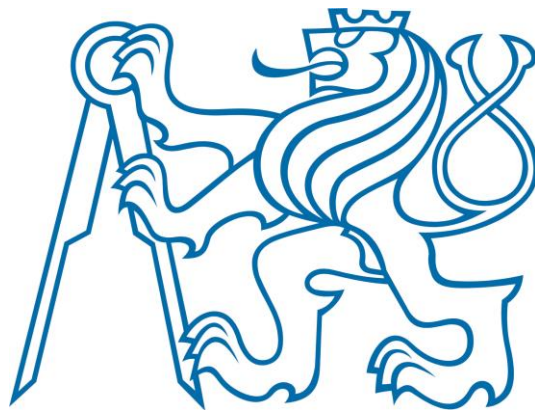


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ v PRAZE

Fakulta stavební



DIPLOMOVÁ PRÁCE

2017

Bc. Karel Fazekas



**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**

---

**Fakulta stavební  
Katedra silničních staveb**

**Degradační modely vozovky a stanovení odolnosti proti trvalým  
deformacím**

**Pavement degradation modeling and determination of resistance to  
permanent deformation**

Diplomová práce

Studijní program: Stavební inženýrství

Studijní obor: Konstrukce a dopravní stavby

Vedoucí práce: Ing. Josef Žák, Ph.D

Karel Fazekas

---

Praha, 2017



## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

### I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Fazekas Jméno: Karel Osobní číslo: 395623  
Zadávající katedra: Katedra silničních staveb  
Studijní program: Stavební inženýrství  
Studijní obor: Konstrukce a dopravní stavby

### II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce: Degradáční modely vozovky a stanovení odolnosti proti trvalým deformacím.

Název diplomové práce anglicky: Pavement degradation modeling and determination of resistance to permanent deformation

Pokyny pro vypracování:

Diplomová práce bude zaměřena na téma stanovení odolnosti konstrukcí vozovek proti trvalým deformacím ve formě vyjetých kolejí. Bude provedena řešerše výpočetních postupů používaných pro stanovení odolnosti proti vzniku trvalých deformací v konstrukcích vozovek u nás a v zahraničí. V rámci práce bude provedeno měření odolnosti asfaltových hutněných směsí proti trvalým deformacím pomocí dvou vybraných laboratorních metod. Očekávaným výsledkem práce bude posouzení vybraných konstrukcí vozovek s pomocí metod používaných v zahraničí.

Seznam doporučené literatury:

- TP170, Navrhování vozovek pozemních komunikací, Technické podmínky Ministerstva dopravy ČR, 2004
- Špůrek, J., Silniční stavitelství II. Stavba silnic a dálnic. SNTL Praha, 1979
- Čorej, J. a kol., Mechanika vozovek, Žilinská univerzita v Žilině, 2006
- Závěrečné zprávy výzkumného programu SHRP
- TP3/2009, Ministerstvo dopravy pošt a telekomunikací SR Sekcia cestnej dopravy a pozemných komunikací, 2008

Jméno vedoucího diplomové práce: Ing. Josef Žák, Ph.D.

Datum zadání diplomové práce: 3.10.2016 Termín odevzdání diplomové práce: 8.1.2017

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“.*

3.10.2016

Datum převzetí zadání

Podpis studenta(ky)

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracoval samostatně a všechny použité prameny a literatura jsou uvedeny v seznamu citované literatury.

Byl jsem seznámen s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 - školní dílo

V Praze dne 8. 1. 2017

Podpis.....

## **Poděkování**

Děkuji tímto svému vedoucímu bakalářské práce, Ing. Josefu Žákovi, Ph.D, za cenné rady, podnětné připomínky a ochotu při řešení problémů. Rád bych také poděkoval svým přátelům a rodině za poskytnuté zázemí a podporu v celé délce studia.

„Každá cesta, každá silnice je dílo lidských rukou a dovedností, které doprovázejí celou historii existence kulturních národů. Všechny pozemní komunikace jsou svědectvím jejich základní potřeby pro život lidí, pro zvyšování hmotné a duchovní úrovně lidské společnosti. V mysli mnohých z nás se jeví tak samozřejmé a všední, že si neuvědomujeme, kolik umu a technických znalostí je zapotřebí k vytvoření díla, které má sloužit po celé generace a často staletí.“

*( Prof. Ing František Lehovec, CSc. první odstavec předmluvy knihy  
Silnice a dálnice v České republice [3] str. 7 )*

## Abstrakt

Tato diplomová práce je zaměřená na popis viskoelastického chování netuhé vozovky, teoretické principy a návrhové metody používané v České republice a zahraničí. V práci jsou popsány obecné metody výzkumu viskoelastických látek - reologie. Dále byly provedeny výpočty třech konstrukcí vozovek na dvou lokalitách na silnici I/11 Ostrava Rudná a následně porovnány výpočetní metody. Závěrem práce je diskuse výsledků a zhodnocení návrhových metod.

