Graf 35: Energie zkoušky do maximální síly	96
Graf 36: Pracovní diagramy všech variant směsi SMA (V1-V6) při 0 °C.....	97
Graf 37: Pracovní diagramy všech variant směsi SMA (V1-V6) při -10 °C	98
Graf 38: Stanovení odolnosti proti trvalým deformacím (V1).....	151
Graf 39: Stanovení odolnosti proti trvalým deformacím (V2).....	152
Graf 40: Stanovení odolnosti proti trvalým deformacím (V3).....	153



Graf 41: Stanovení odolnosti proti trvalým deformacím (V4).....	154
Graf 42: Stanovení odolnosti proti trvalým deformacím (V5).....	155
Graf 43: Stanovení odolnosti proti trvalým deformacím (V6).....	156
Graf 44: Stanovení odolnosti proti trvalým deformacím (ACL 16 S).....	157

12 Seznam použitých zkratek

LLP – vozovky s dlouhou životností (z angl. Long-Life Pavement)

PP – „věčné“ vozovky (z angl. Perpetual Pavements)

TNV – těžká nákladní vozidla

FEL – únavový práh (z angl. Fatigue Endurance Limit)

RBL – asfaltová vrstva ze směsi s vyšším obsahem asfaltového pojiva (z angl. Rich Bottom Layer)

CBR – kalifornský poměr únosnosti (z angl. California Bearing Ratio)

TP – technické podmínky

TKP – technické kvalitativní podmínky

SMA – asfaltový koberec mastixový (z angl. Stone Mastic Asphalt)

ACO – asfaltový beton pro obrusnou vrstvu

ACL – asfaltový beton pro ložnou vrstvu

ACP – asfaltový beton pro podkladní vrstvu

BBTM – asfaltový beton pro tenké vrstvy (z franc. Béton Bitumineux Très Mince)

VMT – asfaltová směs s vysokým modulem tuhosti

PA – drenážní koberec (z angl. Porous Asphalt)

MA – litý asfalt (z angl. Mastic Asphalt)

MZK – mechanicky zpevněné kamenivo

SC C_{8/10} – směs stmelená cementem

JMV – jemně mletý vápenec

DDK – drobné drcené kamenivo

HDK – hrubé drcené kamenivo

HiMA – vysoce modifikované asfaltové pojivo (z angl. Highly Modified Asphalt)

PmB – polymerem modifikovaný asfalt (z angl. Polymer Modified Bitumen)

CRmB – asfaltové pojivo modifikované pryží (z angl. Crumb Rubber Modified Bitumen)

ITS – pevnost v příčném tahu (z angl. Indirect Tenstile Strength)

ITSR – poměr pevnosti v příčném tahu (z angl. Indirect Tenstile Strength Ratio)

ITSRf – poměr pevnosti v příčném tahu – mraz (z angl. Indirect Tenstile Strength Ratio - freeze)

AI – index stárnutí (z angl. Ageing Index)



13 Přílohy

Tabulka 32: Propady a zbytky na jednotlivých sítích všech dostupných frakcí kameniva

Síťo [mm]	DDK 0/4 Zbraslav		HDK 2/5 Zbraslav		HDK 4/8 Zbraslav		HDK 8/11 Zbraslav		HDK 11/16 Zbraslav		JM V. Hydčice		R-mat	
	propady [%]	zbytky [%]	propady [%]	zbytky [%]	propady [%]	zbytky [%]	propady [%]	zbytky [%]	propady [%]	zbytky [%]	propady [%]	zbytky [%]	propady [%]	zbytky [%]
32	100,0	0,0	100,0	0,0	100,0	0,0	100,0	0,0	100,0	0,0	100,0	0,0	100,0	0,0
22	100,0	0,0	100,0	0,0	100,0	0,0	100,0	0,0	100,0	0,0	100,0	0,0	100,0	0,0
16	100,0	0,0	100,0	0,0	100,0	0,0	100,0	0,0	83,9	16,1	100,0	0,0	99,1	0,9
11,2	100,0	0,0	100,0	0,0	100,0	0,0	85,2	14,8	11,8	72,1	100,0	0,0	92,2	6,9
8	100,0	0,0	99,9	0,1	96,1	3,9	18,0	67,2	0,3	11,4	100,0	0,0	76,8	15,4
5,6	99,9	0,1	99,9	0,0	48,0	48,1	2,3	15,7	0,1	0,3	100,0	0,0	61,9	14,9
4	96,9	3,0	88,0	11,9	13,3	34,7	1,9	0,5	0,1	0,0	100,0	0,0	51,7	10,2
2	64,4	32,5	9,0	79,0	2,5	10,9	1,7	0,2	0,1	0,0	100,0	0,0	37,1	14,7
1	38,9	25,5	2,0	7,0	1,1	1,4	1,3	0,3	0,1	0,0	100,0	0,0	27,5	9,6
0,5	21,1	17,8	1,2	0,8	0,9	0,2	0,9	0,4	0,0	0,0	100,0	0,0	21,8	5,7
0,25	10,1	11,1	1,1	0,2	0,8	0,1	0,6	0,3	0,0	0,0	100,0	0,0	17,7	4,2
0,125	4,7	5,3	0,8	0,2	0,7	0,1	0,4	0,3	0,0	0,0	91,1	8,9	14,7	2,9
0,063	1,7	3,0	0,3	0,5	0,4	0,2	0,2	0,2	0,0	0,0	72,2	18,9	12,8	2,0
0	0,0	1,6	0,0	0,0	0,1	0,4	0,0	0,2	0,0	0,0	0	72,4	0,0	12,8



Tabulka 33: Rozměry Marshallových těles hutněných 2×50 údery (optimalizace směsi SMA L 16 S)

Těleso	Pojivo	Množství pojiva [%]	Průměr \emptyset				Výška h					
			[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	
			[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	
1A	PMB 25/55-60	5,5	102,00	101,68	101,83	102,07	101,90	60,72	60,29	60,38	61,18	60,64
1B			102,15	101,90	102,09	102,09	102,06	58,56	58,31	58,87	59,15	58,72
1C			101,32	101,39	101,59	101,63	101,48	61,65	61,71	61,21	61,23	61,45
1D			101,43	101,42	101,57	101,47	101,47	61,61	61,60	61,69	62,40	61,83
2A	PMB 25/55-60	5,5	101,12	101,95	102,02	101,33	101,61	63,75	64,06	63,81	63,53	63,79
2B			101,48	101,58	101,37	101,45	101,47	62,82	63,10	63,18	62,73	62,96
2C			101,54	101,49	101,46	101,53	101,51	60,33	60,78	60,87	60,56	60,64
2D			101,52	101,48	101,45	101,57	101,51	60,35	60,87	60,54	60,80	60,64
3A	PMB 25/55-60	5,5	101,08	101,06	101,15	101,08	101,09	60,43	59,90	59,84	60,59	60,19
3B			101,38	101,49	101,26	101,52	101,41	60,62	61,02	62,67	61,31	61,41
3C			101,67	101,63	101,57	101,53	101,60	60,35	60,47	61,11	61,31	60,81
3D			101,24	101,37	101,16	101,23	101,25	58,90	58,39	58,59	59,29	58,79
4A	PMB 25/55-60	5,5	101,45	101,46	101,20	101,36	101,37	61,57	61,26	61,12	61,55	61,38
4B			100,61	100,99	101,02	101,31	100,98	62,04	61,98	61,75	61,77	61,89
4C			102,48	101,79	103,18	102,93	102,60	59,86	59,59	58,92	59,46	59,46
4D			101,30	100,68	100,49	101,15	100,91	60,74	61,14	60,72	60,27	60,72
5A	PMB 25/55-60	5,5	101,57	101,42	101,34	101,41	101,44	62,54	62,80	62,60	62,56	62,63
5B			101,33	101,68	101,11	101,43	101,39	61,77	61,82	62,19	61,73	61,88
5C			102,70	102,67	102,67	102,74	102,70	59,81	59,90	59,26	59,64	59,65
5D			101,42	100,98	101,35	101,41	101,29	62,33	62,25	61,97	62,70	62,31



Tabulka 34: Optimalizace směsi SMA L 16 S

Těleso	Pojivo	Množství pojiva [%]	Průměr		Výška h [mm]	Objem		Hmotnost			Teplota T [°C]	Hustota vody ρ_w [g.cm ⁻³]	Objemová hmotnost				Teplota hutnění	Mezerovitost Vm [%]	Mezerovitost směsi kameniva		Obsah HDK [%]
			Ø [mm]			V [cm ³]	m ₁ [g]	m ₂ [g]	m ₃ [g]	T			ρ_w	ρ_{vz}	Vm	VMA			HDK		
1A	PMB 25/55-60	5,5	101,90	60,64	494,71	1 137,3	663,2	1 144,3	24,0	0,9972	2,357	2,391	2,385	2,385	160 °C	2,5	15,3	67,9			
1B			102,06	58,72	480,57	1 126,5	660,5	1 130,3													
1C			101,48	61,45	497,24	1 147,1	672,6	1 152,2													
1D			101,47	61,83	500,18	1 145,7	670,5	1 149,6													
2A	PMB 25/55-60	5,5	101,61	63,79	517,40	1 173,1	678,2	1 178,9	19,0	0,9984	2,339	2,339	2,342	2,342	160 °C	4,1	16,7	69,4			
2B			101,47	62,96	509,32	1 156,1	669,0	1 162,4													
2C			101,51	60,64	490,87	1 113,6	643,7	1 118,5													
2D			101,51	60,64	490,91	1 113,7	643,6	1 118,3													
3A	PMB 25/55-60	5,5	101,09	60,19	483,31	1 135,7	664,9	1 138,4	24,0	0,9972	2,392	2,373	2,382	2,401	160 °C	2,2	15,1	65,1			
3B			101,41	61,41	496,19	1 138,9	664,4	1 143,0													
3C			101,60	60,81	493,20	1 145,9	671,1	1 150,8													
3D			101,25	58,79	473,56	1 126,7	661,2	1 129,1													
4A	PMB 25/55-60	5,5	101,37	61,38	495,51	1 143,6	668,4	1 148,3	24,0	0,9972	2,376	2,377	2,387	160 °C	2,4	15,2	66,5				
4B			100,98	61,89	495,84	1 144,0	667,5	1 147,5													
4C			102,60	59,46	491,73	1 144,5	669,0	1 147,1													
4D			100,91	60,72	485,74	1 137,0	664,9	1 138,8													
5A	PMB 25/55-60	5,5	101,44	62,63	506,28	1 148,4	666,6	1 152,4	24,0	0,9972	2,357	2,368	2,362	2,367	160 °C	3,2	15,9	68,7			
5B			101,39	61,88	499,77	1 139,5	663,4	1 143,3													
5C			102,70	59,65	494,30	1 132,6	656,9	1 135,1													
5D			101,29	62,31	502,31	1 147,7	667,9	1 151,5													



Tabulka 35: Stanovení maximální objemové hmotnosti směsi SMA L 16 S

1. SÉRIE		2. SÉRIE	
$M_1=$	1191,6 g	$M_1=$	1250,6 g
$M_2=$	1898,4 g	$M_2=$	1920,4 g
$M_3=$	3525,4 g	$M_3=$	3562,6 g
$V=$	1915,78 ml	$V=$	1915,78 ml
$\rho_w=$	0,9972 Mg/m ³	$\rho_w=$	0,9972 Mg/m ³
$\rho_m=$	2,441 Mg/m ³	$\rho_m=$	2,441 Mg/m ³
$\rho_m=$ 2,441		Mg/m ³	



Tabulka 36: Rozměry Marshallových těles hutněných 2x50 úderů (V1, V2, V3)

Těleso	Specifikace varianty	Množství pojiva [%]	Průměr Ø						Výška h					
			[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]		
			V11	101,28	101,03	101,20	101,34	101,21	63,07	62,84	62,85	63,19	62,99	
V12	101,35	101,12	101,24	101,23	101,24	63,60	64,06	64,04	64,09	63,95				
V13	101,89	101,89	101,83	101,83	101,86	63,10	63,58	63,49	63,16	63,33				
V14	101,30	101,13	101,26	101,08	101,19	63,15	63,15	63,15	63,52	63,24				
V15	101,90	101,13	101,81	101,61	101,61	62,31	62,41	62,65	62,97	62,59				
V16	101,45	101,48	101,46	101,41	101,45	62,49	62,63	62,82	63,30	62,81				
V17	101,53	101,61	101,74	101,73	101,65	62,03	62,19	62,54	62,63	62,35				
V18	102,18	102,49	102,13	102,64	102,36	61,17	61,26	61,16	60,93	61,13				
V19	102,60	102,43	102,36	102,60	102,50	64,19	64,93	64,99	64,73	64,71				
V21	101,54	101,55	101,45	101,50	101,51	63,59	63,57	64,36	63,97	63,87				
V22	101,35	101,45	101,30	101,02	101,28	63,24	63,59	63,80	63,80	63,61				
V23	101,42	101,55	101,50	101,35	101,46	64,84	64,56	64,21	64,42	64,51				
V24	101,52	101,50	101,58	101,51	101,53	65,00	64,91	64,38	64,67	64,74				
V25	101,38	101,50	101,46	101,66	101,50	64,28	64,06	64,16	63,94	64,11				
V26	101,59	101,51	101,44	101,31	101,46	63,99	63,86	63,84	63,89	63,90				
V27	101,90	101,88	102,22	102,24	102,06	63,12	63,67	63,90	63,55	63,56				
V28	101,92	101,33	101,86	101,51	101,66	64,41	64,45	64,14	63,90	64,23				
V29	101,94	102,00	102,14	101,74	101,96	64,36	63,85	63,74	64,05	64,00				
V31	101,53	101,40	101,56	101,59	101,52	65,20	64,95	64,78	64,89	64,96				
V32	101,49	101,48	101,47	101,52	101,49	63,94	64,04	64,14	64,38	64,13				
V33	101,72	101,86	101,85	101,83	101,82	64,66	64,73	64,37	64,30	64,52				
V34	101,52	101,61	101,45	101,60	101,55	64,48	64,04	64,03	64,33	64,22				
V35	102,80	102,95	102,97	102,98	102,93	62,31	62,44	62,63	62,90	62,57				
V36	101,51	101,55	101,60	101,61	101,57	64,55	64,71	64,96	64,94	64,79				
V37	101,74	101,52	101,57	101,51	101,59	64,97	64,90	64,65	64,68	64,80				
V38	101,56	101,58	101,62	101,52	101,57	64,44	64,73	64,83	64,50	64,63				
V39	101,91	101,84	102,14	101,90	101,95	64,07	64,16	63,67	63,51	63,85				



Tabulka 37: Rozměry Marshallových těles hutněných 2×50 úderů (V4, V5, V6)

Těleso	Specifikace varianty	Množství pojiva [%]	Průměr Ø				Výška h					
			[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]		
			[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]		
V41	PMB 25/55-60 + FORTA-FI	5,5	101,46	101,56	101,65	101,48	101,54	64,70	64,45	64,20	64,58	64,48
V42			101,37	101,60	101,50	101,43	101,48	63,47	63,43	63,18	63,31	63,35
V43			101,91	101,93	101,98	101,91	101,93	63,10	63,24	63,55	63,62	63,38
V44			101,55	101,32	101,41	101,54	101,46	63,50	63,54	64,03	63,93	63,75
V45			101,50	101,49	101,62	101,54	101,54	64,79	64,74	64,50	64,67	64,68
V46			101,82	102,06	101,62	101,50	101,75	64,08	64,11	63,77	63,60	63,89
V47			101,94	101,92	102,04	102,09	102,00	64,40	64,03	63,91	63,79	64,03
V48			102,97	102,72	102,74	103,03	102,87	62,24	62,93	62,53	62,48	62,55
V49			101,35	101,34	101,17	101,54	101,35	63,90	64,06	64,69	64,39	64,26
V51	PMB 25/55-60 + 1,5% Sasobit	5,5	101,52	101,42	101,45	101,30	101,42	63,71	63,60	63,16	63,58	63,51
V52			101,05	101,46	101,42	101,29	101,31	63,44	63,61	63,76	63,90	63,68
V53			101,44	101,55	101,58	101,61	101,55	62,70	63,22	63,55	63,00	63,12
V54			101,92	101,69	101,79	101,82	101,81	63,46	63,52	63,28	63,38	63,41
V55			101,17	101,37	101,35	101,32	101,30	64,55	64,39	64,08	64,07	64,27
V56			101,49	101,29	101,24	101,35	101,34	63,47	63,46	63,28	63,34	63,39
V57			101,42	101,38	101,41	101,34	101,39	64,13	64,18	64,62	64,63	64,39
V58			101,86	101,72	101,71	101,27	101,64	64,03	64,16	64,00	63,73	63,98
V59			101,89	101,83	101,87	101,83	101,86	63,80	63,87	64,29	64,08	64,01
V61	PMB 40/60-75 + 30 % R- mat	4,3	101,83	101,62	101,62	101,61	101,67	61,60	61,94	61,89	61,62	61,76
V62			101,48	101,58	101,52	101,06	101,41	61,93	62,06	62,13	62,33	62,11
V63			101,85	101,55	101,45	101,61	101,62	61,91	62,14	61,82	61,70	61,89
V64			101,97	101,77	101,93	102,02	101,92	62,80	61,22	61,90	62,40	62,08
V65			101,51	101,57	101,53	101,72	101,58	62,53	62,67	62,58	62,47	62,56
V66			101,48	101,33	101,50	101,52	101,46	61,76	62,06	62,48	62,58	62,22
V67			102,71	102,61	102,69	102,69	102,68	60,62	60,67	60,16	60,22	60,42
V68			101,17	101,27	101,17	101,08	101,17	62,85	62,36	62,02	62,67	62,48
V69			101,29	101,67	101,35	101,24	101,39	60,96	61,49	61,82	61,79	61,52



Tabulka 38: Rozměry Marshallových těles hutněných 2x75 úderů (ACL 16 S)

Těleso	Specifikace varianty	Množství pojiva [%]	Průměr				Vyška				
			Ø				h				
			[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	
1	PMB 25/55-55	4,4	101,49	101,36	101,49	101,40	62,94	62,95	63,18	63,32	63,10
2			101,39	101,40	101,38	101,42	63,53	63,81	63,70	63,66	63,68
3			101,31	101,42	101,44	101,40	64,09	64,09	64,08	64,04	64,08
4			101,43	101,20	101,39	101,37	63,56	63,64	63,79	63,56	63,64
5			101,45	101,49	101,38	101,41	63,90	64,35	63,75	63,69	63,92
6			101,66	101,68	101,59	101,48	63,12	63,12	62,78	63,05	63,02
7			101,27	101,38	101,37	101,18	62,87	62,95	63,04	63,11	62,99
8			101,17	101,48	101,54	101,56	64,01	64,12	64,21	64,37	64,18
9			101,49	101,50	101,33	101,45	63,86	63,93	63,99	63,79	63,89



Tabulka 39: Objemová hmotnost, mezerovitost a mezerovitost směsi kameniva u variant V1, V2 a V3 (Marshallova tělesa)

Těleso	Specifikace varianty	Množství pojiva [%]	Průměr Ø [mm]	Výška h [mm]	Hmotnost			Teplota T [°C]	Hustota vody ρ _w [g.cm ⁻³]	Objemová hmotnost		Teplota hutnění	Mezerovitost		Mezerovitost směsi kameniva	
					m ₁ [g]	m ₂ [g]	m ₃ [g]			ρ _{vz} [g.cm ⁻³]	V _m [%]		V _m [%]	VMA [%]	VMA [%]	
V11	PMB 25/55-60	5,5	101,21	62,99	1 192,4	700,0	1 195,2	19,5	0,9984	2,404	2,399	160°C	1,5	14,5	14,6	14,6
V12			101,24	63,95	1 198,7	704,5	1 201,0						1,2	14,2		
V13			101,86	63,33	1 196,3	698,2	1 198,6						2,2	15,1		
V14			101,19	63,24	1 196,2	701,7	1 198,4						1,5	14,5		
V15			101,61	62,59	1 195,5	702,9	1 198,0						1,2	14,2		
V16			101,45	62,81	1 198,8	703,8	1 200,1						1,2	14,2		
V17			101,65	62,35	1 192,8	699,3	1 194,4						1,4	14,4		
V18			102,36	61,13	1 190,2	699,4	1 192,1						1,2	14,2		
V19			102,50	64,71	1 187,1	688,5	1 193,8						3,9	16,5		
V21	PMB 40/60-75	5,5	101,51	63,87	1 200,4	703,3	1 203,5	19,5	0,9984	2,396	2,401	160°C	1,8	14,8	14,6	14,6
V22			101,28	63,61	1 196,2	702,8	1 199,0						1,4	14,4		
V23			101,46	64,51	1 200,7	702,6	1 205,5						2,3	15,2		
V24			101,53	64,74	1 208,6	707,9	1 211,3						1,8	14,7		
V25			101,50	64,11	1 199,8	704,9	1 202,3						1,3	14,3		
V26			101,46	63,90	1 204,2	707,0	1 206,6						1,4	14,4		
V27			102,06	63,56	1 212,3	711,2	1 214,3						1,4	14,4		
V28			101,66	64,23	1 204,0	706,9	1 207,0						1,5	14,5		
V29			101,96	64,00	1 211,8	709,6	1 214,3						1,8	14,7		
V31	50/70 CRmB	5,5	101,52	64,96	1 202,3	698,6	1 209,7	20,0	0,9983	2,348	2,365	160°C	3,8	16,4	15,9	15,9
V32			101,49	64,13	1 197,0	699,2	1 202,9						2,8	15,6		
V33			101,82	64,52	1 199,0	697,3	1 204,5						3,3	16,0		
V34			101,55	64,22	1 199,9	700,0	1 204,3						2,7	15,5		
V35			102,93	62,57	1 198,4	697,2	1 203,0						3,1	15,8		
V36			101,57	64,79	1 201,5	696,8	1 204,9						3,3	16,0		
V37			101,59	64,90	1 197,9	697,0	1 202,2						3,0	15,8		
V38			101,57	64,63	1 197,7	696,3	1 202,3						3,2	15,9		
V39			101,95	63,85	1 194,3	695,2	1 197,9						2,8	15,6		