Klíčová slova: Trvalé deformace, vyjeté koleje, netuhá vozovka, reologie, reologické modely

## Abstract

This diploma thesis focuses on description of the viscoelastic behavior of flexible pavement, theoretical principles and design methods used in the Czech Republic and in foreign countries. In this thesis are described general methods of research of viscoelastic materials - rheology.

Consequently the calculation of three pavement structures was done on I/11 road Ostrava Rudná and design methods were mutually compared. And the end of the thesis is a discussion of results and evaluation of the design methods.

Key words: Permanent deformation, ruts, flexible pavement, rheology, rheological models

## Obsah

A	Teoretická část .....	10
1)	Úvod .....	10
2)	Reologie - úvod .....	11
3)	Reologické modely .....	11
4)	Reologie asfaltu a reometrie .....	19
5)	Viskozita a reometrie .....	21
5.1)	Přístroje a postupy pro měření viskozity .....	22
6)	Program SHRP .....	31
7)	SUPERPAVE™ .....	31
8)	Zkušební okruh Wes Track .....	34
9)	Trvalé deformace vozovek - úvod .....	36
10)	Typy a příčiny plastických deformací .....	37
11)	Vyjeté koleje .....	39
12)	Nepravidelné prohlubně a hrboly .....	41
13)	Podélná deformace na celou šířku krytu .....	42
14)	Legislativa .....	42
14.1)	ČSN 73 6175 Měření a hodnocení nerovnosti povrchů vozovek <b>12</b> .....	43
14.2)	TP 82 Katalog poruch netuhých vozovek .....	44
14.3)	TP 87 Navrhování údržby a oprav netuhých vozovek [15] .....	45
15)	Návrhové přístupy .....	47
15.1)	Česká republika .....	47
15.2)	Popis normy ČSN EN 12697 -22 [1] .....	47
15.3)	Zkušební postup .....	48
15.4)	Výpočet a interpretace výsledků .....	49
15.5)	Malé zkušební zařízení - postup B .....	49
15.6)	Požadavky ČSN EN 13108-1 .....	49
15.7)	Slovenská republika .....	52
15.8)	Výpočet obecně .....	52
15.9)	Kritéria pro hloubku kolejí .....	54
16)	Program CalMe .....	54
17)	Závěr teoretické části .....	55



<b>B</b>	<b>Praktická část .....</b>	<b>56</b>
1)	Úvod .....	56
1.1)	Skladba konstrukce vozovky č.1.....	56
1.2)	Skladba konstrukce vozovky č.2 .....	57
1.3)	Skladba konstrukce vozovky č.3 .....	57
1.4)	Dopravní zatížení.....	57
2)	Posouzení vozovky dle TP 3/2009 .....	59
2.1)	Skladba vozovky č. 1 na úsek č. 1.....	59
2.2)	Skladba vozovky č.1 na úsek č. 2 .....	63
3)	Posouzení vozovky metodikou dle programu CalMe .....	69
3.1)	Posouzení konstrukce vozovky č. 1 na úseku č. 1.....	70
<b>C</b>	<b>Závěr.....</b>	<b>76</b>
1)	Zhodnocení návrhových metod a diskuse výsledků.....	76
1.1)	Česká republika .....	76
1.2)	Slovenská republika .....	77
1.3)	Metodika CalME.....	80
2)	Závěr.....	82
	<b>Příloha 1 .....</b>	<b>84</b>
1)	Výsledky výpočtů.....	84
1.1)	TP 3/2009 .....	84
	<b>Příloha 2 .....</b>	<b>88</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY .....</b>	<b>98</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY - obrázky .....</b>	<b>100</b>
	<b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>	<b>101</b>
	<b>SEZNAM TABULEK .....</b>	<b>102</b>
	<b>SEZNAM GRAFŮ .....</b>	<b>103</b>

# A Teoretická část

## 1) Úvod

Rozvoj automobilizace, který nastal na počátku 20. století, znamenal přesun dopravy z dosud používaných stezek a cest na moderní, uměle vytvářené konstrukce - silnice. Znamenalo to vývoj nových technologií v oboru konstrukcí vozidel, která se začínala stávat rychlejší, pohodlnější a hlavně kapacitnější.

Tento fakt odstartoval přesun dopravy osob a zboží na silnice. Začínaly vznikat nákladní kapacitní automobily, které byly jednak rychlejší a efektivnější než koňské povozy, ale také dostupnější a mobilnější než dosud tradičně užívaná železnice.

Proto nastal nezanedbatelný přesun materiálu z železnic na silnice. A v meziválečném období dokonce nastal prakticky konec voroplavby na dolní Vltavě, neboť stavbou kvalitní a dostatečně široké silnice z Vyššího Brodu do Českého Krumlova začalo být efektivnější dopravovat kmeny stromů ne po vodě, ale na korbě nákladních vozidel. V dokumentárním cyklu České televize Hledání ztraceného času jsou k vidění krátké snímky, kdy po mostě pod hradem Rožmberk jede nákladní vůz plný kmenů a pod mostem proplová jeden z posledních pramenů voru v čele s vrátným Bohumilem Sypalem.

Tedy nastalo období, kdy se každoročně přepravilo víc a víc nákladu a zároveň vzrůstal stupeň motorizace. To si kladlo za fakt nejen stavbu nových a kvalitních silnic, ale i jejich údržbu a vývoj nových směrů v projektování.

Ty směry byla dva - první z pohledu bezpečnostního a druhý z pohledu konstrukčního. Bylo potřeba vyvinout nové materiály, technologie a vozovky konstruovat jako tzv. bezprašné.

K tzv. odprašnění se začaly používat v zásadě tři materiály, a sice dlažba, cementový beton a kamenivo, resp. šterkopísky obalené asfaltem.

A právě poslední materiál, tedy asfaltem obalené nebo stmelené kamenivo, se stal základem pro většinu vozovek. Asfaltové pojivo, ale i asfaltová směs, prošla mnoholetým vývojem a studiem, jak dělat tyto asfaltové neboli netuhé vozovky kvalitnějšími a únosnějšími.

Ovšem proti tomu šel výše popsáný rozvoj především těžké automobilové dopravy, která klade větší a větší nároky na kvalitu pojiva, směsí, ale i technologii provádění.

V posledních letech se setkáváme s nárůstem zejména tranzitní kamionové dopravy, kdy vozy jsou mnohdy přetížené nebo využívají plně svou konstrukční kapacitu.

Ruku v ruce s tím jde ovšem rozvoj poruch, které od takové dopravy vznikají. Jsou to jednak tvorba trhlin a tvorba trvalých tzv. plastických deformací.

Tato práce si nese za cíl objasnit některá fakta o chování netuhých vozovek a jejich odezvy v oblasti trvalých deformací, zhodnotit návrhové přístupy České a Slovenské republiky a také přístup používaný v USA. Nakonec pak stanovení doporučení k případnému dalšímu studiu a aplikaci konkrétního návrhového postupu v České republice.

## 2) Reologie - úvod

Při běžných výpočtech stavebních konstrukcí se v praxi počítá podle teorie pružnosti a podle teorie plasticity. To znamená, že pro teorii pružnosti je v platnosti Hookův zákon, kde je deformace materiálu od vnějších sil přímo úměrná napětí vzniklému v průřezu.

Tato teorie ovšem platí jen pro malé silové zatížení a od nich vzniklé malé deformace. Dále také platí jen pro materiály, které se chovají čistě pružně nebo je jejich pracovní diagram tvořen pružnou částí.

Při velkém silovém zatížení vzniká napětí a deformace za meze kluzu materiálu a poté se daný prvek chová plasticky, kdy vznikají nevratné deformace. Při takových namáhání se postupuje podle teorie plasticity, např. Trescovi nebo von Misesovi. Do úvahy připadá i chování tzv. pružnoplastické, které zahrnuje v pracovním diagramu jak chování čistě pružné v oblasti malých deformací, tak chování plastické po dosažení meze kluzu.

Ovšem v silničním stavitelství je užíváno jako pojivo pro hutněné asfaltové směsi asfalt, tedy materiál, který v jistých fázích vykazuje chování blízké pružnému a v jiných blízké plastickému chování a hlavně vykazuje chování typické pro viskózní materiál, ale nejen v závislosti na silovém namáhání, ale i na jiných typech např. teplotních - nesilových nebo v závislosti na periodičnosti zatížení.