Tabulka 40: Objemová hmotnost, mezerovitost a mezerovitost směsi kameniva u variant V4, V5 a V6 (Marshallova tělesa)

Těleso	Specifikace varianty	Množství pojiva [%]	Průměr \emptyset [mm]	Výška h [mm]	Hmotnost			Teplota T [°C]	Hustota vody ρ_w [g.cm ⁻³]	Objemová hmotnost		Teplota hutnění	Mezerovitost		Mezerovitost směsi kameniva	
					m_1 [g]	m_2 [g]	m_3 [g]			ρ_{vz} [g.cm ⁻³]	Vm [%]		Vm [%]	VMA [%]	VMA [%]	
V41	PMB 25/55-60 + FORTA-FI	5,5	101,54	64,48	1188,8	690,7	1193,2	19,5	0,9984	2,362	2,363	160°C	3,2	16,0	15,9	
V42			101,48	63,35	1186,9	692,2	1189,7			2,382	2,363		2,4	15,3		
V43			101,93	63,38	1185,7	688,8	1189,3			2,365	2,363		3,1	15,8		
V44			101,46	63,75	1188,4	692,8	1192,1			2,376	2,363		2,6	15,5		
V45			101,54	64,68	1191,1	690,6	1195,5			2,355	2,363		3,5	16,2		
V46			101,75	63,89	1185,6	689,2	1190,1			2,363	2,363		3,2	15,9		
V47			102,00	64,03	1188,6	687,8	1192,3			2,352	2,363		3,6	16,3		
V48			102,87	62,55	1187,1	688,8	1192,6			2,353	2,363		3,6	16,3		
V49			101,35	64,26	1182,1	685,9	1186,3			2,359	2,363		3,4	16,1		
V51	PMB 25/55-60 + 1,5% Sasobit	5,5	101,42	63,51	1194,7	699,9	1198,5	26,5	0,9967	2,388	2,383	140°C	2,2	15,0	15,2	
V52			101,31	63,68	1196,3	701,5	1201,7			2,384	2,383		2,3	15,2		
V53			101,55	63,12	1195,7	699,9	1199,0			2,388	2,383		2,2	15,0		
V54			101,81	63,41	1195,0	698,3	1196,8			2,389	2,383		2,1	15,0		
V55			101,30	64,27	1191,0	696,8	1194,0			2,388	2,383		2,2	15,1		
V56			101,34	63,39	1175,0	685,7	1179,1			2,374	2,383		2,7	15,5		
V57			101,39	64,39	1200,3	701,3	1204,4			2,378	2,383		2,6	15,4		
V58			101,64	63,98	1200,3	700,8	1202,8			2,383	2,383		2,4	15,2		
V59			101,86	64,01	1198,8	698,5	1201,6			2,375	2,383		2,7	15,5		
V61	PMB 40/60-75 + 30% R-mat	4,3	101,67	61,76	1191,9	700,8	1193,6	27,0	0,9966	2,411	2,410	160°C	1,2	14,2	14,2	
V62			101,41	62,11	1194,7	702,6	1196,6			2,410	2,410		1,2	14,2		
V63			101,62	61,89	1191,5	699,7	1193,0			2,407	2,410		1,4	14,3		
V64			101,92	62,08	1195,2	702,1	1196,1			2,411	2,410		1,2	14,2		
V65			101,58	62,56	1198,5	703,0	1199,7			2,405	2,410		1,5	14,4		
V66			101,46	62,22	1195,8	702,4	1196,9			2,410	2,410		1,2	14,2		
V67			102,68	60,42	1193,8	702,0	1194,9			2,414	2,410		1,1	14,1		
V68			101,17	62,48	1197,3	703,4	1198,2			2,412	2,410		1,2	14,2		
V69			101,39	61,52	1186,7	697,5	1187,6			2,413	2,410		1,1	14,1		



Tabulka 41: Objemová hmotnost, mezerovitost a mezerovitost směsi kameniva u referenční směsi ACL 16S (Marshallova tělesa)

Těleso	Specifikace varianty	Množství pojiva [%]	Průměr Ø [mm]	Výška h [mm]	Hmotnost			Teplota T [°C]	Hustota vody ρ_w [g.cm ⁻³]	Objemová hmotnost		Teplota hutnění	Mezerovitost		Mezerovitost směsi kameniva	
					m ₁ [g]	m ₂ [g]	m ₃ [g]			ρ_v [g.cm ⁻³]	Vm [%]		VMA [%]	VMA [%]		
1	PMB 25/55-55	4,4	101,40	63,10	1 197,1	701,2	1 203,1	24,5	0,9795	2,336	2,339	160°C	4,3	16,9	16,8	
2			101,40	63,68	1 197,5	701,0	1 203,7			2,333	2,339		4,4	17,0		
3			101,39	64,08	1 194,7	699,0	1 202,6			2,324	2,339		4,8	17,3		
4			101,35	63,64	1 198,4	700,9	1 203,2			2,337	2,339		4,3	16,9		
5			101,43	63,92	1 199,1	702,9	1 203,5			2,346	2,339		3,9	16,5		
6			101,60	63,02	1 198,0	704,0	1 202,6			2,353	2,339		3,6	16,3		
7			101,30	62,99	1 195,8	700,6	1 198,5			2,352	2,339		3,6	16,3		
8			101,44	64,18	1 197,8	701,6	1 205,3			2,329	2,339		4,6	17,1		
9			101,44	63,89	1 196,1	700,9	1 201,1			2,342	2,339		4,0	16,7		

ACL 16 S (2x75)



Tabulka 42: Rozměry Marshallových těles hutněných 2x25 úderů (V1, V2, V3)

Těleso	Specifikace varianty	Množství pojiva [%]	Průměr \varnothing				Výška h								
			[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]					
			[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]					
V1A	PMB 25/55-60	5,5	101,76	101,98	101,64	101,75	101,78	61,92	61,21	61,26	61,60	61,50			
V1B			101,22	101,40	101,32	101,37	101,33	63,61	64,39	64,26	64,23	64,12	64,12		
V1C			101,01	101,27	101,19	101,23	101,18	63,16	63,65	63,33	63,01	63,29	63,29		
V1D			101,13	101,19	101,02	100,97	101,08	63,30	63,78	63,74	63,41	63,56	63,56		
V1E			100,99	101,29	101,15	101,27	101,18	62,75	63,32	63,49	63,51	63,27	63,27		
V1F			101,45	101,75	101,24	101,59	101,51	63,88	64,15	64,33	64,59	64,24	64,24		
V1G			101,54	101,29	101,49	101,06	101,35	63,05	64,49	63,73	63,53	63,70	63,70		
V1H			101,06	101,37	101,40	101,20	101,26	62,56	62,53	63,33	62,93	62,84	62,84		
V1I			101,37	101,33	101,48	101,05	101,31	62,29	62,76	63,01	62,98	62,76	62,76		
V2A			PMB 40/60-75	5,5	101,55	101,42	101,04	101,47	101,37	64,84	64,29	64,00	64,16	64,32	64,32
V2B					101,66	101,58	101,77	101,70	101,68	62,07	62,93	62,49	62,50	62,50	62,50
V2C	101,48	101,68			101,55	101,91	101,66	64,23	63,98	63,80	64,03	64,01	64,01		
V2D	101,34	101,58			101,61	101,58	101,53	64,06	63,44	63,55	64,15	63,80	63,80		
V2E	101,53	101,46			101,65	101,68	101,58	58,19	58,28	58,47	58,82	58,44	58,44		
V2F	102,04	102,13			101,76	101,75	101,92	62,85	62,87	62,40	62,57	62,67	62,67		
V2G	101,24	101,55			101,40	101,40	101,40	63,96	64,34	64,45	64,25	64,25	64,25		
V2H	101,25	101,74			101,84	101,77	101,65	63,01	62,78	63,17	63,64	63,15	63,15		
V2I	101,25	101,47			101,17	101,10	101,25	67,38	67,27	67,66	67,80	67,53	67,53		
V3A	50/70 CRmB	5,5			101,42	101,33	101,39	101,47	101,40	64,78	64,50	64,88	65,09	64,81	64,81
V3B					101,88	102,07	101,89	101,68	101,88	63,07	63,07	63,20	63,41	63,19	63,19
V3C			101,58	101,35	101,68	101,14	101,44	62,78	62,78	63,29	63,34	63,05	63,05		
V3D			102,85	102,62	102,73	102,78	102,75	62,79	62,93	63,30	62,95	62,99	62,99		
V3E			101,48	101,62	101,52	101,64	101,57	63,82	63,93	64,25	64,19	64,05	64,05		
V3F			101,51	101,50	101,61	101,23	101,46	64,99	64,86	64,53	64,51	64,72	64,72		
V3G			101,55	101,60	101,62	101,58	101,59	63,92	63,93	64,02	64,09	63,99	63,99		
V3H			101,74	101,44	101,56	101,57	101,58	64,34	63,96	64,30	64,55	64,29	64,29		
V3I			102,78	102,89	102,90	102,28	102,71	62,11	61,98	61,78	62,10	61,99	61,99		



Tabulka 43: Rozměry Marshallových těles hutněných 2×25 úderý (V4, V5)

Těleso	Specifikace varianty	Množství pojiva [%]	Průměr					Vyška				
			Ø					h				
			[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
V4A	PMB 25/55-60 + FORTA-F1	5,5	102,07	102,08	102,01	101,97	102,03	62,58	62,63	62,62	62,89	62,68
V4B			101,54	101,44	101,43	101,40	101,45	63,22	63,51	63,62	63,70	63,51
V4C			101,52	101,57	101,44	101,58	101,53	62,82	62,87	63,09	63,55	63,08
V4D			101,64	101,54	101,43	101,50	101,53	64,11	64,27	64,49	64,64	64,38
V4E			102,02	101,84	101,93	101,93	101,93	61,32	62,01	61,71	62,18	61,81
V4F			101,36	100,89	101,30	100,97	101,13	64,77	64,52	64,41	64,57	64,57
V4G			102,80	102,95	102,90	103,00	102,91	62,05	62,08	61,93	61,78	61,96
V4H			101,77	101,65	101,85	101,90	101,79	63,12	63,13	63,32	63,35	63,23
V4I			101,61	101,18	101,50	101,44	101,43	62,89	63,17	63,22	63,29	63,14
V4J			102,06	101,72	101,83	101,95	101,89	61,75	62,06	61,7	61,71	61,81
V4K			101,43	101,26	101,4	101,55	101,41	61,07	60,95	61,38	61,5	61,23
V4L	101,35	101,5	101,57	101,41	101,46	61,56	61,77	62,06	61,8	61,80		
V4M	101,57	101,7	101,69	101,63	101,65	62,81	62,73	63,07	63,09	62,93		
V4N	101,6	101,64	101,23	101,66	101,53	62,83	63,02	63,7	63,38	63,23		
V4O	102,53	102,69	102,77	102,51	102,63	61,91	61,78	62,26	61,66	61,90		
V5A	PMB 25/55-60 + 1,5% Sasobit	5,5	101,29	101,38	101,12	101,56	101,34	62,95	62,05	62,55	63,17	62,68
V5B			101,77	101,74	101,80	101,45	101,69	63,79	63,75	63,64	63,53	63,68
V5C			102,73	102,83	102,59	102,06	102,55	60,97	60,66	60,86	61,31	60,95
V5D			101,40	101,63	101,48	101,48	101,50	62,25	62,03	62,25	62,54	62,27
V5E			101,24	101,57	101,43	101,31	101,39	62,72	62,26	62,83	63,12	62,73
V5F			101,43	101,40	101,68	101,22	101,43	62,79	62,59	62,38	62,23	62,50
V5G			101,58	101,54	101,23	101,41	101,44	63,21	62,37	62,64	63,11	62,83
V5H			101,48	101,37	101,32	101,64	101,45	63,34	62,99	62,97	63,18	63,12
V5I			101,54	101,15	101,28	101,35	101,33	64,33	64,35	63,69	64,30	64,17

SMA L 16 S - V4 (2x25)

SMA L 16 S - V5 (2x25)



Tabulka 44: Rozměry Marshallových těles hutněných 2×25 úderý (V6, ACL 16 S)

Těleso	Specifikace varianty	Množství pojiva [%]	Průměr					Výška				
			Ø					h				
			[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
V6A	PMB 40/60-75 + 30 % R- mat	4,3	101,47	101,35	101,41	101,19	101,36	59,81	59,56	59,91	60,37	59,91
V6B			101,33	101,35	101,16	101,47	101,33	60,92	61,01	61,35	61,43	61,18
V6C			102,39	102,62	102,95	102,51	102,62	59,21	59,43	59,20	59,10	59,24
V6D			101,58	101,95	101,71	101,52	101,69	60,93	60,90	60,46	61,02	60,83
V6E			101,81	101,96	101,81	101,81	101,85	60,35	60,68	60,75	60,77	60,64
V6F			102,00	102,08	101,85	101,97	101,98	60,34	60,15	59,70	59,90	60,02
V6G			101,54	101,40	101,46	101,35	101,44	60,96	61,07	61,18	60,86	61,02
V6H			101,49	101,46	101,26	101,30	101,38	60,37	60,07	60,69	61,12	60,56
V6I			101,57	101,50	101,57	101,44	101,52	60,81	60,65	60,54	60,61	60,65
1			PMB 25/55-55	4,4	101,65	101,55	101,65	101,58	101,61	63,42	63,41	63,39
2	101,35	101,42			101,43	101,37	101,39	64,65	64,60	64,62	64,63	64,63
3	101,41	101,55			101,52	101,47	101,49	63,92	63,93	64,25	64,20	64,08
4	101,65	101,50			101,62	101,55	101,58	62,79	62,93	63,30	62,95	62,99
5	101,62	101,58			101,65	101,55	101,60	63,55	63,65	63,62	63,63	63,61
6	101,51	101,50			101,61	101,23	101,46	64,10	64,00	63,92	64,05	64,02
7	101,65	101,55			101,65	101,58	101,61	63,88	63,85	63,92	63,93	63,90
8	101,62	101,59			101,63	101,63	101,62	64,22	64,24	64,25	64,17	64,22
9	102,78	102,89			102,90	102,28	102,71	63,12	63,18	63,09	63,12	63,13



Tabulka 45: Objemová hmotnost Marshallových těles hutněných 2×25 úderů (varianty V1, V2, V3 a V4)

	Těleso	Specifikace varianty	Množství pojiva [%]	Průměr	Výška	Objem	Hmotnost	Objemová hmotnost	
				Ø	h	V	m _f	ρ _{vm}	
				[mm]	[mm]	[cm ³]	[g]	[g.cm ⁻³]	
SMA L 16 S - V1 (2x25)	V1A	PMB 25/55-60	5,5	101,78	61,50	500,57	1 151,7	2,301	2,252
	V1B			101,33	64,12	517,28	1 155,3	2,233	
	V1C			101,18	63,29	509,01	1 147,6	2,255	
	V1D			101,08	63,56	510,20	1 153,2	2,260	
	V1E			101,18	63,27	508,85	1 142,5	2,245	
	V1F			101,51	64,24	520,06	1 159,8	2,230	
	V1G			101,35	63,70	514,05	1 141,8	2,221	
	V1H			101,26	62,84	506,22	1 147,0	2,266	
	V1I			101,31	62,76	506,09	1 143,2	2,259	
SMA L 16 S - V2 (2x25)	V2A	PMB 40/60-75	5,5	101,37	64,32	519,33	1 149,0	2,212	2,204
	V2B			101,68	62,50	507,66	1 142,1	2,250	
	V2C			101,66	64,01	519,72	1 140,0	2,193	
	V2D			101,53	63,80	516,72	1 138,3	2,203	
	V2E			101,58	58,44	473,80	1 048,0	2,212	
	V2F			101,92	62,67	511,52	1 141,5	2,232	
	V2G			101,40	64,25	519,03	1 146,5	2,209	
	V2H			101,65	63,15	512,69	1 140,8	2,225	
	V2I			101,25	67,53	543,89	1 143,9	2,103	
SMA L 16 S - V3 (2x25)	V3A	50/70 CRmB	5,5	101,40	64,81	523,63	1 146,2	2,189	2,207
	V3B			101,88	63,19	515,32	1 148,2	2,228	
	V3C			101,44	63,05	509,72	1 139,6	2,236	
	V3D			102,75	62,99	522,49	1 143,0	2,188	
	V3E			101,57	64,05	519,10	1 141,5	2,199	
	V3F			101,46	64,72	523,52	1 143,8	2,185	
	V3G			101,59	63,99	518,87	1 141,4	2,200	
	V3H			101,58	64,29	521,18	1 151,6	2,210	
	V3I			102,71	61,99	513,87	1 145,5	2,229	
SMA L 16 S - V4 (2x25)	V4A	PMB 25/55-60 + FORTA-FI	5,5	102,03	62,68	512,71	1 138,7	2,221	2,212
	V4B			101,45	63,51	513,63	1 131,0	2,202	
	V4C			101,53	63,08	510,91	1 135,6	2,223	
	V4D			101,53	64,38	521,39	1 140,0	2,186	
	V4E			101,93	61,81	504,54	1 134,5	2,249	
	V4F			101,13	64,57	518,85	1 137,1	2,192	
	V4G			102,91	61,96	515,60	1 136,6	2,204	
	V4H			101,79	63,23	514,78	1 135,7	2,206	
	V4I			101,43	63,14	510,44	1 137,4	2,228	2,253
	V4J			101,89	61,81	504,14	1 137,0	2,255	
	V4K			101,41	61,23	494,71	1 133,2	2,291	
	V4L			101,46	61,80	499,81	1 138,8	2,278	
	V4M			101,65	62,93	510,84	1 139,7	2,231	
	V4N			101,53	63,23	512,17	1 145,5	2,237	
	V4O			102,63	61,90	512,25	1 139,4	2,224	



Tabulka 46: Objemová hmotnost Marshallových těles hutněných 2x25 úderů (varianty V5 a V6, referenční směs ACL 16 S)

	Těleso	Specifikace varianty	Množství pojiva [%]	Průměr	Výška	Objem	Hmotnost	Objemová hmotnost	
				Ø	h	V	m ₁	ρ _{vm}	
				[mm]	[mm]	[cm ³]	[g]	[g.cm ⁻³]	
SMA L 16 S - V5 (2x25)	V5A	PMB 25/55-60 + 1,5% Sasobit	5,5	101,34	62,68	505,75	1 143,8	2,262	2,246
	V5B			101,69	63,68	517,38	1 144,3	2,212	
	V5C			102,55	60,95	503,65	1 139,0	2,261	
	V5D			101,50	62,27	504,01	1 139,9	2,262	
	V5E			101,39	62,73	506,67	1 142,9	2,256	
	V5F			101,43	62,50	505,22	1 138,4	2,253	
	V5G			101,44	62,83	508,00	1 145,0	2,254	
	V5H			101,45	63,12	510,45	1 139,5	2,232	
	V5I			101,33	64,17	517,67	1 148,3	2,218	
SMA L 16 S - V6 (2x25)	V6A	PMB 40/60-75 + 30 % R- mat	4,3	101,36	59,91	483,58	1 131,7	2,340	2,313
	V6B			101,33	61,18	493,53	1 137,8	2,305	
	V6C			102,62	59,24	490,10	1 134,0	2,314	
	V6D			101,69	60,83	494,22	1 136,0	2,299	
	V6E			101,85	60,64	494,20	1 135,9	2,298	
	V6F			101,98	60,02	490,42	1 134,6	2,314	
	V6G			101,44	61,02	493,31	1 137,7	2,306	
	V6H			101,38	60,56	489,05	1 136,7	2,324	
	V6I			101,52	60,65	491,15	1 135,6	2,312	
ACL 16 S (2x25)	1	PMB 25/55-55	4,4	101,61	63,42	514,41	1 146,2	2,228	2,210
	2			101,39	64,63	522,01	1 148,2	2,200	
	3			101,49	64,08	518,54	1 139,6	2,198	
	4			101,58	62,99	510,70	1 143,0	2,238	
	5			101,60	63,61	515,93	1 141,5	2,212	
	6			101,46	64,02	517,81	1 143,8	2,209	
	7			101,61	63,90	518,30	1 141,4	2,202	
	8			101,62	64,22	521,04	1 151,6	2,210	
	9			102,71	63,13	523,27	1 145,5	2,189	



Tabulka 47: Výsledky stanovení pevnosti v příčném tahu a stanovení odolnosti asfaltové směsi vůči vodě a proti účinkům mrazu (varianty V1, V2 a V3)

Těleso	Cyklus	Výška [mm]	Průměr [mm]	Příčná deformace		Síla porušení tělesa		Pevnost v příčném tahu		Poměrné přetvoření		Modul pružnosti		ITSR (%)
				[mm]	[mm]	(kN)	(kN)	(MPa)	(MPa)	(%)	(%)	(MPa)	(MPa)	
SMA L 16 S - V1 (2x25)	suché	101,2	63,3	2,68	29,00	2,88	27,75	2,77	8,88	62,1	8,87	62,1	-	
		101,2	63,3	2,74	25,10	2,50	27,75	2,77	9,08	62,1				
		101,3	62,8	2,59	29,16	2,92	27,75	2,77	8,66	62,0				
	mokrý	101,8	61,5	3,91	18,95	1,93	19,87	1,97	13,34	28,4	13,78	28,4		
		101,3	64,1	4,30	19,12	2,11	19,87	1,97	14,07	28,6				
		101,3	63,7	4,23	19,12	1,89	19,87	1,97	13,93	28,6				
	mráz	101,1	63,6	3,32	20,48	2,03	20,17	2,00	10,96	37,7	10,55	37,7		
		101,5	64,2	3,29	19,68	1,92	20,17	2,00	10,74	37,5				
SMA L 16 S - V2 (2x25)	suché	101,3	62,8	2,98	20,35	2,04	20,17	2,00	9,95	37,6	10,17	37,6	72,1%	
		101,7	62,5	3,03	34,13	3,42	31,71	3,10	10,17	63,5				
		101,9	62,7	2,89	29,80	2,97	31,71	3,10	9,67	63,3				
	mokrý	101,2	67,5	2,98	31,20	2,91	31,71	2,97	9,26	63,8	11,74	63,8		
		101,4	64,3	3,60	22,39	2,19	22,96	2,26	11,74	38,3				
		101,7	64,0	3,70	22,29	2,18	22,96	2,26	12,12	38,2				
	mráz	101,7	63,2	3,41	24,20	2,40	24,20	2,40	11,33	38,2	11,33	38,2		
		101,5	63,8	3,37	25,50	2,51	25,50	2,51	11,08	35,8				
SMA L 16 S - V3 (2x25)	suché	101,6	58,4	3,97	22,16	2,38	23,48	2,37	14,25	35,7	13,21	35,7	76,5%	
		101,4	64,3	4,38	22,79	2,23	23,48	2,37	14,30	35,8				
		101,4	64,8	2,89	30,42	2,95	29,40	2,87	9,35	60,3				
	mokrý	101,9	63,2	2,97	27,99	2,77	29,40	2,87	9,86	60,0	12,11	60,0		
		101,6	64,3	2,86	29,80	2,91	29,80	2,91	9,33	60,2				
		101,4	63,0	3,61	21,94	2,18	20,67	2,04	12,01	33,7				
	mráz	102,7	63,0	3,97	19,95	1,96	20,67	2,04	13,22	33,2	11,11	33,2		
		101,6	64,0	3,39	20,12	1,97	20,67	2,04	11,11	33,6				
mráz	101,6	64,0	3,74	18,45	1,81	19,59	1,93	12,25	40,8	9,41	40,8			
	101,5	64,7	2,51	19,09	1,85	19,59	1,93	8,13	40,8					
	102,7	62,0	2,32	21,22	2,12	21,22	2,12	7,85	40,3					



Tabulka 48: Výsledky stanovení pevnosti v příčném tahu a stanovení odolnosti asfaltové směsi vůči vodě a proti účinkům mrazu (varianty V4 a V5)

Těleso	Cyklus	Výška [mm]	Průměr [mm]	Příčná deformace		Síla porušení tělesa		Pevnost v příčném tahu		Poměrné přetvoření		Modul pružnosti (MPa)	ITSR (%)
				[mm]	[mm]	(kN)	(kN)	(MPa)	(%)	(%)	(MPa)		
V4A	suché	102,0	62,7	3,06	22,99	2,28	10,24	44,8	2,30	10,18	45,0	-	
V4C		101,5	63,1	3,06	23,31	2,24	10,17	45,2					
V4E		101,1	64,6	3,12	24,47	2,39	10,14	50,1					
V4B	mokrě	101,5	63,5	3,13	23,59	2,33	10,24	44,8	2,38	9,49	50,1	103,5%	
V4D		101,5	64,4	3,35	22,70	2,21	7,66	50,1					
V4E		101,9	61,8	3,09	25,82	2,61	10,49	49,9					
V4G	mraz	102,9	62,0	3,48	21,24	2,12	11,78	45,5	2,34	10,15	46,0	89,7%	
V4H		101,8	63,2	2,81	25,05	2,48	9,32	46,0					
V4I		101,4	63,1	2,81	24,32	2,42	9,33	46,2					
V4J	suché	101,9	61,8	2,94	26,61	2,69	9,98	51,7	2,61	10,01	51,9	-	
V4L		101,5	61,8	3,09	25,13	2,55	10,49	51,8					
V4M		101,6	62,9	2,87	25,92	2,58	9,57	53,7					
V4K	mokrě	101,4	61,2	3,26	27,00	2,77	11,17	53,6	2,66	9,92	53,0	102,1%	
V4N		101,5	63,2	2,82	28,75	2,85	9,35	50,5					
V4O		102,6	61,9	2,73	23,64	2,37	9,25	50,3					
V5A	suché	101,3	62,7	2,92	23,52	2,36	9,77	50,5	2,47	9,73	50,3	-	
V5B		101,7	63,7	2,98	23,17	2,28	9,82	50,5					
V5E		101,4	62,7	2,87	27,60	2,76	9,60	43,5					
V5C	mokrě	102,6	61,0	3,62	24,86	2,53	12,46	44,0	2,36	10,74	44,0	95,8%	
V5G		101,4	62,8	3,24	23,47	2,34	10,82	44,0					
V5H		101,5	63,1	2,69	22,26	2,21	8,94	40,5					
V5D	mraz	101,5	62,3	3,16	24,22	2,44	10,64	40,5	2,35	11,51	40,5	95,2%	
V5F		101,4	62,5	3,31	23,89	2,40	11,11	40,6					
V5I		101,3	64,2	3,91	22,54	2,21	12,78	40,6					

SMA L 16 S - V4 (2x25)

SMA L 16 S - V5 (2x25)



Tabulka 49: Výsledky stanovení pevnosti v příčném tahu a stanovení odolnosti asfaltové směsi vůči vodě a proti účinkům mrazu (varianta V6 a referenční směs ACL 16 S)

Těleso	Cyklus	Výška [mm]	Průměr [mm]	Příčná deformace		Síla porušení tělesa		Pevnost v příčném tahu		Poměrné přetvoření		Modul pružnosti (MPa)	ITSR (%)
				[mm]	[mm]	(kN)	(kN)	(MPa)	(MPa)	(%)	(%)		
SMA L 16 S - V6 (2x25)	suché	101,4	59,9	3,12	30,25	3,17	30,02	3,17	10,92	55,2	-		
		101,7	60,8	3,53	29,36	3,02	30,46	3,02	12,17	55,0			
		101,8	60,6	3,08	30,63	3,14	29,87	3,14	10,65	54,9			
	mokrý	101,3	61,2	3,07	30,63	3,15	29,87	3,15	10,53	57,1	99,6%		
		102,6	59,2	3,35	28,80	3,02	30,18	3,02	11,86	56,4			
		101,4	60,6	2,93	30,18	3,13	28,50	3,13	10,15	57,1			
ACL 16 (2x25)	mráz	102,0	60,0	3,10	28,50	2,96	29,99	2,96	10,83	60,5	99,3%		
		101,4	61,0	2,92	29,99	3,08	31,12	3,08	10,04	60,8			
	101,5	60,7	2,75	31,12	3,22	25,80	3,22	9,51	60,8				
	101,6	63,4	2,00	25,80	2,55	23,70	2,55	6,62	66,0				
suché	101,4	64,6	2,20	21,90	2,13	23,70	2,13	7,14	66,2	-			
	101,5	64,1	2,20	23,40	2,29	16,10	2,29	7,20	66,1				
	101,6	63,0	2,00	16,10	1,60	16,90	1,60	6,66	49,6				
	101,6	63,6	2,10	16,90	1,66	17,84	1,66	6,92	49,5				
	101,5	64,0	2,00	17,84	1,75	11,94	1,75	6,55	49,6				
mokrý	101,6	63,9	2,74	11,94	1,17	12,81	1,17	8,99	29,8	72,0%			
	101,6	64,2	2,53	11,26	1,10	15,23	1,10	8,26	29,8				
	102,7	63,1	2,39	15,23	1,50		1,50	7,94	29,5				



Tabulka 50: Moduly tuhosti na nezestárých tělesech při teplotách 0 °C, 15 °C, 27 °C a 40 °C (V1)

Temp. [°C]	Specimen	Diameter [mm]	Thickness [mm]	Stiffness adjusted			Horizontal stress			Horizontal deformation			Vertical force		
				[MPa]	[MPa]	[MPa]	[kPa]	[kPa]	[kPa]	[µm]	[µm]	[µm]	[kN]	[kN]	[kN]
0 °C	V15	101,6	62,6	20657	20088	20 373	1197,0	1 153,9	5,0	5,0	5,0	11,96	11,53	11,97	
	V16	101,5	62,8	20707	20299	20 503	1195,9	1 174,0	5,0	5,0	5,0	11,97	11,75		
	V17	101,7	62,3	20601	20935	20 768	1182,9	1 204,0	5,0	5,0	5,0	11,77	11,98		
	V18	102,4	61,1	22434	22004	22 219	1266,1	1 258,5	5,0	5,0	5,0	12,44	12,37		
15 °C	V11	101,2	63,0	9021	8649	8 835	481,3	471,0	5,0	5,1	5,0	4,82	4,72	4,52	
	V12	101,2	63,9	8294	7999	8 147	444,6	427,1	5,0	5,0	5,0	4,52	4,34		
	V13	101,9	63,3	8515	7419	7 967	459,4	391,5	5,1	4,9	4,9	4,65	3,97		
	V14	101,2	63,2	8408	8795	8 602	450,6	472,6	5,0	5,0	5,0	4,53	4,75		
	V15	101,6	62,6	8595	8054	8 325	476,6	435,1	5,2	5,0	5,0	4,76	4,35		
	V16	101,5	62,8	9241	7821	8 531	504,2	414,9	5,1	5,0	5,0	5,05	4,15		
	V17	101,7	62,3	8286	8893	8 590	438,1	481,7	4,9	5,1	5,1	4,37	4,80		
	V18	102,4	61,1	9322	8809	9 066	503,7	446,1	5,1	4,9	4,9	4,95	4,38		
27 °C	V19	102,5	64,7	7700	7276	7 488	414,6	383,5	5,1	5,0	5,0	4,32	3,99	1,59	
	V11	101,2	63,0	3319	3063	3 191	157,7	149,6	5,0	5,1	5,0	1,58	1,50		
	V12	101,2	63,9	3652	3457	3 555	174,1	173,1	5,0	5,2	5,0	1,77	1,76		
	V13	101,9	63,3	3220	2975	3 098	160,7	141,4	5,3	5,0	5,0	1,63	1,43		
40 °C	V14	101,2	63,2	3492	3094	3 293	159,5	141,3	4,8	4,9	4,9	1,60	1,42	0,46	
	V11	101,2	63,0	1012	961	987	45,0	42,9	5,0	5,0	5,0	0,45	0,43		
	V14	101,2	63,2	1071	1151	1 111	48,0	51,4	5,0	5,0	5,0	0,48	0,52		
	V17	101,7	62,3	1013	1093	1 053	44,3	46,2	5,0	5,2	5,0	0,44	0,46		
	V18	102,4	61,1	960	1144	1 052	41,2	50,8	5,0	5,0	5,0	0,40	0,50		

SMA L 16 S - V1 [2x50]



Tabulka 51: Moduly tuhosti na nezestárých tělesech při teplotách 0 °C, 15 °C, 27 °C a 40 °C (V2)

Temp. [°C]	Specimen	Diameter		Thickness	Stiffness adjusted			Horizontal stress			Horizontal deformation			Vertical force		
		[mm]	[mm]		[MPa]	[MPa]	[MPa]	[kPa]	[kPa]	[kPa]	[µm]	[µm]	[µm]	[kN]	[kN]	[kN]
0 °C	V25	101,5	64,1	20759	20595	20677	1192,1	1187,8	5,0	5,0	12,18	12,14	12,67			
	V26	101,5	63,9	21911	24701	23306	1251,8	1355,3	5,0	5,0	12,75	13,81				
	V27	102,1	63,6	22019	23982	23001	1249,6	1321,7	5,0	5,0	12,82	13,56				
	V28	101,7	64,2	20745	20719	20732	1179,2	1179,5	5,0	5,0	12,03	12,03				
15 °C	V21	101,5	63,9	8218	7878	8048	441,4	420,5	5,0	5,0	4,50	4,28	4,65			
	V22	101,3	63,6	8615	7991	8303	469,3	418,4	5,1	4,9	4,75	4,23				
	V23	101,5	64,5	8989	8653	8821	485,4	461,8	5,1	5,0	4,99	4,75				
	V24	101,5	64,7	8212	7902	8057	429,8	414,5	4,9	4,9	4,42	4,28				
	V25	101,5	64,1	8655	8535	8595	462,3	443,4	5,0	4,8	4,72	4,53				
	V26	101,5	63,9	9800	9138	9469	526,5	487,9	5,0	5,0	5,36	4,97				
	V27	102,1	63,6	8830	8479	8655	465,1	452,7	4,9	5,0	4,74	4,62				
	V28	101,7	64,2	7805	7480	7643	414,1	406,0	5,0	5,0	4,25	4,16				
27 °C	V29	102,0	64,0	9298	9151	9225	497,3	491,3	5,0	5,1	5,10	5,04	1,48			
	V21	101,5	63,9	2701	2784	2743	131,4	133,1	5,1	5,0	1,34	1,36				
	V22	101,3	63,6	2964	2983	2974	139,6	135,3	4,9	4,8	1,41	1,37				
	V23	101,5	64,5	3407	3425	3416	161,8	161,9	5,0	4,9	1,66	1,66				
40 °C	V24	101,5	64,7	3147	3094	3121	142,3	153,7	4,7	5,2	1,47	1,59	0,46			
	V23	101,5	64,5	1010	1026	1018	46,0	45,5	5,1	5,0	0,47	0,47				
	V26	101,5	63,9	927	1035	981	41,7	45,6	5,0	5,0	0,42	0,46				
	V27	102,1	63,6	906	969	938	38,9	42,0	5,0	5,0	0,40	0,43				
		102,0	64,0	1050	1158	1104	48,2	50,9	5,1	5,0	0,49	0,52				

SMA L 16 S - V2 (2x50)



Tabulka 52: Moduly tuhosti na nezestárých tělesech při teplotách 0 °C, 15 °C, 27 °C a 40 °C (V3)

Temp. [°C]	Specimen	Diameter [mm]	Thickness		Stiffness adjusted				Horizontal stress			Horizontal deformation			Vertical force						
			[mm]	[mm]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[kPa]	[kPa]	[kPa]	[μm]	[μm]	[μm]	[kN]	[kN]	[kN]				
0 °C	V31	101,5	65,0	21619	20850	21235	1234,5	1192,1	1270,3	5,0	5,0	12,79	12,35	13,06	13,41	13,12	5,80				
	V32	101,5	64,1	22596	22318	22457	1275,5	1269,4	5,0	5,0	13,04	12,97									
	V33	101,8	64,5	22646	23461	23054	1271,6	1326,4	5,0	5,1	13,12	13,70									
	V34	101,5	64,2	23257	22732	22995	1310,5	1282,0	5,0	5,0	13,41	13,12									
15 °C	V31	101,5	65,0	10442	10151	10297	555,4	535,1	10623	5,0	5,0	5,76	5,55	5,59	5,58	5,84	5,60				
	V32	101,5	64,1	10568	10155	10362	547,2	545,8										4,9	5,0	5,74	5,84
	V33	101,8	64,5	10463	10587	10525	566,3	566,6										5,0	5,0	5,66	5,60
	V34	101,5	64,2	10260	10198	10229	552,9	546,6										5,1	5,0	6,12	5,66
	V35	102,9	62,6	11407	10746	11077	604,5	559,5										5,1	5,0	5,81	5,68
	V36	101,6	64,8	10520	10342	10431	561,8	549,1										5,0	5,0	6,16	5,79
	V37	101,6	64,8	11135	10571	10853	595,6	559,9										5,0	5,0	6,31	5,97
27 °C	V38	101,6	64,6	11369	11003	11186	611,8	579,5	189,1	5,0	5,1	2,06	1,92	1,94	1,87	1,95	1,95				
	V39	101,9	63,9	10921	10378	10650	575,3	553,5										5,0	5,0	5,88	5,66
	V33	101,8	64,5	3994	3719	3857	195,7	176,1										5,1	4,9	2,02	1,82
	V36	101,6	64,8	3965	4019	3992	189,5	194,7										4,9	5,0	1,96	2,01
40 °C	V37	101,6	64,8	3901	3903	3902	198,9	185,4	53,5	5,1	5,1	0,46	0,49	0,57	0,70	0,55	0,55				
	V39	101,9	63,9	3851	3890	3871	189,2	182,9										5,1	4,9	1,94	1,87
	V35	102,9	62,6	1296	1287	1292	56,0	56,1										5,0	4,9	0,59	0,57
	V37	101,6	64,8	994	1117	1056	44,4	47,8										5,0	5,0	0,46	0,49
	V38	101,6	64,6	1248	1389	1319	55,7	68,3										5,1	5,2	0,57	0,70
V39	101,9	63,9	1129	1142	1136	50,3	49,1	5,2	5,0	0,51	0,50										

SMA L 16 S - V3 (2x50)



Tabulka 53: Moduly tuhosti na nezestárých tělesech při teplotách 0 °C, 15 °C, 27 °C a 40 °C (V4)

Temp. [°C]	Specimen	Diameter [mm]		Thickness [mm]		Stiffness adjusted			Horizontal stress			Horizontal deformation			Vertical force			
		[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[kPa]	[kPa]	[kPa]	[μm]	[μm]	[μm]	[kN]	[kN]	[kN]	
0 °C	V41	101,5	64,5	20119	21556	20 838	1 189,3	1 236,5	1 212,7	5,1	5,0	12,23	12,72	12,34				
	V42	101,5	63,3	21663	21060	21 362	1 246,0	1 199,5	5,0	4,9	12,58	12,11						
	V43	101,9	63,4	21225	21587	21 406	1 214,5	1 238,2	5,0	5,0	12,32	12,56						
	V44	101,5	63,8	21157	19867	20 512	1 214,3	1 163,6	5,0	5,1	12,35	11,84						
15 °C	V41	101,5	64,5	9248	9383	9 316	501,1	507,7	544,1	5,1	5,1	5,15	5,22	5,55				
	V42	101,5	63,3	9804	9625	9 715	520,7	517,0		5,0	5,0	5,25	5,22					
	V43	101,9	63,4	10943	10555	10 749	585,7	568,3		5,1	5,0	5,94	5,67					
	V44	101,5	63,8	10284	10116	10 200	555,3	540,4		5,1	5,0	5,65	5,50					
	V45	101,5	64,7	10372	10837	10 605	555,5	591,9		5,0	5,1	5,73	6,11					
	V46	101,8	63,9	9361	9873	9 617	495,8	522,3		5,0	5,0	5,07	5,34					
	V47	102,0	64,0	10300	10773	10 537	541,2	569,5		5,0	5,0	5,55	5,84					
	V48	102,9	62,5	10134	10045	10 090	546,4	533,1		5,1	5,1	5,52	5,39					
27 °C	V49	101,4	64,3	11038	10679	10 859	573,4	578,7	177,3	4,9	5,1	5,87	5,93	1,82				
	V41	101,5	64,5	3317	3172	3 245	158,0	154,9		4,9	5,1	1,61	1,59					
	V45	101,5	64,7	3984	3912	3 948	190,7	181,3		5,0	4,9	1,97	1,87					
	V47	102,0	64,0	3593	3716	3 655	172,8	177,2		5,1	5,0	1,77	1,82					
40 °C	V49	101,4	64,3	3907	4121	4 014	185,2	198,0	53,5	4,9	5,0	1,90	2,03	0,55				
	V46	101,8	63,9	1114	1142	1 128	50,1	50,6		5,0	5,0	0,51	0,52					
	V47	102,0	64,0	1228	1100	1 164	52,8	48,9		4,9	5,1	0,54	0,50					
	V48	102,9	62,5	1270	1238	1 254	54,5	53,0		5,0	5,0	0,55	0,54					

SMA L 76 S - V4 (2x50)



Tabulka 54: Moduly tuhosti na nezestárých tělesech při teplotách 0 °C, 15 °C, 27 °C a 40 °C (V5)