Takový materiál spadá do oblasti materiálů nazývaných viskoelastické. Do této množiny spadají dále materiály viskoplastické a pseudoplastické, obecně nazývané ne-Newtonovské materiály.

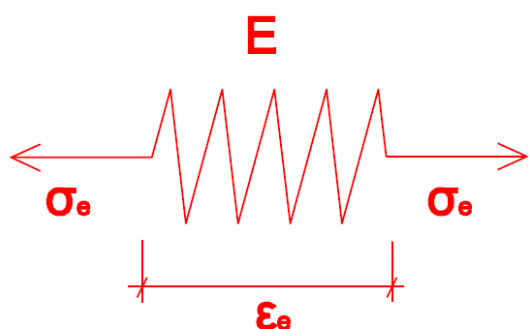
Pro takové materiály, které mají tendenci se při určitých stavech blížit chováním viskózní kapaliny a při jiných zase pružné hmotě, byl poměrně nedávno vyvinut samostatný vědní obor nazývaný reologie.

Dle [4] je slovo reologie odvozeno z řeckého panta rhei neboli vše plyne. Výstižné, neboť tento obor zkoumá odezvu materiálů v závislosti na dynamických složkách různých veličin jako např. času, teplotě, frekvenci zatížení. Umíme díky tomu zkoušet a popsat podíl viskózních a elastických veličin u asfaltového pojiva a tak simulovat dynamické zatížení vozovek od těžké dopravy a predikovat rozvoj trvalých deformací.

## 3) Reologické modely

V reologii se pro popis chování materiálu používají tzv. reologické modely skládající se z elementárních článků. Takové modely se používají k nahrazení diskrétního nebo spojitého spektra, tedy k modelování daného problému. Takový model musí dostatečně aproximovat chování spektra a posléze je možné vyjádření materiálové funkce.

Jako základní článek se používá pružina, viz obr. 1.



Obr. 1: Reologický článek - pružina

Nekonečně malý element materiálu reprezentovaný dokonalou pružinou se chová dle Hookova zákona, kde napětí je rovno součinu poměrné deformace a modulu pružnosti daného materiálu dle vztahu:

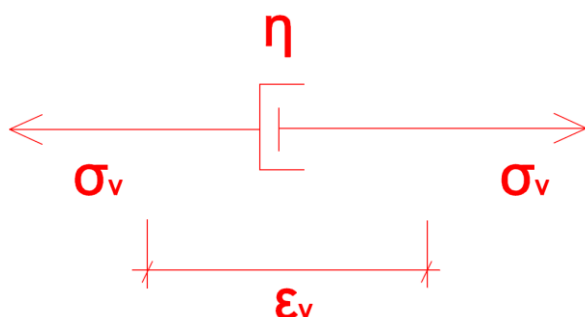
$$\sigma = E\varepsilon [Pa] \quad (3.1)$$

Druhým základním článkem je vazký tlumič, viz obr. 2. Ten na rozdíl od pružiny není závislý na tuhosti, ale na rychlosti zatěžování. To si lze představit jako sklenici plnou medu, kde budeme-li míchat pomalu, nebude klást med větší odpor. Při zrychlování míchání ale půjde tento úkon stále obtížněji.

Základní vztah pro vazký tlumič:

$$\sigma = \eta\dot{\varepsilon} [Pa \cdot s] \quad (3.2)$$

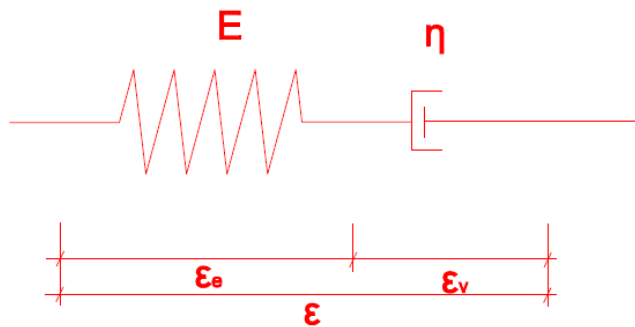
- $\nu$       materiálová konstanta - viskozita
- $\dot{\varepsilon}$      časová derivace deformace



Obr. 2: Reologický článek - vazký tlumič

Reologické modely vznikají sériovým nebo paralelním zapojováním základních článků. V reologii se užívá více základních modelů, viz níže. Složitější modely ovšem obsahují další kombinace zapojení více základních modelů.