Temp. [°C]	Specimen	Diameter [mm]		Thickness [mm]		Stiffness adjusted				Horizontal stress				Horizontal deformation				Vertical force			
		[mm]	[mm]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[kPa]	[kPa]	[kPa]	[kPa]	[μm]	[μm]	[μm]	[μm]	[kN]	[kN]	[kN]	[kN]		
0 °C	V51	101,4	63,5	20246	20589	20418	1178,9	11873,0	5,0	5,0	11,92	11,98	12,21	12,21	12,21	12,21	12,21	12,21	12,21		
	V52	101,3	63,7	22247	21999	22123	1259,3	1283,4	4,9	5,0	12,76	13,01									
	V53	101,5	63,1	20833	20228	20531	1212,4	1169,5	5,0	5,0	12,20	11,77									
	V54	101,8	63,4	20419	20909	20664	1191,9	1177,4	5,1	4,9	12,08	11,94									
15 °C	V51	101,4	63,5	8939	9182	9061	470,4	478,9	5,0	4,9	4,76	4,84	4,67	4,67	4,67	4,67	4,67	4,67	4,67		
	V52	101,3	63,7	9271	9452	9362	490,2	493,8	5,0	5,0	4,97	5,01									
	V53	101,5	63,1	8759	8353	8556	463,3	442,5	5,0	5,0	4,66	4,45									
	V54	101,8	63,4	8767	9643	9205	451,8	502,0	4,9	5,0	4,58	5,09									
	V55	101,3	64,3	9246	9097	9172	487,3	471,4	5,0	4,9	4,99	4,88									
	V56	101,3	63,4	8066	7971	8019	425,9	417,7	5,0	5,0	4,30	4,21									
	V57	101,4	64,4	8433	8717	8575	446,8	444,6	5,0	4,9	4,58	4,46									
	V58	101,6	64,0	8906	8060	8483	459,7	421,4	4,9	5,0	4,70	4,30									
27 °C	V59	101,9	64,0	8901	8260	8581	467,4	436,6	5,0	5,0	4,79	4,47	1,39	1,39	1,39	1,39	1,39	1,39	1,39		
	V55	101,3	64,3	3217	2943	3080	149,1	136,3	4,9	5,0	1,53	1,39									
	V56	101,3	63,4	2910	2835	2873	136,7	130,3	5,0	4,9	1,38	1,31									
	V57	101,4	64,4	2750	2726	2738	127,6	131,0	5,1	5,1	1,31	1,34									
40 °C	V58	101,6	64,0	3161	2905	3033	144,5	134,3	4,9	5,0	1,48	1,37	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34		
	V53	101,5	63,1	738	726	732	32,3	32,3	5,0	5,0	0,33	0,33									
	V55	101,3	64,3	947	838	893	40,7	36,1	4,9	5,0	0,42	0,37									
	V57	101,4	64,4	753	683	718	33,1	29,5	5,1	5,0	0,34	0,30									
		V59	101,9	64,0	745	642	694	35,4	27,3	5,2	5,0	0,36	0,28								

SMA L 76 S - V5 (2x50)



Tabulka 55: Moduly tuhosti na nezestárých tělesech při teplotách 0 °C, 15 °C, 27 °C a 40 °C (V6)

Temp. [°C]	Specimen	Diameter		Thickness	Stiffness adjusted				Horizontal stress			Horizontal deformation			Vertical force			
		[mm]	[mm]		[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[kPa]	[kPa]	[kPa]	[μm]	[μm]	[μm]	[kN]	[kN]	[kN]	
0 °C	V61	101,7	61,8	21187	20934	21061	1214,8	1191,8	5,0	4,9	11,99	11,77	12,03	5,0	5,0	12,42	12,16	
	V62	101,4	62,1	21731	21087	21409	1255,8	1229,8	5,0	5,0	12,42	12,16						
	V63	101,6	61,9	21731	21168	21450	1246,4	1217,6	4,9	5,0	12,31	12,03						
	V64	101,9	62,1	20344	20654	20499	1178,7	1192,4	5,0	5,0	11,72	11,85						
15 °C	V61	101,7	61,8	9101	9587	9344	475,7	500,6	5,0	5,0	4,70	4,94	4,92	5,0	5,0	5,14	5,25	
	V62	101,4	62,1	9800	9970	9885	519,6	530,3	5,0	5,0	5,14	5,25						
	V63	101,6	61,9	9112	9781	9447	484,9	515,1	5,0	5,0	4,79	5,09						
	V64	101,9	62,1	8698	9315	9007	461,2	489,0	5,0	5,0	4,58	4,86						
	V65	101,6	62,6	9276	8868	9072	492,2	468,2	5,0	5,0	4,92	4,68						
	V66	101,5	62,2	9746	9805	9776	516,5	520,0	5,0	5,0	5,12	5,16						
	V67	102,7	60,4	9329	9334	9332	493,5	485,7	5,0	5,0	4,81	4,73						
	V68	101,2	62,5	9587	8997	9292	512,8	477,0	5,0	5,0	5,09	4,74						
27 °C	V69	101,4	61,5	9669	10508	10089	516,4	505,5	5,0	4,9	5,06	4,88	5,0	5,0	1,73	1,59	1,57	
	V65	101,6	62,6	2927	3095	3011	137,5	147,2	5,1	5,1	1,37	1,47						
	V66	101,5	62,2	3484	3504	3494	160,1	161,0	4,9	4,9	1,59	1,60						
	V67	102,7	60,4	3512	3632	3572	162,5	168,1	5,0	5,0	1,58	1,64						
40 °C	V68	101,2	62,5	3651	3396	3524	173,9	159,7	5,1	5,0	1,73	1,59	5,0	5,0	0,46	0,40	0,42	
	V63	101,6	61,9	1078	946	1012	46,9	40,8	5,1	5,1	0,46	0,40						
	V65	101,6	62,6	787	782	785	35,2	35,4	5,0	5,0	0,35	0,35						
	V67	102,7	60,4	1081	946	1014	45,6	40,6	5,0	5,1	0,44	0,40						
SMA L 16 S - V6 (2x50)																		



Tabulka 56: Moduly tuhosti na nezestárých tělesech při teplotách 0 °C, 15 °C, 27 °C a 40 °C (ACL 16 S)

Temp. [°C]	Specimen	Diameter [mm]	Thickness [mm]	Stiffness adjusted			Horizontal stress			Horizontal deformation			Vertical force		
				[MPa]	[MPa]	[MPa]	[kPa]	[kPa]	[kPa]	[μm]	[μm]	[μm]	[kN]	[kN]	[kN]
0 °C	1	101,4	63,1	26419	26506	26 463	1 406,8	1 406,9	1 406,4	5,0	5,0	14,14	14,14	14,14	
	2	101,4	63,7	24846	25468	25 157	1 361,0	1 376,8	1 406,4	5,0	5,0	13,81	13,97	14,25	
	3	101,4	64,1	27941	27302	27 622	1 416,7	1 406,9	1 406,4	5,0	5,0	14,44	14,36	14,25	
	4	101,3	63,6	29395	30675	30 035	1 429,9	1 445,9	1 406,4	4,9	5,0	14,47	14,63	14,25	
15 °C	1	101,4	63,1	14114	13734	13 924	746,1	429,3	710,3	5,0	5,0	7,50	7,33	7,37	
	2	101,4	63,7	13912	13465	13 689	725,1	711,1	710,3	4,9	5,0	7,36	7,21	7,37	
	3	101,4	64,1	14364	14698	14 531	758,1	765,6	710,3	5,0	4,9	7,74	7,82	7,37	
	4	101,3	63,6	15276	14833	15 055	805,3	787,1	710,3	5,0	5,0	8,15	7,97	7,37	
	5	101,4	63,9	12473	12606	12 540	661,6	668,5	710,3	5,0	5,0	6,73	6,80	7,37	
	6	101,6	63,0	13934	12908	13 421	732,1	683,1	710,3	5,0	5,0	7,36	6,87	7,37	
	7	101,3	63,0	13794	13601	13 698	729,1	724,1	710,3	5,0	5,0	7,31	7,26	7,37	
	8	101,4	64,2	13584	13881	13 733	725,7	746,0	710,3	5,0	5,1	7,42	7,63	7,37	
27 °C	9	101,4	63,9	13282	12836	13 059	708,3	679,5	710,3	5,0	5,0	7,21	6,92	7,37	
	1	101,4	63,1	6329	6105	6 217	299,6	293,1	296,5	5,0	5,0	3,01	2,95	3,01	
	2	101,4	63,7	6169	5753	5 961	300,2	279,0	296,5	5,0	5,0	3,05	2,83	3,01	
	3	101,4	64,1	6824	6449	6 637	321,2	312,5	296,5	4,9	5,0	3,28	3,19	3,01	
	5	101,4	63,9	6107	5889	5 998	291,9	274,6	296,5	5,0	4,9	2,97	2,79	3,01	
40 °C	6	101,6	63,0	2059	1971	2 015	88,9	86,1	95,7	5,0	5,0	0,85	0,84	0,96	
	7	101,3	63,0	2491	2503	2 497	112,2	108,9	95,7	5,1	5,0	1,10	1,09	0,96	
	8	101,4	64,2	2258	2070	2 164	97,2	90,1	95,7	5,0	5,0	0,99	0,92	0,96	
	9	101,4	63,9	2151	2085	2 118	92,9	89,0	95,7	5,0	5,0	0,95	0,91	0,96	

ACL 16 S (2x75)



Tabulka 57: Moduly tuhosti na zestárých tělesech při teplotě 15 °C (varianty V1, V2, V3 a V4)

Temp. [°C]	Specimen	Diameter		Thickness [mm]	Stiffness adjusted			Horizontal stress			Horizontal deformation			Vertical force		
		[mm]	[mm]		[MPa]	[MPa]	[MPa]	[kPa]	[kPa]	[kPa]	[µm]	[µm]	[µm]	[kN]	[kN]	[kN]
15 °C	SMA L 16 S - V1 (2x50)	101,2	101,2	11331	10470	10 901	578,6	536,5	4,9	4,9	5,79	5,37	5,20	5,79	5,37	5,20
		101,2	101,2	10962	9546	10 254	573,4	503,3	5,1	5,0	5,83	5,11				
		101,2	101,2	10283	9752	10 018	532,4	511,3	4,9	5,0	5,35	5,17				
		101,6	101,6	10174	9615	9 895	534,8	496,9	5,0	5,0	5,34	4,96				
		101,5	101,5	9605	9293	9 449	507,1	484,0	5,1	5,0	5,08	4,85				
		101,7	101,7	9443	9200	9 322	491,5	466,5	5,0	4,9	4,89	4,64				
		101,3	101,3	9870	9373	9 622	513,3	501,5	5,0	5,1	5,20	5,07				
15 °C	SMA L 16 S - V2 (2x50)	101,5	101,5	11139	11637	11 388	597,3	501,4	5,1	5,0	6,14	6,18	5,0	5,77	5,58	5,65
		101,5	101,5	10632	10221	10 427	559,6	540,5	5,0	5,0	5,77	5,58				
		102,1	102,1	10057	10483	10 270	515,1	552,0	4,9	5,1	5,25	5,63				
		101,7	101,7	10171	10166	10 169	536,2	534,4	5,0	5,0	5,50	5,48				
		102,0	102,0	11605	11004	11 305	605,7	559,8	5,0	4,9	6,21	5,74				
		101,5	101,5	12238	12506	12 372	639,2	653,6	5,0	5,0	6,53	6,68				
		101,8	101,8	12334	12776	12 555	644,2	629,9	5,0	4,9	6,64	6,50				
15 °C	SMA L 16 S - V3 (2x50)	101,5	101,5	11525	11141	11 333	606,3	586,5	5,0	5,0	6,21	6,00	5,0	6,21	6,00	6,48
		102,9	102,9	13200	11829	12 515	683,6	600,9	5,0	5,0	6,92	6,08				
		101,6	101,6	13205	12601	12 903	681,4	665,4	4,9	5,0	7,02	6,86				
		101,9	101,9	11944	10868	11 406	633,1	567,1	5,1	5,0	6,48	5,80				
		101,5	101,5	11076	12675	11 876	581,0	659,5	5,0	5,0	5,97	6,78				
		101,5	101,5	11521	11518	11 520	616,2	607,8	5,1	5,0	6,22	6,13				
		101,5	101,5	11797	11463	11 630	614,8	621,1	5,0	5,1	6,25	6,32				
15 °C	SMA L 16 S - V4 (2x50)	101,8	101,8	11300	11899	11 600	587,1	611,3	5,0	4,9	6,00	6,25	5,0	6,00	6,25	6,09
		102,0	102,0	10815	10476	10 646	566,5	534,5	5,0	4,9	5,81	5,48				
		102,9	102,9	11640	11211	11 426	600,6	574,7	5,0	4,9	6,07	5,81				



Tabulka 58: Moduly tuhosti na zestárých tělesech při teplotě 15 °C (varianty V5 a V6, referenční směs ACL 16 S)

Temp. [°C]	Specimen	Diameter [mm]	Thickness [mm]	Stiffness adjusted			Horizontal stress			Horizontal deformation			Vertical force		
				[MPa]	[MPa]	[MPa]	[kPa]	[kPa]	[kPa]	[μm]	[μm]	[μm]	[kN]	[kN]	[kN]
15 °C	SMA L 16 S - V5 (2x50)	V54	101,8	63,4	11064	10614	10839	570,4	540,6	570,4	5,0	4,9	5,78	5,48	5,48
		V55	101,3	64,3	11078	10730	10904	588,2	572,8	588,2	5,1	5,1	6,02	5,86	
		V56	101,3	63,4	10026	9670	9848	526,0	507,0	526,0	5,0	5,0	5,31	5,11	
		V57	101,4	64,4	9617	9835	9726	499,7	515,8	499,7	5,0	5,0	5,13	5,29	
		V58	101,6	64,0	10490	10548	10519	543,3	554,2	543,3	4,9	5,0	5,55	5,66	
		V59	101,9	64,0	10015	9745	9880	524,9	507,6	524,9	5,0	5,0	5,38	5,20	
		V64	101,9	62,1	10836	10604	10720	574,4	545,1	574,4	5,1	5,0	5,71	5,42	
		V65	101,6	62,6	10089	9378	9734	530,2	483,2	530,2	5,0	4,9	5,30	4,79	
		V66	101,5	62,2	10130	10103	10117	541,6	532,8	541,6	5,1	5,0	5,37	5,28	
15 °C	SMA L 16 S - V6 (2x50)	V67	102,7	60,4	10326	10238	10282	534,0	526,5	534,0	5,0	5,0	5,20	5,13	5,33
		V68	101,2	62,5	10289	10071	10180	538,0	523,9	538,0	5,0	5,0	5,34	5,21	
		V69	101,4	61,5	10938	10675	10807	577,9	567,4	577,9	5,0	5,1	5,66	5,56	
		1	101,4	63,1	16360	15505	15933	851,6	795,9	851,6	5,0	4,9	8,55	7,99	
		2	101,4	63,7	15653	14407	15030	824,9	751,4	824,9	5,1	5,0	8,37	7,62	
		4	101,3	63,6	17220	16673	16947	893,6	876,2	893,6	5,0	5,0	9,04	8,87	
		5	101,4	63,9	15719	15457	15588	832,8	805,8	832,8	5,1	5,0	8,48	8,20	
		7	101,3	63,0	17305	17372	17339	891,1	908,4	891,1	4,9	5,0	8,93	9,11	
		9	101,4	63,9	15904	15966	15935	848,5	765,1	848,5	5,1	4,9	8,64	7,79	
15 °C	ACL 16 S (2x75)														



Tabulka 59: Rozměry těles pro zkoušku šíření trhliny ohybem (0 °C, nezestárlé)

		b [mm]	b [mm]	b [mm]	Šířka [mm]	l [mm]	l [mm]	Délka [mm]	h [mm]	h [mm]	Výška [mm]
SMA L 16 S - V1 (2x50)	V131	52,52	53,35	53,48	53,12	101,47	101,11	101,29	49,83	49,73	49,78
	V132	52,13	53,03	52,16	52,44	101,15	101,36	101,26	48,92	48,88	48,90
	V181	52,37	54,03	52,57	52,99	102,34	100,54	101,44	49,46	49,56	49,51
	V182	54,02	52,42	53,45	53,30	102,08	102,15	102,12	50,01	49,64	49,83
	V191	52,68	52,83	53,86	53,12	102,17	102,98	102,58	50,29	50,70	50,50
	V192	52,53	52,55	51,49	52,19	101,33	102,06	101,70	49,00	49,11	49,06
SMA L 16 S - V2 (2x50)	V211	50,54	50,70	50,99	50,74	100,98	100,80	100,89	48,89	49,21	49,05
	V212	49,72	49,96	49,46	49,71	100,81	100,70	100,76	49,03	49,28	49,16
	V251	49,83	50,82	50,30	50,32	100,57	100,69	100,63	47,65	47,97	47,81
	V252	50,50	50,04	50,33	50,29	101,08	99,95	100,52	49,90	49,74	49,82
	V261	50,23	50,81	51,22	50,75	100,85	100,90	100,88	48,51	48,97	48,74
	V262	50,23	50,59	49,95	50,26	101,04	100,42	100,73	49,56	49,28	49,42
SMA L 16 S - V3 (2x50)	V311	52,28	53,67	52,74	52,90	100,67	100,88	100,78	48,32	48,21	48,27
	V312	52,81	53,81	53,54	53,39	101,06	100,84	100,95	49,93	49,69	49,81
	V361	48,68	50,93	50,05	49,89	101,00	100,70	100,85	49,98	50,06	50,02
	V362	48,82	50,72	48,93	49,49	100,17	100,62	100,40	48,12	47,77	47,95
	V371	49,93	51,11	50,70	50,58	101,39	100,09	100,74	49,09	49,52	49,31
	V372	49,33	50,55	49,70	49,86	101,21	100,73	100,97	48,92	48,89	48,91
SMA L 16 S - V4 (2x50)	V431	49,49	51,48	50,32	50,43	100,36	100,99	100,68	48,43	48,43	48,43
	V432	50,10	51,30	50,64	50,68	101,05	100,76	100,91	49,91	49,94	49,93
	V451	49,16	50,08	49,18	49,47	100,95	100,95	100,95	49,35	49,69	49,52
	V452	49,95	50,07	50,63	50,22	100,68	100,65	100,67	48,46	48,93	48,70
	V491	50,18	49,39	49,89	49,82	100,44	100,86	100,65	48,15	48,14	48,15
	V492	50,24	49,12	50,30	49,89	100,83	100,84	100,84	49,85	49,91	49,88
SMA L 16 S - V5 (2x50)	V511	52,10	50,77	51,24	51,37	101,20	100,75	100,98	49,51	49,46	49,49
	V512	51,64	50,21	50,02	50,62	100,36	101,06	100,71	47,96	48,01	47,99
	V521	50,97	52,12	51,63	51,57	100,83	100,59	100,71	48,66	48,86	48,76
	V522	50,10	51,38	49,94	50,47	101,13	100,20	100,67	48,54	48,25	48,40
	V531	50,01	47,77	46,37	48,05	102,15	102,11	102,13	51,53	50,92	51,23
	V532	50,66	48,97	49,72	49,78	101,25	100,80	101,03	47,07	46,87	46,97
SMA L 16 S - V6 (2x50)	V611	51,68	50,66	49,30	50,55	100,61	100,95	100,78	45,82	47,28	46,55
	V612	51,01	52,11	51,52	51,55	101,53	101,01	101,27	50,85	50,97	50,91
	V621	50,98	51,91	51,07	51,32	101,48	101,42	101,45	50,28	50,92	50,60
	V622	50,68	51,37	50,07	50,71	100,97	101,05	101,01	46,99	47,50	47,25
	V631	51,49	51,30	51,51	51,43	101,41	101,61	101,51	50,14	50,12	50,13
	V632	51,05	50,80	49,57	50,47	100,87	101,05	100,96	47,68	46,75	47,22
ACL 16 S (2x50)	31	51,02	49,57	49,53	50,04	101,42	101,45	101,44	49,13	48,93	49,03
	32	50,90	51,24	51,37	51,17	101,22	101,30	101,26	48,80	49,01	48,91
	61	52,26	51,25	51,12	51,54	101,56	101,43	101,50	49,48	49,10	49,29
	62	49,67	50,85	49,42	49,98	101,28	101,33	101,31	48,86	48,81	48,84
	81	49,24	51,01	50,98	50,41	101,66	101,46	101,56	49,36	49,31	49,34
	82	48,79	50,92	48,88	49,53	101,60	101,33	101,47	48,65	48,67	48,66



Tabulka 60: Výsledky zkoušky šíření trhliny (0 °C, nezestárlé; V1, V2, V3, V4) – 1/2