Základním modelem pro stavební materiály, ale hlavně pro asfaltový beton, je Maxwellův model - viz obr. 3.



Obr. 3: Reologický model - Maxwellův model

Oba články při sériovém zapojení přenášejí stejné napětí, ale celková deformace je součtem deformací obou článků (princip superpozice). Toto tvrzení je matematicky zapsáno následovně:

$$\sigma = \sigma_v = \sigma_e \quad (3.3)$$

$$\epsilon = \epsilon_v + \epsilon_e \quad (3.4)$$

Tento model popisuje fakt, že při působení zatížení se nejprve deformuje pružina a ta následně deformuje tlumič. Systém pak relaxuje do tzv. stavu nulového napětí. Protážení v pružině, které deformovalo tlumič, se odrazí jako trvalá deformace systému.

Pomocí tohoto modelu jsme schopni vypočítat tzv. funkci poddajnosti materiálu a relaxační funkci viz níže.

### Funkce poddajnosti

Funkce poddajnosti se používá pro dotvarovací zkoušku, tedy stanovení deformace od dotvarování při konstantním napětí.

Odvození funkce poddajnosti dle [5]

Odvození funkce poddajnosti si lze představit jako model, který zatížíme konstantním napětím  $\sigma(t) = \hat{\sigma}$  v čase  $t = 0$ .

Nyní můžeme ze znalosti vztahů (3.1 - 3.4) stanovit pružnou deformaci:

$$\epsilon_e(t) = \frac{\sigma_e(t)}{E} = \frac{\hat{\sigma}}{E} \quad (3.5)$$

pro vazkou deformaci platí vztah:

$$\dot{\epsilon}_v(t) = \frac{\sigma_v(t)}{\eta} = \frac{\hat{\sigma}}{\eta} \quad (3.6)$$

Tuto diferenciální rovnici s konstantní pravou stranou je nutno integrovat a získat tak obecné řešení v podobě:

$$\varepsilon_v(t) = \frac{\hat{\sigma}}{\eta} t + C, \quad (3.7)$$

kde konstanta  $C$  je libovolnou integrační konstantou, která se vyjádří z okrajových podmínek za předpokladu nulové deformace tlumiče ve chvíli aplikace zatížení. Formálně zapsáno:

$$\varepsilon_v(0) = 0 \Rightarrow C = 0.$$

Nyní můžeme přistoupit k součtu dílčích deformací článku a určit celkovou deformaci:

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_e(t) + \varepsilon_v(t) = \frac{\hat{\sigma}}{E} + \frac{\hat{\sigma}}{\eta} t = \hat{\sigma} \left( \frac{1}{E} + \frac{t}{\eta} \right) \quad (3.8)$$

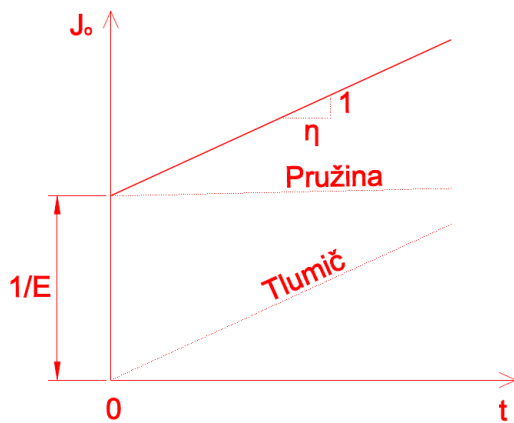
Funkce poddajnosti Maxwellova modelu je tedy:

$$J_{0(t)} = \left( \frac{1}{E} + \frac{t}{\eta} \right) H(t), \quad (3.9)$$

kde  $H(t)$  je Heavisidova funkce času formálně zapsaná pro napětí  $\sigma(t) = \hat{\sigma}H(t - \hat{t})$ ,

$H_s = \begin{cases} 0 & \text{pro } s < 0 \\ 1 & \text{pro } s \geq 0 \end{cases}$ . Tato funkce ukazuje závislost času, neboli historii zatížení, kdy zatížení začne působit v čase  $t$  a skončí v čase  $\hat{t}$ . V případě výše uvedeného odvození funkce poddajnosti byl čas  $t$  volen jako  $0$ , uvažovaný materiál byl tzv. bez stárnutí, neboli jeho materiálové parametry byly v čase konstantní.