	Datalogger		Lis		Porovnání hodnot (datalogger/lis)		Průměrná hodnota (do výpočtu)		Teplota zkoušení [°C]	Rychlost zatěžování [mm/min]	Hloubka drážky [mm]	Přetvoření $\epsilon_{max,i}$ [%]		Napětí při porušení $\sigma_{max,i}$ [MPa]	
	Deformace [mm]	Síla [kN]	Deformace [mm]	Síla [kN]	Deformace [mm]	Síla [kN]	Deformace [mm]	Síla [kN]							
SMA L 16 S - V1 (2x50)	V131	0,77	8,78	0,96	8,77	100,1%	80,2%	0,87	8,78	2,10	10	1,74%	6,95	2,09%	6,95
	V132	0,83	8,07	0,91	8,06	100,1%	91,2%	0,87	8,07	2,26	10	1,78%	6,48		
	V181	0,79	9,09	0,94	9,05	100,4%	84,0%	0,87	9,07	2,15	10	1,75%	7,19		
	V182	1,15	8,00	1,27	7,99	100,1%	90,6%	1,21	8,00	2,38	10	2,43%	6,26		
	V191	1,43	8,38	1,62	8,30	101,0%	88,3%	1,53	8,34	2,20	10	3,02%	6,52		
	V192	0,83	6,69	0,97	6,67	100,3%	85,6%	0,90	6,68	2,17	10	1,83%	5,37		
SMA L 16 S - V2 (2x50)	V211	2,78	8,61	2,81	8,58	100,3%	98,9%	2,80	8,60	2,49	10	5,70%	7,16	2,53%	7,16
	V212	0,90	7,57	1,05	7,48	101,2%	85,7%	0,98	7,53	2,16	10	1,98%	6,40		
	V251	0,50	6,27	0,62	6,26	100,2%	80,6%	0,56	6,27	2,14	10	1,17%	5,27		
	V252	1,56	8,20	1,67	8,19	100,1%	93,4%	1,62	8,20	2,40	10	3,24%	6,91		
	V261	0,77	8,10	0,90	8,05	100,6%	85,6%	0,84	8,08	2,20	10	1,71%	6,72		
	V262	0,62	8,11	0,76	8,09	100,2%	81,6%	0,69	8,10	2,19	10	1,40%	6,82		
SMA L 16 S - V3 (2x50)	V311	0,70	6,65	0,75	6,62	100,5%	93,3%	0,73	6,64	2,33	10	1,50%	5,31	2,20%	5,31
	V312	0,70	6,47	0,79	6,51	99,4%	88,6%	0,75	6,49	2,33	10	1,50%	5,13		
	V361	0,54	7,65	0,71	7,64	100,1%	76,1%	0,63	7,65	2,03	10	1,25%	6,48		
	V362	0,99	8,34	1,15	8,31	100,4%	86,1%	1,07	8,33	2,20	10	2,23%	7,14		
	V371	1,66	7,63	1,68	7,57	100,8%	98,8%	1,67	7,60	2,49	10	3,39%	6,36		
	V372	1,60	6,13	1,68	6,08	100,8%	95,2%	1,64	6,11	2,40	10	3,35%	5,17		
SMA L 16 S - V4 (2x50)	V431	1,08	6,81	1,18	6,72	101,3%	91,5%	1,13	6,77	2,31	10	2,33%	5,68	2,08%	5,68
	V432	0,81	8,20	0,95	8,15	100,6%	85,3%	0,88	8,18	2,21	10	1,76%	6,81		
	V451	0,60	6,77	0,69	6,72	100,7%	87,0%	0,65	6,75	2,25	10	1,30%	5,76		
	V452	0,93	8,02	1,01	7,97	100,6%	92,1%	0,97	8,00	2,33	10	1,99%	6,74		
	V491	1,14	7,65	1,20	7,61	100,5%	95,0%	1,17	7,63	2,36	10	2,43%	6,49		
	V492	1,25	7,65	1,38	7,60	100,7%	90,6%	1,32	7,63	2,34	10	2,64%	6,46		



Tabulka 61: Výsledky zkoušky šíření trhliny (0 °C, nezestárlé; V1, V2, V3, V4) – 2/2

	ČSN EN 12697-44 (2011)				ČSN EN 12697-44 (2016)				Rozdíl od průměru	Energie do maximální hodnoty [J]	Směrodatná odchylka	Celková energie zkoušky [J]	Směrodatná odchylka
	Faktor f(ai/Wi) [-]	Kritická hodnota Kic,i [N/mm ^{3/2}]	Rozdíl od průměru	Faktor f(ai/Wi) [-]	Kritická hodnota Kic,i [N/mm ^{3/2}]	Rozdíl od průměru	Energie do maximální hodnoty [J]	Směrodatná odchylka					
SMA L 16 S - V1 (2x50)	V131	7,385	51,3	107%	1,231	48,0	108%	3,529	4,839	0,476	6,158	1,597	
	V132	7,446	48,2	101%	1,230	44,6	100%	3,493	5,731				
	V181	7,404	53,3	111%	1,230	49,6	111%	3,504	3,761				
	V182	7,382	46,2	97%	1,231	43,2	97%	4,189	6,667				
	V191	7,336	47,9	100%	1,231	45,0	101%	4,450	8,595				
	V192	7,435	39,9	83%	1,230	37,0	83%	3,030	7,358				
SMA L 16 S - V2 (2x50)	V211	7,436	53,2	109%	1,230	49,3	109%	7,960	13,582	2,124	6,480	3,194	
	V212	7,428	47,6	98%	1,230	44,2	98%	2,837	5,252				
	V251	7,523	39,7	81%	1,228	36,3	80%	1,378	4,417				
	V252	7,382	51,0	105%	1,231	47,7	106%	4,904	5,532				
	V261	7,457	50,1	103%	1,230	46,3	103%	2,993	4,942				
	V262	7,410	50,5	104%	1,230	47,0	104%	2,754	5,157				
SMA L 16 S - V3 (2x50)	V311	7,491	39,7	90%	1,229	36,6	89%	2,050	4,098	1,115	6,333	1,670	
	V312	7,383	37,9	86%	1,231	35,4	87%	2,785	4,871				
	V361	7,369	47,7	108%	1,231	44,7	109%	1,920	6,295				
	V362	7,513	53,7	122%	1,229	49,2	120%	3,734	5,901				
	V371	7,418	47,2	107%	1,230	43,8	107%	4,898	7,815				
	V372	7,446	38,5	87%	1,230	35,6	87%	4,292	9,018				
SMA L 16 S - V4 (2x50)	V431	7,479	42,5	90%	1,229	39,1	90%	4,079	7,975	0,708	6,076	1,618	
	V432	7,375	50,3	107%	1,231	47,0	108%	3,263	5,567				
	V451	7,403	42,6	91%	1,230	39,7	91%	2,193	3,589				
	V452	7,460	50,3	107%	1,230	46,5	107%	3,078	4,569				
	V491	7,499	48,6	104%	1,229	44,7	102%	3,822	7,420				
	V492	7,378	47,7	101%	1,231	44,6	102%	4,298	7,333				



Tabulka 62: Výsledky zkoušky šíření trhliny (0 °C, nezestárlé; V5, V6, ACL 16 S) – 1/2

	Datalogger		Lis		Porovnání hodnot (datalogger/lis)		Průměrná hodnota (do výpočtu)		Teplota zkoušení [°C]	Rychlost zařezávání [mm/min]	Hloubka drážky [mm]	Převorení $\epsilon_{max,i}$ [%]	Napětí při porušení $\sigma_{max,i}$ [MPa]	
	Deformace [mm]	Síla [kN]	Deformace [mm]	Síla [kN]	Deformace [mm]	Síla [kN]	Deformace [mm]	Síla [kN]						
SMA L 16 S - V5 (2x50)	V511	0,72	7,69	0,74	7,66	100,4%	0,73	7,68	0 °C	2,40	10	1,48%	6,31	6,30
	V512	0,64	7,56	0,79	8,52	81,0%	0,72	8,04		2,13	10	1,49%	6,72	
	V521	0,57	8,86	0,72	8,82	79,2%	0,65	8,84		2,01	10	1,32%	7,26	
	V522	0,78	7,70	0,83	7,65	94,0%	0,81	7,68		2,34	10	1,66%	6,44	
	V531	0,59	7,23	0,71	7,18	83,1%	0,65	7,21		2,08	10	1,27%	6,26	
	V532	1,33	5,66	1,53	5,64	86,9%	1,43	5,65		2,57	10	3,04%	4,79	
SMA L 16 S - V6 (2x50)	V611	0,58	6,95	0,74	6,87	78,4%	0,66	6,91	0 °C	2,05	10	1,42%	5,78	6,95
	V612	0,72	10,24	0,80	10,17	90,0%	0,76	10,21		2,16	10	1,49%	8,33	
	V621	0,76	8,63	0,97	8,53	78,4%	0,87	8,58		1,98	10	1,71%	7,03	
	V622	0,81	7,38	0,84	7,32	96,4%	0,83	7,35		2,31	10	1,75%	6,12	
	V631	0,56	9,64	0,71	9,58	78,9%	0,64	9,61		2,10	10	1,27%	7,85	
	V632	0,61	7,93	0,69	7,89	88,4%	0,65	7,91		2,29	10	1,38%	6,62	
ACL 16 S (2x75)	31	0,76	6,37	0,83	6,28	91,6%	0,80	6,33	0 °C	2,17	10	1,62%	5,31	5,16
	32	0,65	6,96	0,71	6,91	91,5%	0,68	6,94		2,29	10	1,39%	5,71	
	61	0,70	7,30	0,78	7,21	89,7%	0,74	7,26		2,33	10	1,50%	5,91	
	62	0,37	5,73	0,44	5,56	84,1%	0,41	5,65		2,02	10	0,83%	4,75	
	81	0,39	4,61	0,39	4,50	100,0%	0,39	4,56		2,34	10	0,79%	3,79	
	82	0,46	6,48	0,48	6,41	95,8%	0,47	6,45		2,51	10	0,97%	5,47	



Tabulka 63: Výsledky zkoušky šíření trhliny (0 °C, nezestárlé; V5, V6, ACL 16 S) – 2/2

	ČSN EN 12697-44 (2011)				ČSN EN 12697-44 (2016)				Energie do maximální hodnoty [J]	Směrodatná odchylka	Celková energie zkoušky [J]	Směrodatná odchylka
	Faktor (f _{ai} /W _i) [-]	Kritická hodnota K _{ic,i} [N/mm ^{3/2}]	Rozdíl od průměru	Faktor (f _{ai} /W _i) [-]	Kritická hodnota K _{ic,i} [N/mm ^{3/2}]	Rozdíl od průměru	Energie do maximální hodnoty [J]					
SMA L 16 S - V5 (2x50)	V511	7,406	46,7	100%	1,230	43,5	100%	2,204	2,385	2,736	3,594	0,819
	V512	7,511	50,5	108%	1,229	46,3	107%	1,960				
	V521	7,456	54,1	115%	1,230	50,0	115%	2,394				
	V522	7,482	48,2	103%	1,229	44,4	102%	2,815				
	V531	7,287	45,6	97%	1,231	43,2	100%	1,897				
	V532	7,583	36,3	77%	1,227	32,9	76%	3,042				
SMA L 16 S - V6 (2x50)	V611	7,614	44,0	85%	1,226	39,7	83%	1,682	2,434	2,366	3,212	0,833
	V612	7,308	60,9	118%	1,231	57,5	120%	3,286				
	V621	7,329	51,5	99%	1,231	48,5	101%	3,227				
	V622	7,563	46,3	89%	1,228	42,1	88%	2,150				
	V631	7,361	57,8	112%	1,231	54,1	113%	2,541				
	V632	7,566	50,1	97%	1,228	45,5	95%	1,718				
ACL 16 S (2x75)	31	7,437	39,5	103%	1,230	36,6	103%	2,302	1,448	2,974	2,263	0,541
	32	7,446	42,5	111%	1,230	39,3	111%	1,642				
	61	7,419	43,9	114%	1,230	40,8	115%	1,591				
	62	7,451	35,4	92%	1,230	32,8	92%	1,028				
	81	7,416	28,1	73%	1,230	26,2	74%	0,785				
	82	7,463	40,8	106%	1,230	37,7	106%	1,343				



Tabulka 64: Rozměry těles pro zkoušku šíření trhliny ohybem (0 °C, zestárlé)

		b [mm]	b [mm]	b [mm]	Šířka [mm]	l [mm]	l [mm]	Délka [mm]	h [mm]	h [mm]	Výška [mm]
SMA L 16 S - V1 (2x50)	V151	50,86	50,44	50,17	50,49	101,60	101,61	101,61	48,87	48,18	48,53
	V152	51,11	51,00	51,65	51,25	101,86	101,30	101,58	49,57	49,34	49,46
	V161	51,12	50,81	50,44	50,79	100,94	101,59	101,27	49,44	49,54	49,49
	V162	51,34	51,59	50,88	51,27	100,70	101,48	101,09	48,24	48,56	48,40
	V171	50,79	49,54	48,89	49,74	101,28	100,68	100,98	49,14	48,87	49,01
	V172	50,95	49,13	51,06	50,38	101,68	101,74	101,71	48,92	48,12	48,52
SMA L 16 S - V2 (2x50)	V221	51,92	51,42	52,17	51,84	101,23	101,54	101,39	49,82	49,85	49,84
	V222	51,14	51,09	49,82	50,68	101,24	101,46	101,35	48,21	48,53	48,37
	V231	51,12	51,78	51,78	51,56	101,78	101,55	101,67	49,51	49,78	49,65
	V232	50,23	51,52	49,60	50,45	101,39	101,28	101,34	48,23	48,36	48,30
	V241	50,84	49,66	49,26	49,92	99,29	101,30	100,30	48,71	48,69	48,70
	V242	50,95	51,64	52,02	51,54	101,51	101,63	101,57	49,78	49,34	49,56
SMA L 16 S - V3 (2x50)	V321	50,81	51,20	50,19	50,73	101,47	101,60	101,54	48,22	48,21	48,22
	V322	51,50	51,49	51,56	51,52	101,56	101,60	101,58	49,80	49,57	49,69
	V331	52,06	50,06	50,99	51,04	101,98	101,52	101,75	49,38	48,65	49,02
	V332	50,61	52,19	51,44	51,41	102,17	102,02	102,10	49,94	49,34	49,64
	V341	50,73	51,99	51,30	51,34	101,61	101,37	101,49	49,17	49,51	49,34
	V342	51,29	52,55	52,44	52,09	101,31	101,14	101,23	48,63	49,10	48,87
SMA L 16 S - V4 (2x50)	V411	51,01	51,63	51,52	51,39	101,52	101,56	101,54	49,04	49,36	49,20
	V412	51,76	50,89	50,52	51,06	101,88	101,97	101,93	49,15	19,16	34,16
	V421	51,29	50,19	50,09	50,52	101,15	101,53	101,34	49,17	49,58	49,38
	V422	52,09	50,77	51,77	51,54	101,14	101,50	101,32	48,76	49,84	49,30
	V441	50,84	51,97	51,75	51,52	101,70	101,16	101,43	50,23	49,40	49,82
	V442	50,74	51,86	50,13	50,91	101,19	101,32	101,26	48,03	48,45	48,24
SMA L 16 S - V5 (2x50)	V541	50,88	51,74	51,68	51,43	101,81	101,74	101,78	49,02	49,44	49,23
	V542	50,36	50,83	49,81	50,33	101,94	102,05	102,00	49,73	49,96	49,85
	V551	49,57	51,77	50,11	50,48	101,43	101,62	101,53	48,81	48,75	48,78
	V552	49,77	51,81	51,57	51,05	100,89	100,55	100,72	49,36	49,05	49,21
	V561	52,08	51,15	51,78	51,67	101,75	101,66	101,71	50,20	50,69	50,45
	V562	50,98	51,60	50,70	51,09	101,08	100,94	101,01	48,65	48,11	48,38
SMA L 16 S - V6 (2x50)	V641	49,68	51,57	49,77	50,34	101,95	101,77	101,86	50,05	49,23	49,64
	V642	52,18	50,28	51,78	51,41	101,68	102,04	101,86	49,87	49,69	49,78
	V651	51,22	51,79	52,03	51,68	101,75	101,39	101,57	50,40	51,34	50,87
	V652	50,86	51,74	50,53	51,04	101,74	101,23	101,49	47,67	47,83	47,75
	V661	50,92	51,12	49,76	50,60	101,20	101,48	101,34	48,26	48,66	48,46
	V662	51,79	51,59	52,14	51,84	101,26	101,64	101,45	49,64	50,18	49,91
ACL 16 S (2x75)	11	51,71	51,20	51,66	51,52	101,54	101,65	101,60	49,89	49,72	49,81
	12	52,52	50,75	50,56	51,28	101,19	101,34	101,27	48,37	48,73	48,55
	21	51,77	50,63	50,77	51,06	101,03	101,41	101,22	47,81	48,07	47,94
	22	50,59	51,69	51,46	51,25	101,66	101,62	101,64	50,27	50,67	50,47
	41	51,58	50,87	50,69	51,05	101,38	101,33	101,36	48,89	49,19	49,04
42	51,87	51,35	51,96	51,73	101,53	101,51	101,52	49,42	49,29	49,36	



Tabulka 65: Výsledky zkoušky šíření trhliny (0 °C, zestárlé; V1, V2, V3, V4) – 1/2

	Datalogger		Lis		Porovnání hodnot (datalogger/lis)		Průměrná hodnota (do výpočtu)		Teplota zkoušení [°C]	Rychlost zatléžování [mm/min]	Hloubka drážky [mm]	Přetvoření emaxi [%]		Napětí při porušení emaxi [MPa]	
	Deformace [mm]	Síla [kN]	Deformace [mm]	Síla [kN]	Deformace [mm]	Síla [kN]	Deformace [mm]	Síla [kN]							
SMA L 16 S - V1 (2x50)	V151	1.12	7.55	1.13	7.50	99.1%	100.7%	1.13	7.53	0 °C	10	2.32%	6.25	6.80	
	V152	0.35	5.96	0.43	5.96	81.4%	100.0%	0.39	5.96		10	0.79%	4.88		
	V161	0.88	7.64	0.86	7.65	102.3%	99.9%	0.87	7.65		10	1.76%	6.34		
	V162	1.19	9.86	1.37	9.76	86.9%	101.0%	1.28	9.81		10	2.64%	8.07		
	V171	0.56	8.95	0.63	8.85	88.9%	101.1%	0.60	8.90		10	1.21%	7.55		
	V172	0.61	9.28	0.70	9.26	87.1%	100.2%	0.66	9.27		10	1.35%	7.71		
	V221	0.96	9.66	0.93	9.52	103.2%	101.5%	0.95	9.59		10	1.90%	7.78		
SMA L 16 S - V2 (2x50)	V222	0.58	7.63	0.58	7.55	100.0%	101.1%	0.58	7.59	0 °C	10	1.20%	6.30	7.85	
	V231	0.81	10.38	0.86	10.25	94.2%	101.3%	0.84	10.32		10	1.68%	8.39		
	V232	0.90	10.38	0.90	10.21	100.0%	101.7%	0.90	10.30		10	1.86%	8.58		
	V241	0.81	9.31	0.81	9.21	100.0%	101.1%	0.81	9.26		10	1.66%	7.88		
	V242	1.26	10.08	0.81	9.90	155.6%	101.8%	1.04	9.99		10	2.09%	8.14		
	V321	0.59	8.83	0.67	8.69	88.1%	101.6%	0.63	8.76		10	1.31%	7.25		
	V322	0.58	8.01	0.61	7.87	95.1%	101.8%	0.60	7.94		10	1.20%	6.47		
SMA L 16 S - V3 (2x50)	V331	0.80	7.85	0.80	7.74	100.0%	101.4%	0.80	7.80	0 °C	10	1.63%	6.40	6.61	
	V332	0.62	6.40	0.70	6.33	88.6%	101.1%	0.66	6.37		10	1.33%	5.17		
	V341	0.90	9.01	0.98	8.81	91.8%	102.3%	0.94	8.91		10	1.91%	7.29		
	V342	0.76	8.85	0.78	8.74	97.4%	101.3%	0.77	8.80		10	1.58%	7.11		
	V411	0.80	7.55	0.83	7.48	96.4%	100.9%	0.82	7.52		10	1.66%	6.14		
	V412	0.52	7.35	0.60	7.23	86.7%	101.7%	0.56	7.29		10	1.64%	5.97		
	V421	1.01	9.40	1.05	7.03	96.2%	133.7%	1.03	8.22		10	2.09%	6.84		
SMA L 16 S - V4 (2x50)	V422	1.26	9.13	1.33	9.02	94.7%	101.2%	1.30	9.08	0 °C	10	2.63%	7.41	6.71	
	V441	1.58	10.58	1.66	10.50	95.2%	100.8%	1.62	10.54		10	3.25%	8.60		
	V442	0.50	6.51	0.64	6.30	78.1%	103.3%	0.57	6.41		10	1.18%	5.30		



Tabulka 66: Výsledky zkoušky šíření trhliny (0 °C, zestárlé; V1, V2, V3, V4) – 2/2

	ČSN EN 12697-44 (2011)				ČSN EN 12697-44 (2016)				Rozdíl od průměru	Energie do maximální hodnoty [J]	Směrodatná odchylka	Celková energie zkoušky [J]	Směrodatná odchylka
	Faktor (f(ai/Wi)) [-]	Kritická hodnota K _{ic,i} [(N/mm ^{3/2})]	Rozdíl od průměru	Faktor (f(ai/Wi)) [-]	Kritická hodnota K _{ic,i} [(N/mm ^{3/2})]	Rozdíl od průměru	Energie do maximální hodnoty [J]	Směrodatná odchylka					
SMA L 16 S - V1 (2x50)	V151	7,472	46,7	92%	1,229	43,1	92%	3,302	3,802	1,972	4,218	1,972	
	V152	7,408	36,2	71%	1,230	33,7	72%	0,901	2,119				
	V161	7,405	46,9	93%	1,230	43,7	93%	2,373	3,886				
	V162	7,481	60,4	119%	1,229	55,6	119%	5,650	8,380				
	V171	7,439	56,2	111%	1,230	52,1	111%	1,909	4,031				
	V172	7,473	57,6	114%	1,229	53,1	113%	2,545	3,086				
	V221	7,381	57,4	98%	1,231	53,7	99%	3,709	5,353				
SMA L 16 S - V2 (2x50)	V222	7,483	47,1	81%	1,229	43,4	80%	1,956	2,869	0,686	5,329	1,525	
	V231	7,394	62,0	106%	1,231	57,9	107%	3,622	4,516				
	V232	7,489	64,3	110%	1,229	59,1	109%	4,009	5,057				
	V241	7,460	58,8	101%	1,230	54,3	100%	2,771	6,392				
	V242	7,400	60,2	103%	1,231	56,1	104%	3,254	7,787				
	V321	7,494	54,3	111%	1,229	49,9	110%	2,301	3,479				
	V322	7,392	47,8	97%	1,231	44,6	98%	2,171	3,946				
SMA L 16 S - V3 (2x50)	V331	7,438	47,6	97%	1,230	44,1	97%	2,406	2,949	0,458	3,909	0,713	
	V332	7,395	38,2	78%	1,231	35,7	78%	1,921	5,281				
	V341	7,416	54,1	110%	1,230	50,3	110%	3,101	3,732				
	V342	7,449	53,0	108%	1,230	49,0	107%	3,137	4,068				
	V411	7,425	45,6	89%	1,230	42,3	92%	1,891	2,325				
	V412	8,841	52,8	103%	1,197	40,1	87%	1,700	3,358				
	V421	7,413	50,7	99%	1,230	47,2	102%	4,579	4,765				
SMA L 16 S - V4 (2x50)	V422	7,418	55,0	107%	1,230	51,1	111%	4,591	7,815	1,777	4,911	1,777	
	V441	7,383	63,5	124%	1,231	59,3	129%	5,258	6,067				
	V442	7,492	39,7	78%	1,229	36,5	79%	1,594	5,135				



Tabulka 67: Výsledky zkoušky šíření trhliny (0 °C, zestárle; V5, V6, ACL 16 S) – 1/2

	Datalogger		Lis		Porovnání hodnot (datalogger/lis)		Průměrná hodnota (do výpočtu)		Teplota zkoušení [°C]	Rychlost zatěžování [mm/min]	Hloubka drážky [mm]	Přetvoření emax.1 [%]	Napětí při porušení σmax.1 [MPa]	
	Deformace [mm]	Síla [kN]	Deformace [mm]	Síla [kN]	Deformace [mm]	Síla [kN]	Deformace [mm]	Síla [kN]						
SMA L 16 S - V5 (2x50)	V541	0,67	7,43	0,69	7,30	101,8%	101,8%	0,68	7,37	2,36	10	1,38%	6,00	6,36
	V542	0,56	7,17	0,55	7,03	101,8%	102,0%	0,56	7,10	2,58	10	1,11%	5,90	
	V551	0,71	8,00	0,71	7,85	100,0%	101,9%	0,71	7,93	2,51	10	1,46%	6,59	
	V552	0,77	7,67	0,77	7,54	100,0%	101,7%	0,77	7,61	2,57	10	1,56%	6,31	
	V561	0,94	9,21	0,94	9,08	100,0%	101,4%	0,94	9,15	2,45	10	1,86%	7,42	
	V562	0,59	7,26	0,58	7,14	101,7%	101,7%	0,59	7,20	2,53	10	1,21%	5,95	
SMA L 16 S - V6 (2x50)	V641	0,71	8,17	0,71	8,05	100,0%	101,5%	0,71	8,11	2,51	10	1,43%	6,74	6,90
	V642	0,60	8,13	0,61	8,03	98,4%	101,2%	0,61	8,08	2,40	10	1,22%	6,58	
	V651	0,64	8,29	0,62	8,15	103,2%	101,7%	0,63	8,22	2,56	10	1,24%	6,68	
	V652	0,94	10,01	0,93	9,86	101,1%	101,5%	0,94	9,94	2,56	10	1,96%	8,18	
	V661	0,91	8,39	0,93	8,31	97,8%	101,0%	0,92	8,35	2,48	10	1,90%	6,94	
	V662	0,86	7,83	0,83	7,68	103,6%	102,0%	0,85	7,76	2,58	10	1,69%	6,29	
ACL 16 S (2x75)	11	1,26	7,82	1,28	7,70	98,4%	101,6%	1,27	7,76	2,44	10	2,55%	6,32	6,08
	12	1,24	7,90	0,61	6,96	203,3%	113,5%	0,93	7,43	2,57	10	1,91%	6,10	
	21	0,84	6,58	0,84	6,44	100,0%	102,2%	0,84	6,51	2,52	10	1,75%	5,37	
	22	0,63	7,93	0,62	7,85	101,6%	101,0%	0,63	7,89	2,36	10	1,24%	6,46	
	41	0,46	7,15	0,50	7,04	92,0%	101,6%	0,48	7,10	2,30	10	0,98%	5,85	
	42	0,82	7,86	0,83	7,82	98,8%	100,5%	0,83	7,84	2,34	10	1,67%	6,36	



Tabulka 68: Výsledky zkoušky šíření trhliny (0 °C, zestárlé; V5, V6, ACL 16 S) – 2/2

	ČSN EN 12697-44 (2011)				ČSN EN 12697-44 (2016)				Rozdíl od průměru	Energie do maximální hodnoty [J]	Směrodatná odchylka	Celková energie zkoušky [J]	Směrodatná odchylka
	Faktor (f _{ai/Wi}) [-]	Kritická hodnota K _{ic,i} [N/mm ^{3/2}]	Rozdíl od průměru	Faktor (f _{ai/Wi}) [-]	Kritická hodnota K _{ic,i} [N/mm ^{3/2}]	Rozdíl od průměru	Energie do maximální hodnoty [J]	Směrodatná odchylka					
V541 V542 V551 V552 V561 V562 SMA L 16 S - V5 (2x50)	7,423	44,5	94%	1,230	41,4	94%	1,932	43,9	1,932	0,836	2,771	0,836	
	7,381	43,5	92%	1,231	40,7	93%	1,731						
	7,455	49,1	104%	1,230	45,4	104%	2,654						
	7,425	46,8	99%	1,230	43,5	99%	2,344						
	7,340	54,4	115%	1,231	51,2	117%	3,304						
	7,483	44,5	94%	1,229	41,0	93%	1,734						
V641 V642 V651 V652 V661 V662 SMA L 16 S - V6 (2x50)	7,395	49,9	97%	1,231	46,5	98%	2,425	47,6	2,425	0,680	2,597	0,680	
	7,385	48,6	95%	1,231	45,4	95%	2,283						
	7,311	48,8	95%	1,231	46,1	97%	2,282						
	7,527	61,5	120%	1,228	56,3	118%	3,876						
	7,477	51,9	101%	1,229	47,8	101%	2,964						
	7,376	46,4	91%	1,231	43,4	91%	2,610						
11 12 21 22 41 42 ACL 16 S (2x75)	7,383	46,7	103%	1,231	43,6	104%	2,840	41,9	2,840	0,872	3,736	0,872	
	7,471	45,6	101%	1,229	42,0	100%	4,384						
	7,514	40,3	89%	1,229	37,0	88%	2,048						
	7,338	47,4	105%	1,231	44,6	106%	2,255						
	7,436	43,5	96%	1,230	40,3	96%	1,500						
	7,415	47,2	105%	1,230	43,9	105%	2,566						



Tabulka 69: Rozměry těles pro zkoušku šíření trhliny ohybem (15 °C, zestárle)

		b [mm]	b [mm]	b [mm]	Šířka [mm]	l [mm]	l [mm]	Délka [mm]	h [mm]	h [mm]	Výška [mm]
SMA L 16 S - V1 (2x50)	V111	50,67	48,44	48,96	49,36	100,80	100,20	100,50	48,27	48,98	48,63
	V112	50,47	50,02	51,90	50,80	100,52	101,48	101,00	49,11	49,14	49,13
	V121	50,12	50,89	49,77	50,26	101,40	100,35	100,88	48,15	48,11	48,13
	V122	50,46	51,68	51,81	51,32	101,33	100,88	101,11	48,84	48,14	48,49
	V141	50,76	51,81	50,45	51,01	100,47	100,89	100,68	49,09	48,88	48,99
	V142	51,15	51,77	52,13	51,68	100,80	100,95	100,88	48,84	48,95	48,90
SMA L 16 S - V2 (2x50)	V271	52,19	50,92	52,87	51,99	102,50	102,37	102,44	49,81	49,49	49,65
	V272	50,08	51,86	51,57	51,17	101,97	102,19	102,08	48,92	49,64	49,28
	V281	51,15	52,17	52,16	51,83	102,21	102,06	102,14	50,11	50,23	50,17
	V282	52,20	50,75	50,26	51,07	102,11	102,26	102,19	48,18	49,02	48,60
	V291	51,29	52,03	51,94	51,75	102,00	101,90	101,95	48,50	48,58	48,54
	V292	52,00	50,99	50,69	51,23	101,83	102,49	102,16	49,98	50,16	50,07
SMA L 16 S - V3 (2x50)	V351	49,90	51,00	50,68	50,53	102,59	102,59	102,59	50,93	51,39	51,16
	V352	51,97	50,57	51,67	51,40	102,20	102,39	102,30	48,87	48,84	48,86
	V381	51,31	49,92	51,70	50,98	101,82	101,68	101,75	48,21	48,21	48,21
	V382	50,28	52,61	50,19	51,03	102,25	102,25	102,25	50,13	49,53	49,83
	V391	51,47	51,71	51,28	51,49	102,02	101,87	101,95	48,57	48,89	48,73
	V392	51,45	52,18	52,14	51,92	101,43	101,48	101,46	49,35	50,26	49,81
SMA L 16 S - V4 (2x50)	V461	50,49	50,65	49,53	50,22	102,38	102,46	102,42	48,66	48,53	48,60
	V462	51,41	50,97	51,78	51,39	102,76	102,43	102,60	49,43	49,81	49,62
	V471	51,21	51,73	51,30	51,41	101,30	102,26	101,78	48,16	47,42	47,79
	V472	51,83	51,62	52,00	51,82	102,06	102,51	102,29	50,95	51,38	51,17
	V481	51,57	49,98	51,83	51,13	101,24	101,40	101,32	48,93	49,58	49,26
	V482	51,28	49,64	49,42	50,11	101,30	101,01	101,16	50,25	50,34	50,30
SMA L 16 S - V5 (2x50)	V571	51,34	51,97	52,68	52,00	102,18	102,48	102,33	49,41	49,92	49,67
	V572	50,64	51,62	50,00	50,75	101,91	101,88	101,90	48,58	48,42	48,50
	V581	50,33	51,79	51,22	51,11	102,13	102,11	102,12	49,77	49,54	49,66
	V582	50,04	51,65	50,90	50,86	101,54	102,12	101,83	48,84	50,46	49,65
	V591	52,08	50,24	51,63	51,32	102,20	102,57	102,39	50,10	50,11	50,11
	V592	51,88	50,49	50,62	51,00	101,79	101,68	101,74	47,84	48,30	48,07
SMA L 16 S - V6 (2x50)	V671	52,46	51,45	50,55	51,49	102,44	102,23	102,34	49,45	49,47	49,46
	V672	51,19	51,80	51,13	51,37	102,21	102,49	102,35	49,76	50,17	49,97
	V681	52,14	50,98	50,70	51,27	101,09	102,01	101,55	47,91	48,44	48,18
	V682	52,68	51,31	52,25	52,08	101,44	101,68	101,56	49,36	50,28	49,82
	V691	49,87	50,47	49,15	49,83	102,03	101,81	101,92	49,36	49,41	49,39
	V692	51,28	50,76	51,88	51,31	101,87	101,75	101,81	48,66	48,67	48,67
ACL 16 S (2x75)	51	48,91	50,71	49,11	49,58	102,42	102,12	102,27	50,43	50,16	50,30
	52	52,37	50,49	51,03	51,30	101,70	100,48	101,09	47,96	47,67	47,82
	71	51,21	50,90	50,15	50,75	101,66	101,20	101,43	47,74	47,53	47,64
	72	50,01	51,00	50,33	50,45	101,91	101,63	101,77	50,17	51,50	50,84
	91	51,47	51,48	51,78	51,58	101,68	101,77	101,73	49,72	50,26	49,99
	92	51,32	51,51	50,93	51,25	101,69	101,83	101,76	48,56	49,43	49,00



Tabulka 70: Výsledky zkoušky šíření trhliny (15 °C, zestárlé; V1, V2, V3, V4) – 1/2

	Datalogger		Lis		Porovnání hodnota (datalogger/lis)		Průměrná hodnota (do výpočtu)		Teplota zkoušení [°C]	Rychlost zatižování [mm/min]	Hloubka drážky [mm]	Přetvoření emax, i [%]		Napětí při porušení o max, i [MPa]	
	Deformace [mm]	Síla [kN]	Deformace [mm]	Síla [kN]	Deformace [mm]	Síla [kN]	Deformace [mm]	Síla [kN]				15 °C	15 °C	15 °C	15 °C
V111	0,53	5,51	0,67	5,46	79,1%	100,9%	0,60	5,49	15 °C	1,87	10	1,23%	4,71	5,26	
V112	0,76	6,47	0,89	6,42	85,4%	100,8%	0,83	6,45		2,17	10	1,68%	5,36		
V121	0,75	6,32	0,88	6,26	85,2%	101,0%	0,82	6,29		2,14	10	1,69%	5,29		
V122	0,66	6,67	0,77	6,61	85,7%	100,9%	0,72	6,64		2,20	10	1,47%	5,46		
V141	1,05	6,56	1,19	6,50	88,2%	100,9%	1,12	6,53	2,25	10	2,29%	5,42	5,31		
V142	0,71	6,54	0,91	6,46	78,0%	101,2%	0,81	6,50	2,03	10	1,66%	5,31			
V271	-	-	1,51	7,65	-	-	1,51	7,65	-	10	3,04%	6,12			
V272	1,26	7,76	1,44	7,69	87,5%	100,9%	1,35	7,73	2,22	10	2,74%	6,30			
V281	1,01	8,06	1,15	7,97	87,8%	101,1%	1,08	8,02	2,24	10	2,15%	6,45	6,31		
V282	2,35	7,17	2,54	7,07	92,5%	101,4%	2,45	7,12	2,35	10	5,03%	5,82			
V291	1,08	8,62	1,23	8,51	87,8%	101,3%	1,16	8,57	2,23	10	2,38%	6,92			
V292	0,78	7,79	1,49	7,53	52,3%	103,5%	1,14	7,66	2,23	10	2,27%	6,24			
V351	0,72	6,74	0,85	6,66	84,7%	101,2%	0,79	6,70	2,06	10	1,53%	5,51	5,59		
V352	0,70	7,07	0,88	6,99	79,5%	101,1%	0,79	7,03	2,10	10	1,62%	5,70			
V381	0,71	6,38	0,72	6,73	98,6%	94,8%	0,72	6,56	2,13	10	1,48%	5,39			
V382	0,46	6,67	0,63	6,59	73,0%	101,2%	0,55	6,63	1,84	10	1,09%	5,42			
V391	0,70	6,69	0,84	6,63	83,3%	100,9%	0,77	6,66	2,10	10	1,58%	5,41	6,13		
V392	0,68	7,64	0,79	7,51	86,1%	101,7%	0,74	7,58	2,15	10	1,48%	6,13			
V461	1,29	4,04	1,36	3,99	94,9%	101,3%	1,33	4,02	2,35	10	2,73%	3,33			
V462	1,09	7,42	1,24	7,36	87,9%	100,8%	1,17	7,39	2,26	10	2,35%	5,98			
V471	0,98	6,08	1,08	6,03	90,7%	100,8%	1,03	6,06	2,26	10	2,16%	4,93	5,19		
V472	1,00	8,14	1,15	8,04	87,0%	101,2%	1,08	8,09	2,14	10	2,10%	6,51			
V481	0,88	6,19	1,01	6,11	87,1%	101,3%	0,95	6,15	2,11	10	1,92%	5,06			
V482	0,84	6,52	1,05	6,24	80,0%	104,5%	0,95	6,38	2,10	10	1,88%	5,37			



Tabulka 71: Výsledky zkoušky šíření trhliny (15 °C, zestárlé; V1, V2, V3, V4) – 2/2

	ČSN EN 12697-44 (2011)				ČSN EN 12697-44 (2016)				Rozdíl od průměru	Energie do maximální hodnoty [J]	Směrodatná odchylka	Celková energie zkoušky [J]	Směrodatná odchylka
	Faktor (f _{ai} /M ₀) [-]	Kritická hodnota K _{ic,i} [N/mm ^{3/2}]	Rozdíl od průměru		Faktor (f _{ai} /M ₀) [-]	Kritická hodnota K _{ic,i} [N/mm ^{3/2}]	Rozdíl od průměru						
V111	7,465	35,2	90%	1,230	32,5	90%	1,714	3,710	2,561	0,415	5,647	1,272	
V112	7,430	39,8	101%	1,230	36,9	102%	2,671	5,670					
V121	7,500	39,7	101%	1,229	36,4	101%	2,707	4,840					
V122	7,475	40,8	104%	1,229	37,6	104%	2,453	5,638					
V141	7,440	40,3	103%	1,230	37,4	103%	3,017	7,898	2,807	0,415	5,647	1,272	
V142	7,446	39,6	101%	1,230	36,6	101%	2,807	6,124					
V271	7,394	45,3	97%	1,231	42,2	97%	-	-	5,477	1,439	10,214	3,216	
V272	7,420	46,8	100%	1,230	43,5	100%	5,848	12,018					
V281	7,358	47,5	102%	1,231	44,5	102%	4,620	8,591					
V282	7,467	43,4	93%	1,230	40,1	92%	8,071	15,611					
V291	7,471	51,7	111%	1,229	47,7	110%	4,939	8,175	3,909	1,439	10,214	3,216	
V292	7,365	46,0	98%	1,231	43,0	99%	3,909	6,673					
V351	7,291	40,2	97%	1,231	38,0	99%	2,591	5,836	2,352	0,347	5,101	0,782	
V352	7,449	42,5	102%	1,230	39,3	102%	2,384	5,266					
V381	7,495	40,4	97%	1,229	37,1	96%	2,467	5,801					
V382	7,382	40,0	97%	1,231	37,4	97%	1,709	3,621					
V391	7,458	40,3	97%	1,230	37,3	97%	2,160	4,587	2,801	0,347	5,101	0,782	
V392	7,383	45,3	109%	1,231	42,3	110%	2,801	5,497					
V461	7,467	24,8	65%	1,230	22,9	64%	3,518	6,068	3,203	0,365	7,370	1,188	
V462	7,396	44,2	115%	1,231	41,2	115%	3,601	8,181					
V471	7,524	37,1	97%	1,228	34,0	95%	2,813	8,542					
V472	7,291	47,4	123%	1,231	44,9	125%	3,532	8,291					
V481	7,421	37,6	98%	1,230	34,9	97%	3,061	7,711	2,694	0,365	7,370	1,188	
V482	7,350	39,4	103%	1,231	37,0	103%	2,694	5,428					



Tabulka 72: Výsledky zkoušky šíření trhliny (15 °C, zestárlé; V5, V6, ACL 16 S) – 1/2

	Datalogger		Lis		Porovnání hodnot (datalogger/lis)		Průměrná hodnota (do výpočtu)		Teplota zkoušení (°C)	Rychlost zatěžování [mm/min]	Hloubka drážky [mm]	Převrožení ϵ_{max} [%]		Napětí při porušení σ_{max} [MPa]	
	Deformace [mm]	Síla [kN]	Deformace [mm]	Síla [kN]	Deformace [mm]	Síla [kN]	Deformace [mm]	Síla [kN]							
V571	1,05	6,68	1,14	5,56	92,1%	120,1%	1,10	6,12	15 °C	2,33	10	2,20%	4,90		
V572	0,98	6,72	1,09	6,65	89,9%	101,1%	1,04	6,69		2,26	10	2,13%	5,51		
V581	1,20	5,99	1,03	6,21	116,5%	96,5%	1,12	6,10		2,25	10	2,25%	4,98		
V582	1,07	6,10	1,14	6,05	93,9%	100,8%	1,11	6,08		2,38	10	2,23%	5,00		
V591	1,04	6,70	1,13	6,65	92,0%	100,8%	1,09	6,68		2,23	10	2,17%	5,42		
V592	0,83	6,59	0,96	6,54	86,5%	100,8%	0,90	6,57	2,26	10	1,86%	5,39			
V671	0,97	8,52	1,12	8,37	86,6%	101,8%	1,05	8,45	15 °C	2,16	10	2,11%	6,83		
V672	1,05	8,69	1,16	8,61	90,5%	100,9%	1,11	8,65		2,25	10	2,21%	7,01		
V681	0,81	7,89	0,91	7,73	89,0%	102,1%	0,86	7,81		2,21	10	1,79%	6,39		
V682	1,07	8,41	1,03	7,65	103,9%	109,9%	1,05	8,03		2,21	10	2,11%	6,47		
V691	1,18	7,91	1,30	7,78	90,8%	101,7%	1,24	7,85		2,28	10	2,51%	6,59		
V692	0,82	7,86	0,91	7,72	90,1%	101,8%	0,87	7,79	2,24	10	1,78%	6,36			
51	0,76	7,60	0,96	7,47	79,2%	101,7%	0,86	7,54	15 °C	1,98	10	1,71%	6,34		
52	1,27	6,79	1,31	6,70	96,9%	101,3%	1,29	6,75		2,46	10	2,70%	5,54		
71	1,26	7,56	1,27	7,47	99,2%	101,2%	1,27	7,52		2,44	10	2,66%	6,22		
72	0,76	8,01	0,99	7,88	76,8%	101,6%	0,88	7,95		1,90	10	1,72%	6,60		
91	0,99	7,24	1,19	7,12	83,2%	101,7%	1,09	7,18		2,12	10	2,18%	5,83		
92	1,48	6,52	1,62	6,44	91,4%	101,2%	1,55	6,48	2,28	10	3,16%	5,30			
		SMA L 16 S - V5 (2x50)										2,14%		5,20	
		SMA L 16 S - V6 (2x50)										2,08%		6,61	
		ACL 16 S (2x75)										2,35%		5,97	



Tabulka 73: Výsledky zkoušky šíření trhliny (15 °C, zestárlé; V5, V6, ACL 16 S) – 2/2

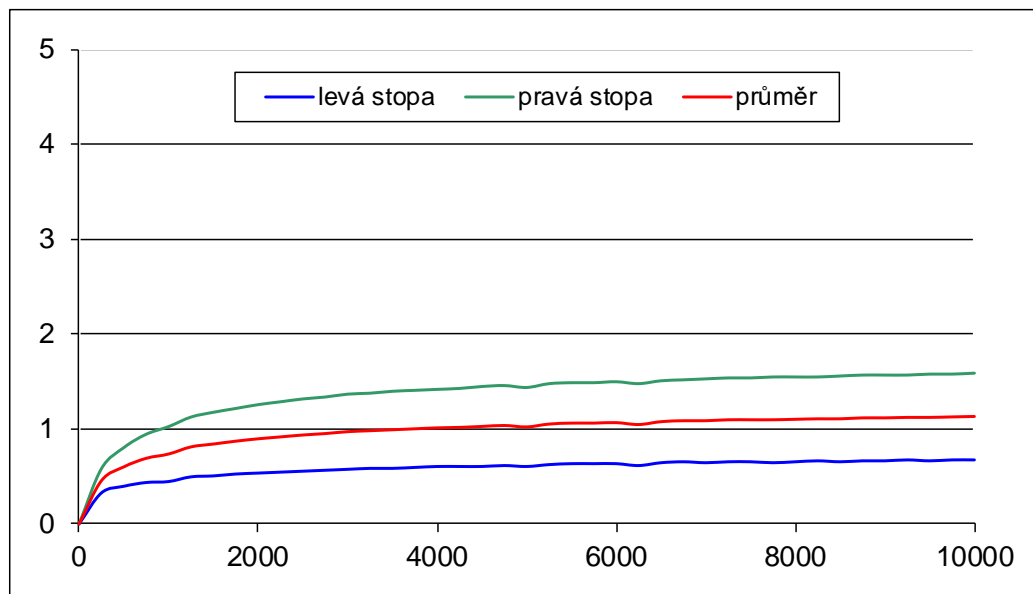
	ČSN EN 12697-44 (2011)				ČSN EN 12697-44 (2016)				Energie do maximální hodnoty [J]	Směrodatná odchylka	Celková energie zkoušky [J]	Směrodatná odchylka
	Faktor (a ₁ /W ₁) [-]	Kritická hodnota K _{1c,1} [N/mm ^{3/2}]	Rozdíl od průměru		Faktor (a ₁ /W ₁) [-]	Kritická hodnota K _{1c,1} [N/mm ^{3/2}]	Rozdíl od průměru					
V571	7,393	36,3	94%	1,231	33,8	94%	2,907	8,009	0,938	6,384	0,264	
V572	7,474	41,2	107%	1,229	38,0	106%	3,157	5,744				
V581	7,394	36,8	95%	1,231	34,4	96%	3,222	6,478				
V582	7,394	37,0	96%	1,231	34,5	96%	2,941	6,599				
V591	7,363	39,9	103%	1,231	37,4	104%	3,320	6,557				
V592	7,504	40,5	105%	1,229	37,2	104%	2,521	4,918				
V671	7,407	50,6	103%	1,230	47,1	103%	3,797	7,237	1,520	7,612	0,587	
V672	7,372	51,7	105%	1,231	48,4	106%	4,501	8,270				
V681	7,497	47,9	98%	1,229	44,0	97%	3,288	5,809				
V682	7,382	47,8	97%	1,231	44,6	98%	4,749	10,008				
V691	7,412	48,8	100%	1,230	45,4	100%	4,402	8,570				
V692	7,463	47,4	97%	1,230	43,8	96%	3,262	5,776				
51	7,350	46,6	105%	1,231	43,7	106%	2,868	4,216	0,717	4,317	0,610	
52	7,523	41,7	94%	1,228	38,2	93%	4,085	4,451				
71	7,535	46,9	106%	1,228	42,8	104%	4,054	4,540				
72	7,313	48,2	109%	1,231	45,5	111%	3,293	5,593				
91	7,371	43,0	97%	1,231	40,2	98%	3,079	3,866				
92	7,440	39,4	89%	1,230	36,5	89%	2,397	3,234				
SMA L 16 S - V5 (2x50)		38,6			35,9							
SMA L 16 S - V6 (2x50)		49,0			45,6							
ACL 16 S (2x75)		44,3			41,2							

**Zkouška odolnosti asfaltových směsí proti trvalým deformacím**

provedeno dle ČSN EN 12697-22

Zkouška opakovaného poježdění kolem

Směs: V1
Specifikace směsi: PMB 25/55-60
Teplota přípravy těles: 160 °C
Teplota zkoušky: 50 °C
MZ desky č.1: 101,20%
MZ desky č.2: 100,60%
Tloušťka desky 1: 59,2 mm
Tloušťka desky 2: 59,4 mm
Průměrná tloušťka: 59,3 mm



kolo	průměrná hloubka koleje po 5 000 cyklech v mm	průměrná hloubka koleje po 10 000 cyklech v mm	$d_{10\,000} - d_{5\,000}$ (mm)
1	0,61	0,68	0,07
2	1,43	1,58	0,15
průměr	1,02	1,13	0,11
přírůstek hloubky koleje WTS_{AIR}	$\frac{d_{10\,000} - d_{5\,000}}{5}$	0,022 mm	
PRD_{AIR}		1,7 %	

Graf 38: Stanovení odolnosti proti trvalým deformacím (V1)

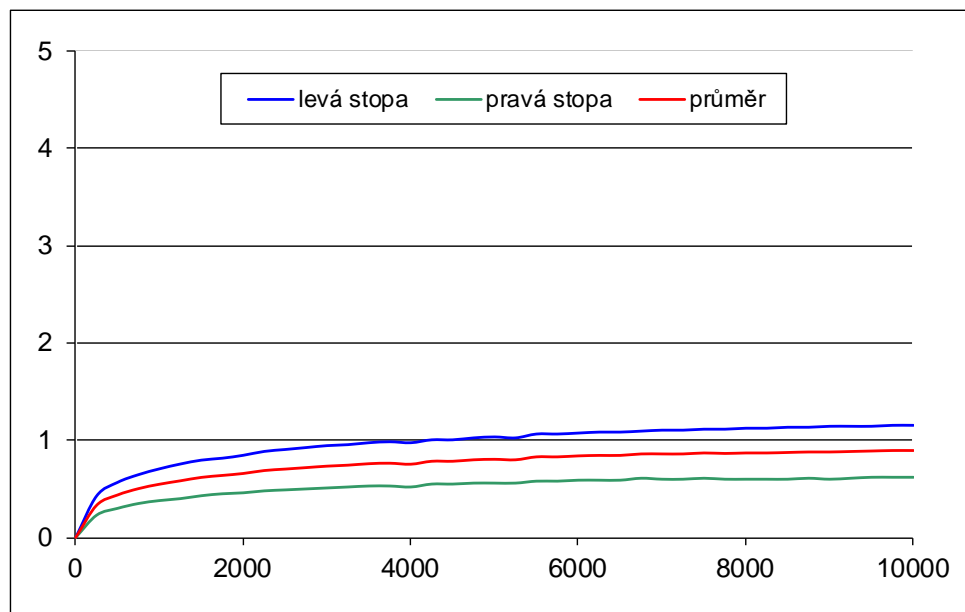


Zkouška odolnosti asfaltových směsí proti trvalým deformacím

provedeno dle ČSN EN 12697-22

Zkouška opakovaného poježdění kolem

Směs: V2
 Specifikace směsi: PMB 40/60-75
 Teplota přípravy těles 160 °C
 Teplota zkoušky: 50 °C
 MZ desky č.1: 101,10%
 MZ desky č.2: 100,60%
 Tloušťka desky 1: 59,8 mm
 Tloušťka desky 2: 60,1 mm
 Průměrná tloušťka: 60,0 mm



kolo	průměrná hloubka koleje po 5 000 cyklech v mm	průměrná hloubka koleje po 10 000 cyklech v mm	$d_{10\,000} - d_{5\,000}$ (mm)
1	1,04	1,16	0,12
2	0,56	0,62	0,06
průměr	0,80	0,89	0,09
přírůstek hloubky koleje WTS_{AIR}	$\frac{d_{10\,000} - d_{5\,000}}{5}$		0,018 mm
PRD_{AIR}			1,3 %

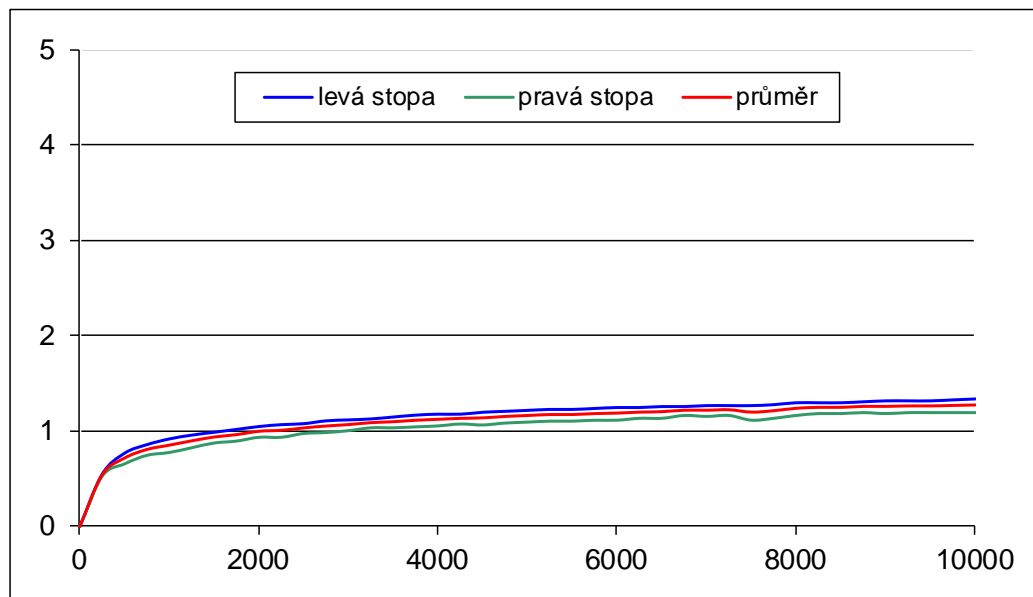
Graf 39: Stanovení odolnosti proti trvalým deformacím (V2)

**Zkouška odolnosti asfaltových směsí proti trvalým deformacím**

provedeno dle ČSN EN 12697-22

Zkouška opakovaného poježdění kolem

Směs: **V3**
Specifikace směsi: **50/70 CRmB**
Teplota přípravy těles **160 °C**
Teplota zkoušky: **50 °C**
MZ desky č.1: **99,00%**
MZ desky č.2: **99,90%**
Tloušťka desky 1: **60,0 mm**
Tloušťka desky 2: **60,0 mm**
Průměrná tloušťka: **60,0 mm**



kolo	průměrná hloubka koleje po 5 000 cyklech v mm	průměrná hloubka koleje po 10 000 cyklech v mm	$d_{10\,000} - d_{5\,000}$ (mm)
1	1,22	1,34	0,12
2	1,10	1,20	0,10
průměr	1,16	1,27	0,11
přírůstek hloubky koleje WTS _{AIR}	$\frac{d_{10\,000} - d_{5\,000}}{5}$	0,022	mm
PRD_{AIR}		1,9	%

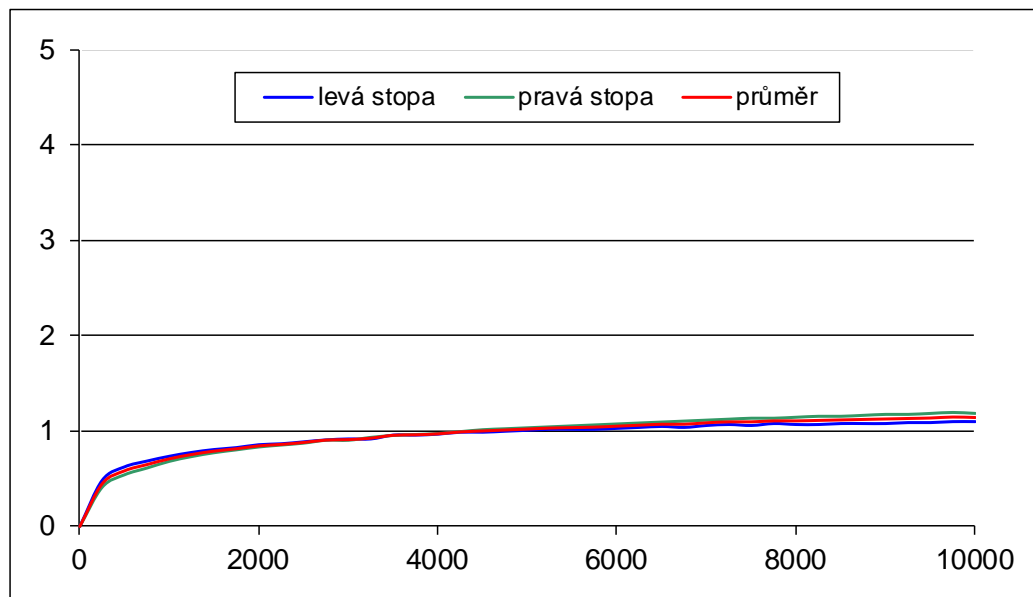
Graf 40: Stanovení odolnosti proti trvalým deformacím (V3)

**Zkouška odolnosti asfaltových směsí proti trvalým deformacím**

provedeno dle ČSN EN 12697-22

Zkouška opakovaného poježdění kolem

Směs: **V4**
Specifikace směsi: **PMB 25/55-60 + FORTA-FI**
Teplota přípravy těles **160 °C**
Teplota zkoušky: **50 °C**
MZ desky č.1: **99,00%**
MZ desky č.2: **99,10%**
Tloušťka desky 1: **59,9 mm**
Tloušťka desky 2: **60,0 mm**
Průměrná tloušťka: **59,9 mm**



kolo	průměrná hloubka koleje po 5 000 cyklech v mm	průměrná hloubka koleje po 10 000 cyklech v mm	$d_{10\,000} - d_{5\,000}$ (mm)
1	1,00	1,09	0,09
2	1,03	1,18	0,15
průměr	1,02	1,14	0,12
přírůstek hloubky koleje WTS _{AIR}	$\frac{d_{10\,000} - d_{5\,000}}{5}$	0,024	mm
PRD_{AIR}		1,7	%

Graf 41: Stanovení odolnosti proti trvalým deformacím (V4)

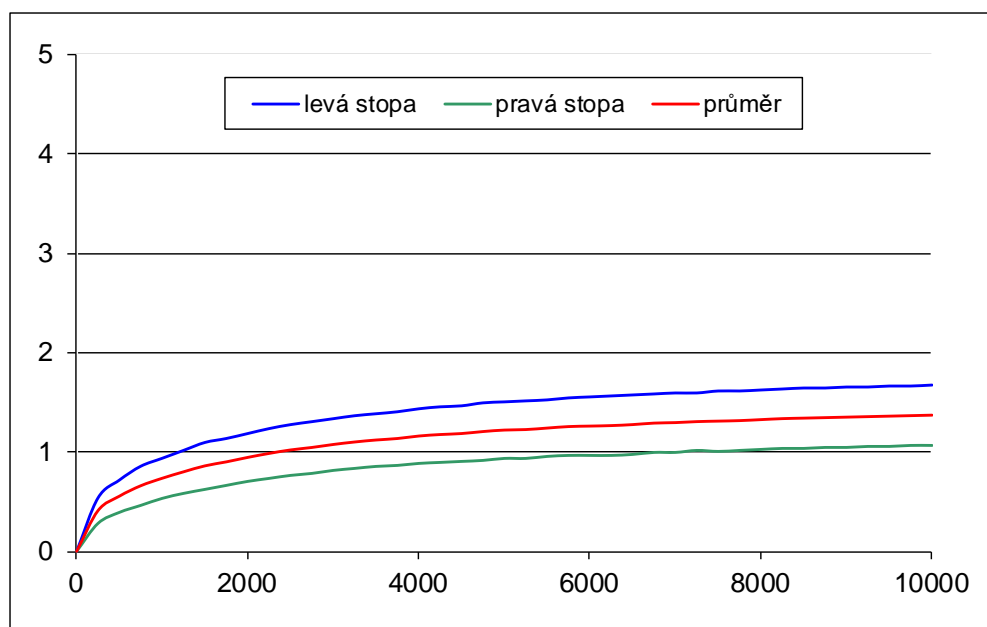


Zkouška odolnosti asfaltových směsí proti trvalým deformacím

provedeno dle ČSN EN 12697-22

Zkouška opakovaného poježdění kolem

Směs: V5
Specifikace směsi: PMB 25/55-60 + 1,5% Sasobit
Teplota přípravy těles 140 °C
Teplota zkoušky: 50 °C
MZ desky č.1: 100,90%
MZ desky č.2: 100,70%
Tloušťka desky 1: 60,0 mm
Tloušťka desky 2: 60,0 mm
Průměrná tloušťka: 60,0 mm



kolo	průměrná hloubka koleje po 5 000 cyklech v mm	průměrná hloubka koleje po 10 000 cyklech v mm	$d_{10\,000} - d_{5\,000}$ (mm)
1	1,51	1,68	0,17
2	0,93	1,06	0,13
průměr	1,22	1,37	0,15
přírůstek hloubky koleje WTS_{AIR}	$\frac{d_{10\,000} - d_{5\,000}}{5}$		0,03 mm
	PRD_{AIR}		2,0 %

Graf 42: Stanovení odolnosti proti trvalým deformacím (V5)

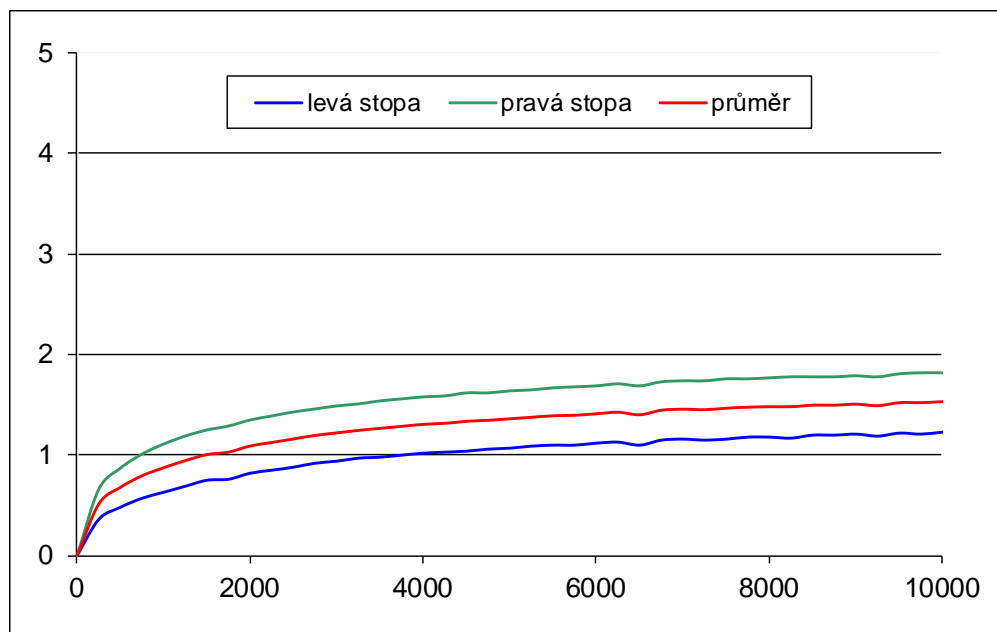


Zkouška odolnosti asfaltových směsí proti trvalým deformacím

provedeno dle ČSN EN 12697-22

Zkouška opakovaného poježdění kolem

Směs: **V6**
 Specifikace směsi: **PMB 40/60-75 + 30 % R- mat**
 Teplota přípravy těles **160 °C**
 Teplota zkoušky: **50 °C**
 MZ desky č.1: **100,40%**
 MZ desky č.2: **100,70%**
 Tloušťka desky 1: **60,0 mm**
 Tloušťka desky 2: **59,8 mm**
 Průměrná tloušťka: **59,9 mm**



kolo	průměrná hloubka koleje po 5 000 cyklech v mm	průměrná hloubka koleje po 10 000 cyklech v mm	$d_{10\,000} - d_{5\,000}$ (mm)
1	1,07	1,23	0,16
2	1,64	1,82	0,18
průměr	1,36	1,53	0,17
přírůstek hloubky koleje WTS_{AIR}	$\frac{d_{10\,000} - d_{5\,000}}{5}$		0,034 mm
PRD_{AIR}			2,3 %

Graf 43: Stanovení odolnosti proti trvalým deformacím (V6)

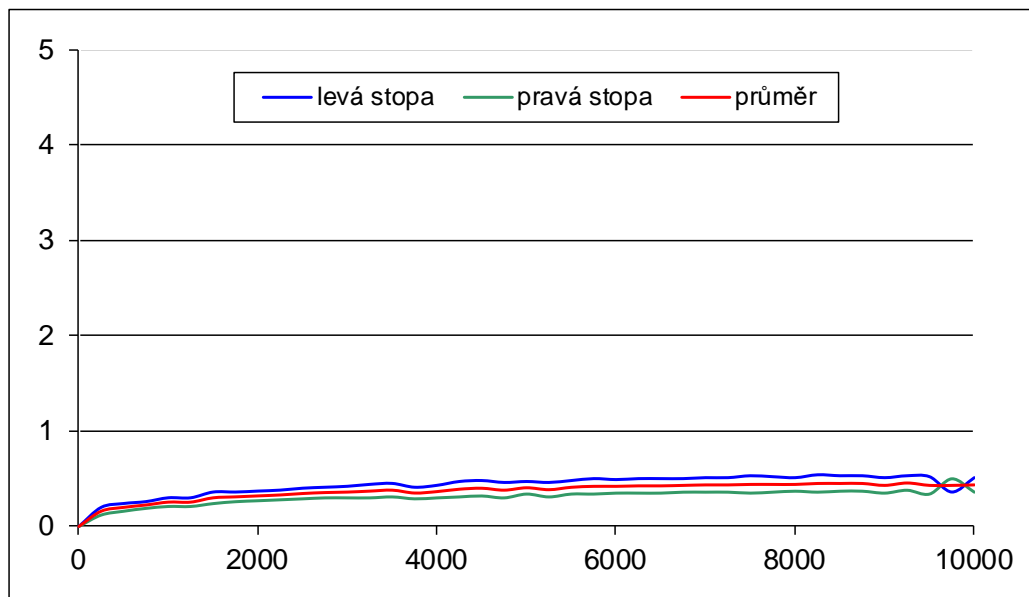


Zkouška odolnosti asfaltových směsí proti trvalým deformacím

provedeno dle ČSN EN 12697-22

Zkouška opakovaného poježdění kolem

Směs: **ACL 16 S**
Specifikace směsi: **PmB 25/55-55**
Teplota přípravy těles **160 °C**
Teplota zkoušky: **50 °C**
MZ desky č.1: **100,90%**
MZ desky č.2: **100,90%**
Tloušťka desky 1: **60,0 mm**
Tloušťka desky 2: **59,9 mm**
Průměrná tloušťka: **60,0 mm**



kolo	průměrná hloubka koleje po 5 000 cyklech v mm	průměrná hloubka koleje po 10 000 cyklech v mm	$d_{10\,000} - d_{5\,000}$ (mm)
1	0,47	0,51	0,04
2	0,34	0,36	0,02
průměr	0,41	0,44	0,03
přírůstek hloubky koleje WTS _{AIR}	$\frac{d_{10\,000} - d_{5\,000}}{5}$	0,006	mm
PRD_{AIR}		0,7	%

Graf 44: Stanovení odolnosti proti trvalým deformacím (ACL 16 S)



Tabulka 74: Rozměry trámečků (V1, V2 a V3)

	h [mm]	h [mm]	h [mm]	h [mm]	Výška [mm]	b [mm]	b [mm]	b [mm]	b [mm]	b [mm]	Šířka [mm]
SMA L 16 S - V1	V1X1	59,82	60,59	59,65	59,83	59,97	50,62	49,94	50,62	49,58	50,19
	V1X2	59,52	60,62	60,63	60,03	60,20	49,37	50,05	49,81	50,55	49,95
	V1X3	60,41	60,35	60,39	60,45	60,40	49,75	49,83	49,82	49,80	49,80
	V1Y3	59,74	59,82	59,78	59,84	59,80	50,45	50,37	50,46	50,32	50,40
SMA L 16 S - V2	V1Y1	60,23	60,13	59,83	59,59	59,95	50,27	50,56	50,47	50,82	50,53
	V1Y2	59,45	59,97	60,33	60,32	60,02	49,96	50,36	50,19	50,55	50,27
	V1X4	59,45	59,68	60,33	59,98	59,86	50,51	50,49	51,06	50,39	50,61
	V1Y4	59,70	60,02	60,34	59,97	60,01	51,10	51,33	51,36	50,93	51,18
	V2X1	59,90	60,28	60,09	60,51	60,20	51,24	51,62	51,44	51,54	51,46
	V2X2	59,88	60,24	60,18	60,21	60,13	49,50	49,62	49,80	49,63	49,64
	V2X3	60,66	60,88	60,83	60,04	60,60	50,97	51,03	51,12	50,55	50,92
	V2X4	60,43	59,88	60,42	60,25	60,25	51,05	50,96	51,14	50,54	50,92
SMA L 16 S - V3	V2Y1	60,46	60,67	60,76	60,29	60,55	50,77	51,79	51,61	51,80	51,49
	V2Y2	60,65	60,65	60,83	60,49	60,66	50,48	49,38	49,75	48,92	49,63
	V2Y3	60,43	60,99	60,89	60,70	60,75	49,85	49,98	49,79	50,14	49,94
	V2Y4	59,82	60,38	60,44	60,27	60,23	51,14	51,22	51,34	50,97	51,17
	V3X1	60,31	60,46	60,54	60,27	60,40	48,56	48,03	48,47	47,70	48,19
	V3X2	60,96	60,95	61,08	60,63	60,91	49,47	49,33	49,33	48,92	49,18
	V3X3	60,39	60,12	60,95	61,08	60,64	49,61	48,78	49,33	48,73	49,11
	V3X4	60,37	60,65	60,34	60,49	60,46	50,03	49,94	50,38	49,81	50,04
SMA L 16 S - V3	V3Y1	60,22	60,39	59,87	59,57	60,01	49,72	49,42	49,63	49,07	49,46
	V3Y2	60,49	60,34	60,30	59,82	60,24	49,70	49,51	49,68	49,35	49,56
	V3Y3	60,17	60,23	60,14	59,90	60,11	49,08	49,30	49,30	49,53	49,30
	V3Y4	59,82	59,92	60,10	60,13	59,99	49,21	49,55	49,63	49,56	49,49



Tabulka 75: Rozměry trámečků (V4, V5 a V6)

	h [mm]	h [mm]	h [mm]	h [mm]	Výška [mm]	b [mm]	b [mm]	b [mm]	b [mm]	b [mm]	b [mm]	Šířka [mm]
SMA L 16 S - V4	V4X1	60,03	60,47	60,31	60,08	60,22	49,09	49,13	49,72	50,69	49,66	49,66
	V4X2	60,40	61,14	60,91	61,09	60,89	49,13	49,36	49,04	48,55	49,02	49,02
	V4X3	60,01	60,09	60,47	59,76	60,08	47,98	48,54	48,62	49,09	48,56	48,56
	V4X4	60,12	60,22	60,51	60,32	60,29	49,22	49,36	49,27	49,51	49,34	49,34
SMA L 16 S - V5	V4Y1	60,07	60,41	60,39	60,27	60,29	60,67	49,49	49,74	49,15	52,26	52,26
	V4Y2	60,60	60,97	60,87	60,74	60,80	49,96	49,68	49,48	48,97	49,52	49,52
	V4Y3	60,25	60,40	60,70	60,52	60,47	49,66	49,71	49,88	49,97	49,81	49,81
	V4Y4	60,63	60,32	60,10	60,59	60,41	50,47	50,26	49,94	49,92	50,15	50,15
	V5X1	61,20	61,48	60,49	60,34	60,88	51,14	51,01	51,21	50,94	51,08	51,08
	V5X2	60,91	61,22	61,48	61,63	61,31	49,98	49,97	50,06	49,84	49,96	49,96
	V5X3	60,54	61,07	62,17	60,89	61,17	50,52	50,85	50,36	50,05	50,45	50,45
	V5X4	60,42	60,96	60,99	60,24	60,65	50,84	51,07	50,63	50,31	50,71	50,71
SMA L 16 S - V6	V5Y1	60,36	61,02	60,58	61,26	60,81	51,46	51,38	51,03	50,43	51,08	51,08
	V5Y2	61,57	62,79	61,44	61,08	61,72	49,32	49,06	49,12	48,80	49,08	49,08
	V5Y3	60,39	61,48	61,19	61,18	61,06	50,67	50,78	50,50	50,52	50,62	50,62
	V5Y4	60,09	61,03	60,88	60,89	60,72	50,19	51,33	51,37	51,24	51,03	51,03
SMA L 16 S - V6	V6X1	59,90	60,75	62,08	60,93	60,92	51,20	50,60	50,19	49,82	50,45	50,45
	V6X2	60,77	61,45	61,94	62,07	61,56	50,54	50,41	50,24	50,15	50,34	50,34
	V6X3	60,14	61,03	60,89	60,02	60,52	50,63	50,78	51,33	51,22	50,99	50,99
	V6X4	61,43	61,68	61,17	61,00	61,32	50,60	51,03	50,65	50,31	50,65	50,65
	V6Y1	60,28	61,92	60,52	59,37	60,52	51,13	50,64	50,30	49,89	50,49	50,49
	V6Y2	60,00	60,74	61,45	51,33	58,38	49,65	50,04	50,01	50,26	49,99	49,99
	V6Y3	60,38	60,85	60,73	60,07	60,51	49,65	50,45	50,93	50,91	50,49	50,49
	V6Y4	60,12	60,55	60,25	60,08	60,25	49,54	50,72	50,84	50,86	50,49	50,49



Tabulka 76: Výsledky zkoušky tah za ohybu (V1, V2 a V3) - 1/2

	Výška [mm]	Šířka [mm]	Rozpětí podpěr [mm]	Teplota zkoušení [°C]	Datalogger		Lis		Porovnání hodnot		Průměrná hodnota (do výpočtu)		
					Deformace [mm]	Síla [kN]	Deformace [mm]	Síla [kN]	Deformace [mm]	Síla [kN]	Deformace [mm]	Síla [kN]	
SMA L 16 S - V1	V1X1	59,97	50,19	250	0 °C	1,24	4,38	1,29	4,34	96,1%	100,9%	1,27	4,36
	V1X2	60,20	49,95	250	0 °C	1,63	4,72	1,65	4,69	98,8%	100,6%	1,64	4,71
	V1X3	60,40	49,80	250	0 °C	1,26	5,08	1,29	5,05	97,7%	100,6%	1,28	5,07
	V1Y3	59,80	50,40	250	0 °C	1,65	5,08	1,64	5,03	100,6%	101,0%	1,65	5,06
SMA L 16 S - V2	V1Y1	59,95	50,53	250	-10 °C	0,78	4,60	0,79	4,54	98,7%	101,3%	0,79	4,57
	V1Y2	60,02	50,27	250		1,18	6,61	1,22	6,59	96,7%	100,3%	1,20	6,60
	V1X4	59,86	50,61	250		0,95	6,58	0,99	6,53	96,0%	100,8%	0,97	6,56
	V1Y4	60,01	51,18	250		0,67	5,94	0,79	5,95	84,8%	99,8%	0,73	5,95
	V2X1	60,20	51,46	250	0 °C	1,13	5,73	1,54	5,69	73,4%	100,7%	1,54	5,71
	V2X2	60,13	49,64	250		0,66	5,91	1,72	5,82	38,4%	101,5%	1,72	5,87
	V2X3	60,60	50,92	250		1,49	6,08	1,55	6,02	96,1%	101,0%	1,52	6,05
	V2X4	60,25	50,92	250		1,63	5,55	1,69	5,52	96,4%	100,5%	1,66	5,54
SMA L 16 S - V3	V2Y1	60,55	51,49	250	-10 °C	1,06	4,53	1,10	4,50	96,4%	100,7%	1,08	4,52
	V2Y2	60,66	49,63	250		0,79	6,91	0,83	6,91	95,2%	100,0%	0,81	6,91
	V2Y3	60,75	49,94	250		0,80	6,15	0,81	6,12	98,8%	100,5%	0,81	6,14
	V2Y4	60,23	51,17	250		1,17	5,40	1,18	5,38	99,2%	100,4%	1,18	5,39
SMA L 16 S - V3	V3X1	60,40	48,19	250	0 °C	0,41	2,32	0,78	2,31	52,6%	100,4%	0,78	2,32
	V3X2	60,91	49,18	250		0,01	3,15	0,67	3,11	1,5%	101,3%	0,67	3,13
	V3X3	60,64	49,11	250		1,18	3,43	1,14	3,37	103,5%	101,8%	1,16	3,40
	V3X4	60,46	50,04	250		0,76	2,54	0,68	2,47	111,8%	102,8%	0,72	2,51
SMA L 16 S - V3	V3Y1	60,01	49,46	250	-10 °C	0,60	3,83	0,63	3,79	95,2%	101,1%	0,62	3,81
	V3Y2	60,24	49,56	250		0,69	3,90	0,68	3,83	101,5%	101,8%	0,69	3,87
	V3Y3	60,11	49,30	250		0,72	4,57	0,70	4,47	102,9%	102,2%	0,71	4,52
	V3Y4	59,99	49,49	250		0,81	3,72	0,78	3,64	103,8%	102,2%	0,80	3,68



Tabulka 77: Výsledky zkoušky tah za ohybu (V1, V2 a V3) - 2/2

	Pevnost v tahu za ohybu [MPa]	Průměr [MPa]	Index stárnutí AI [%]	Modul tuhosti v tahu za ohybu [MPa]	Průměr [MPa]	Index stárnutí AI [%]	Energie do max. hod. [J]	Průměr [J]	Index stárnutí AI [%]	Rychlost zatěžování [mm/s]
SMA L 16 S - V1	V1X1	9,06		1244	1136		3.307	4,118		1,18
	V1X2	9,75	112%	1028		111%	4,930		101%	1,22
	V1X3	10,45		1414	1264		3,610	4,143		1,24
	V1Y3	10,52		1114			4,676			1,24
SMA L 16 S - V2	V1Y1	9,44		2089	2033		1,572	2,574		1,23
	V1Y2	13,67	111%	1977		131%	3,576		95%	1,22
	V1X4	13,55		2432	2654		2,950	2,439		1,19
	V1Y4	12,10		2877			1,928			1,09
SMA L 16 S - V3	V2X1	11,48		1290	1262		4,779	4,214		1,19
	V2X2	12,26	98%	1234		101%	3,648		118%	1,16
	V2X3	12,13		1372	1271		4,811	4,991		1,19
	V2X4	11,23		1170			5,172			1,22
SMA L 16 S - V3	V2Y1	8,97		1429	2219		2,134	2,449		1,22
	V2Y2	14,19	101%	3009		96%	2,764		111%	1,00
	V2Y3	12,48		2659	2131		2,352	2,722		1,25
	V2Y4	10,89		1603			3,091			1,25
SMA L 16 S - V3	V3X1	4,94		1092	1367		0,753	0,753		0,65
	V3X2	6,43	107%	1642		83%	-		188%	0,60
	V3X3	7,06		1046	1137		1,948	1,418		1,26
	V3X4	5,14		1229			0,887			1,30
SMA L 16 S - V3	V3Y1	8,02		2264	2149		1,164	1,184		1,20
	V3Y2	8,06	107%	2035		93%	1,205		113%	1,25
	V3Y3	9,51		2322	2007		1,393	1,343		1,27
	V3Y4	7,75		1692			1,294			1,28



Tabulka 78: Výsledky zkoušky tah za ohybu (V4, V5 a V6) - 1/2

	Vyska [mm]	Šírka [mm]	Rozpětí podpěr [mm]	Teplota zkoušení [°C]	Datalogger		Lis		Porovnání hodnot		Průměrná hodnota (do výpočtu)	
					Deformace [mm]	Síla [kN]	Deformace [mm]	Síla [kN]	Deformace [mm]	Síla [kN]	Deformace [mm]	Síla [kN]
SMA L 16 S - V4	V4X1	60,22	49,66	0 °C	0,74	2,93	0,77	2,88	96,1%	101,7%	0,76	2,91
	V4X2	60,89	49,02		0,44	4,48	1,21	4,46	36,4%	100,4%	1,21	4,47
	V4X3	60,08	48,56		1,28	4,99	1,22	4,90	104,9%	101,8%	1,25	4,95
	V4X4	60,29	49,34		-	-	-	-	-	-	-	0,00
SMA L 16 S - V5	V4Y1	60,29	52,26	-10 °C	0,58	3,65	0,65	3,65	89,2%	100,0%	0,62	3,65
	V4Y2	60,80	49,52		0,59	4,22	0,61	4,22	96,7%	100,0%	0,60	4,22
	V4Y3	60,47	49,81		1,36	4,07	1,32	3,96	103,0%	102,8%	1,34	4,02
	V4Y4	60,41	50,15		0,83	2,98	0,77	2,9	107,8%	102,8%	0,80	2,94
SMA L 16 S - V6	V5X1	60,88	51,08	0 °C	1,38	5,00	1,34	4,9	103,0%	102,0%	1,36	4,95
	V5X2	61,31	49,96		1,60	6,25	1,55	6,17	103,2%	101,3%	1,58	6,21
	V5X3	61,17	50,45		1,28	6,76	1,29	6,74	99,2%	100,3%	1,29	6,75
	V5X4	60,65	50,71		1,24	5,63	1,34	5,56	92,5%	101,3%	1,29	5,60
SMA L 16 S - V6	V5Y1	60,81	51,08	-10 °C	0,68	5,15	0,64	5,03	106,3%	102,4%	0,66	5,09
	V5Y2	61,72	49,08		0,74	5,39	0,71	5,31	104,2%	101,5%	0,73	5,35
	V5Y3	61,06	50,62		0,64	5,76	0,65	5,66	98,5%	101,8%	0,65	5,71
	V5Y4	60,72	51,03		0,60	4,91	0,6	4,81	100,0%	102,1%	0,60	4,86
SMA L 16 S - V6	V6X1	60,92	50,45	0 °C	1,15	5,76	1,12	5,72	102,7%	100,7%	1,14	5,74
	V6X2	61,56	50,34		1,26	6,40	1,26	6,33	100,0%	101,1%	1,26	6,37
	V6X3	60,52	50,99		1,08	5,99	1,03	5,87	104,9%	102,0%	1,06	5,93
	V6X4	61,32	50,65		1,35	6,54	1,37	6,47	98,5%	101,1%	1,36	6,51
SMA L 16 S - V6	V6Y1	60,52	50,49	-10 °C	0,86	5,82	0,85	5,68	101,2%	102,5%	0,86	5,75
	V6Y2	58,38	49,99		0,84	7,01	0,83	6,91	101,2%	101,4%	0,84	6,96
	V6Y3	60,51	50,49		0,85	5,87	0,81	5,67	104,9%	103,5%	0,83	5,77
	V6Y4	60,25	50,49		0,72	5,68	0,67	5,54	107,5%	102,5%	0,70	5,61



Tabulka 79: Výsledky zkoušky tah za ohybu (V4, V5 a V6) - 2/2

	Pevnost v tahu za ohybu [MPa]	Průměr [MPa]	Index stárnutí AI [%]	Modul tuhosti v tahu za ohybu [MPa]	Průměr [MPa]	Index stárnutí AI [%]	Energie do max. hod. [J]	Průměr [J]	Index stárnutí AI [%]	Rychlost zateřování [mm/s]
SMA L 16 S - V4	V4X1	6,05		1386	1345		1,227	1,512		1,20
	V4X2	9,22	139%	1304		109%	1,797		183%	0,46
	V4X3	10,58		1467	1467		2,775	2,775		1,28
	V4X4	0,00		-			-			1,35
SMA L 16 S - V5	V4Y1	7,21		2025	2247		0,965	1,041		1,12
	V4Y2	8,65	90%	2469		53%	1,118		140%	1,22
	V4Y3	8,27		1063	1181		1,838	1,459		1,26
	V4Y4	6,02		1298			1,079			1,31
SMA L 16 S - V6	V5X1	9,81		1234	1286		3,936	4,471		1,27
	V5X2	12,40	111%	1338		127%	5,005		84%	1,25
	V5X3	13,41		1777	1637		4,273	3,767		1,18
	V5X4	11,25		1497			3,261			1,14
SMA L 16 S - V6	V5Y1	10,11		2624	2561		1,518	1,578		1,28
	V5Y2	10,73	101%	2498		113%	1,639		99%	1,27
	V5Y3	11,35		3001	2885		1,633	1,565		1,20
	V5Y4	9,69		2769			1,498			1,24
SMA L 16 S - V6	V6X1	11,50		1732	1706		3,410	3,730		1,15
	V6X2	12,51	103%	1681		104%	4,050		102%	1,24
	V6X3	11,91		1943	1771		3,199	3,805		1,30
	V6X4	12,81		1600			4,412			1,23
SMA L 16 S - V6	V6Y1	11,66		2347	2810		1,791	2,169		1,23
	V6Y2	15,32	86%	3273		94%	2,548		90%	1,26
	V6Y3	11,71		2428	2642		2,046	1,944		1,28
	V6Y4	11,48		2855			1,842			1,31