Na obr. 4 je názorně vidět závislost poddajnosti materiálu na čase.



Obr. 4 Závislost poddajnosti na čase

Stárnutí:

V předchozím případě poddajnosti bylo uvažováno, že je v obecném čase aplikováno zatížení a to zůstává konstantní po určitou dobu, tedy až do konce jeho působení. Od konstantního zatížení vznikla deformace  $\Rightarrow$  dotvarování. Bylo ovšem také uvažováno, že jedinou proměnou je čas, tedy rozdíl mezi koncem a počátkem zatížení. Materiálové vlastnosti zůstávají konstantní po celou dobu zkoušky, resp. životnosti.

Viskoelastický materiál je ovšem na čase závislý i svými materiálovými vlastnostmi. Tomuto fenoménu se říká stárnutí.

Stárnutí si lze představit jako postupnou proměnu mikrostruktury materiálu. Např. stlačení pórů, přemístění nebo podrcení zrn kameniva a následné zatlačení pojiva do vzniklého prostoru. Tento fakt má vliv na změnu materiálových vlastností, zejména na tuhost. V literatuře [5] lze najít vztahy pro výpočet funkce poddajnosti pro stárnoucí model.

### Relaxační funkce:

Viskoelastický materiál je vystaven dalšímu fenoménu zvanému relaxace. Tato problematika je lépe pochopitelná, pokud si představíme, že materiál bude v obecném čase vystaven deformaci, která bude po určitou dobu působit konstantně. Průběh napětí při dané deformaci bude v čase proměnný a bude narůstat v závislosti na časové změně materiálových vlastností, zejména tuhosti.

Odvození relaxační funkce dle [5]

Při vystavení modelu konstantní deformací dopředu nevíme, jak se budou dílčí články deformovat. Víme ale, že musí být dodržen vztah (3.4) jen s časovou závislostí. Po uvážení tohoto faktu bude vztah (3.4) vypadat následovně:

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_e(t) + \varepsilon_v(t) \quad (3.10)$$

Protože pro viskózní tlumič platí přímá úměrnost mezi rychlostí deformace a napětím, je nutno výše uvedený vztah přepsat do diferenciální podoby. Následně ze znalosti, že oba články přenášejí stejné napětí, můžeme pomocí něho vyjádřit i dílčí deformace.

$$\dot{\varepsilon}(t) = \dot{\varepsilon}_e(t) + \dot{\varepsilon}_v(t) \quad (3.11)$$

Po vyjádření dílčích deformací dle vztahů (3.1) a (3.2) může výše uvedenou diferenciální rovnici přepsat do tvaru:

$$\frac{\dot{\sigma}}{E}(t) + \frac{\sigma}{\eta}(t) = \dot{\varepsilon}(t) \quad (3.12)$$

Tuto rovnice lze zjednodušit, když uvážíme fakt, že jsme zatížili model v čase  $t=0$  a tudíž je rychlost deformace pro časy  $t > 0$  nulová, neboť bylo výše uvedeno, že deformace, které je model vystaven je konstantní. Zjednodušená rovnice pak vypadá následovně:

$$\frac{\dot{\sigma}}{E}(t) + \frac{\sigma}{\eta}(t) = 0 \quad (3.13)$$

Obecné řešení diferenciální rovnice hledáme ve tvaru:

$$\sigma(t) = C e^{-Et/\eta} = C e^{-t/\tau}, \quad (3.14)$$

kde  $\tau = \eta/E$  je tzv. relaxační čas, vyjadřující rychlost přerozdělení deformace mezi články, více viz [5].

Vyjádření konstanty  $C$  vyžaduje hlubší zamyšlení nad problémem. Nelze uvažovat, že počáteční napětí je nula, protože v čase nula došlo ke skokovému zatížení a deformaci a tak nemůžeme použít derivaci, neboť takový problém nemá řešení. Vztah (3.13) má smysl až pro

vývoj v časech různých od nuly. Dále je nutno uvážit, že skoková deformace musí být prvotně převzata pouze pružinou, neboť pro tlumič by napětí rostlo nad všechny meze. S tímto uvážením můžeme tvrdit, že počáteční deformace je rovna pružné deformaci a napětí přenášené modelem je potom:  $\sigma_0 = E\hat{\varepsilon}$  a následně po dosazení je integrační konstanta  $C = E\hat{\varepsilon}$ . Časový vývoj napětí má poté tvar:

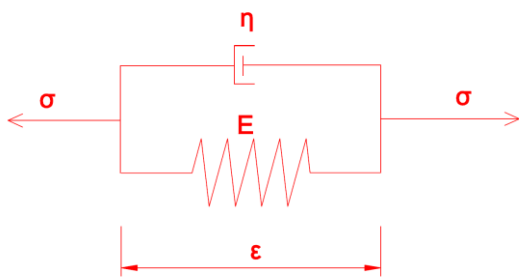
$$\sigma(t) = E\hat{\varepsilon}e^{-t/\tau} \quad (3.15)$$

Relaxační funkce pro Maxwellův model je poté:

$$R_0(t) = Ee^{-\frac{t}{\tau}}H(t) \quad (3.16)$$

Kelvinův model:

Tento druhý model patří mezi základní modely a je používán pro dotvarovací zkoušku. Skládá se z paralelního řazení pružiny a tlumiče dle obr. 5.



Obr. 5: Reologický model - Kelvinův model

Odvození funkce poddajnosti dle [5]

Z obr. 5 je patrné, že deformace celého modelu musí být stejná, tedy v obou člancích je stejná deformace. O napětí platí, že se rozdělí částečně do pružiny a částečně do tlumiče. To lze napsat vztahem:

$$\varepsilon = \varepsilon_e = \varepsilon_v \quad (3.17)$$

$$\sigma = \sigma_e + \sigma_v \quad (3.18)$$

Nyní zatížíme model v čase  $t=0$  konstantním napětím  $\sigma(t) = \hat{\sigma}$ . Ze vztahu (3.18) zatím pouze víme, že součet napětí je roven  $\hat{\sigma}$ , ale to, jak velké napětí jednotlivé články přenášejí, zatím nevíme.

Pokud vztah pro napětí přepíšeme pomocí deformace a modulu pružnosti pro pružinu a pro tlumič vyjdeme z poznatku, že napětí je úměrné rychlosti deformace, dostaneme diferenciální rovnici:

$$E\varepsilon(t) + \eta\dot{\varepsilon}(t) = \hat{\sigma} \quad (3.19)$$



Tato diferenciální rovnice prvního řádu s konstantními koeficienty má hledané obecné řešení ve tvaru:

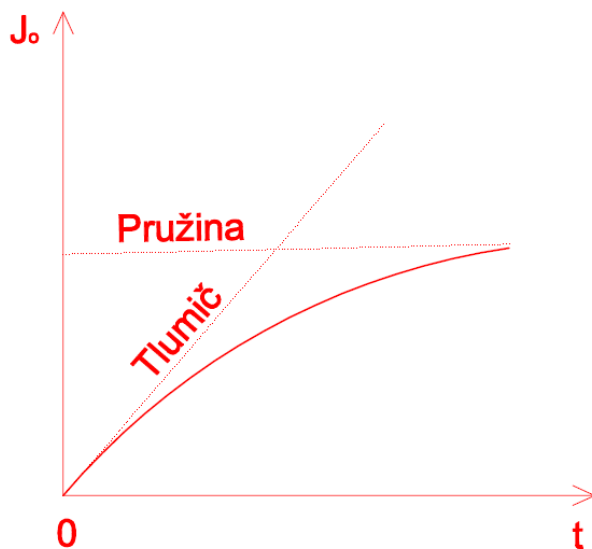
$$\varepsilon(t) = \frac{\hat{\sigma}}{E} + C e^{-\frac{E}{\eta}t} \quad (3.20)$$

Integrační konstantu umíme získat, pokud uvážíme, že v čase  $t=0$ , kdy začalo působit zatížení je deformace nulová. Pokud toto dosadíme do vztahu (3.20), vyjde  $C = -\frac{\hat{\sigma}}{E}$ . Po dosazení do rovnice vychází:

$$\varepsilon(t) = \frac{\hat{\sigma}}{E} \left[ 1 - e^{-\frac{E}{\eta}t} \right] \quad (3.21)$$

Funkce poddajnosti Kelvinova modelu má tvar:

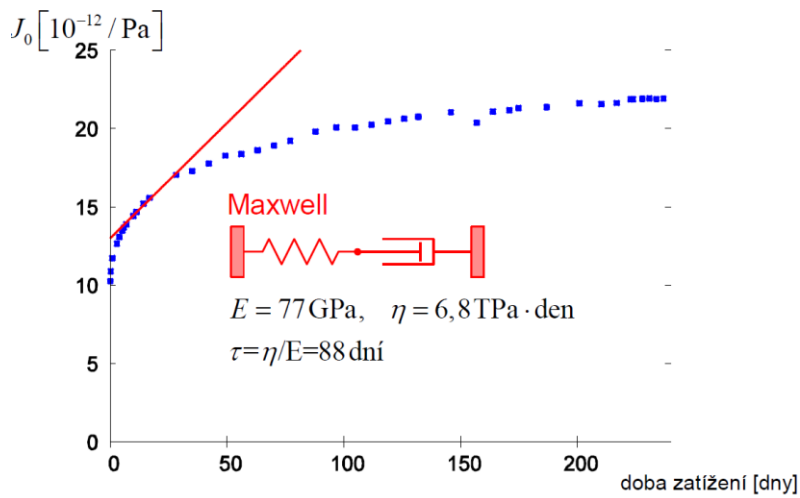
$$J_o(t) = \frac{1}{E} \left[ 1 - e^{-\frac{E}{\eta}t} \right] H(t) \quad (3.22)$$



Obr. 6: Funkce poddajnosti pro Kelvinův model

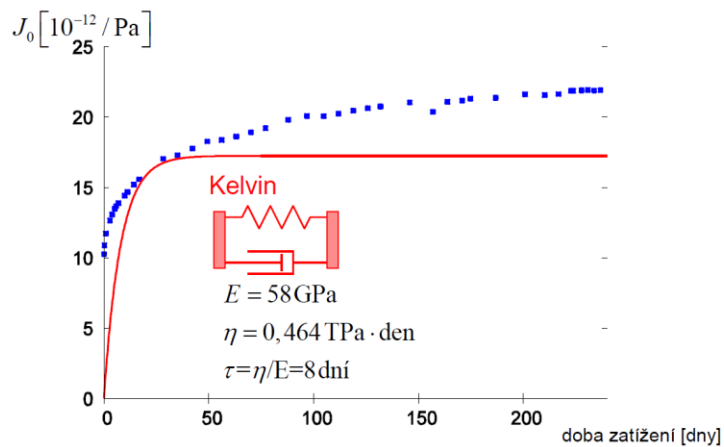
Výběr modelu závisí na co největší aproximaci reálného chování. Proto se používají různé kombinace základních modelů, případně jejich sestavení do tzv. řetězců viz [5, 6] a obr.7, 8, 9.

### Aproximace naměřené funkce poddajnosti



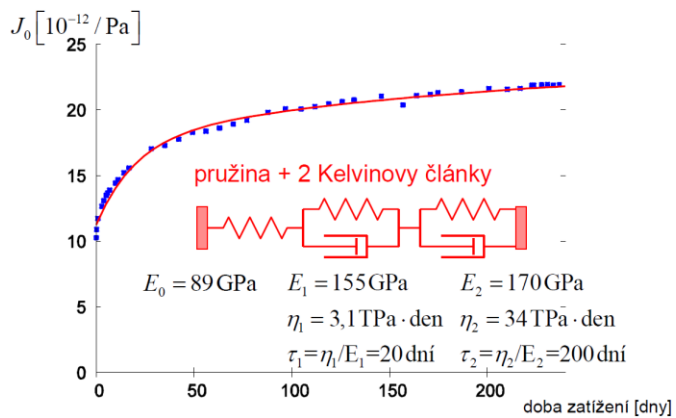
Obr. 7: Aproximace pomocí Maxwellova modelu [6]

### Aproximace naměřené funkce poddajnosti



Obr. 8: Aproximace pomocí Kelvinova modelu [6]

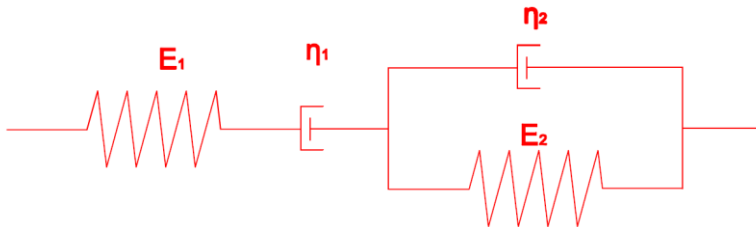
### Aproximace naměřené funkce poddajnosti



Obr. 9: Aproximace pomocí Kelvinova modelu a pružiny [6]

Další používané modely:

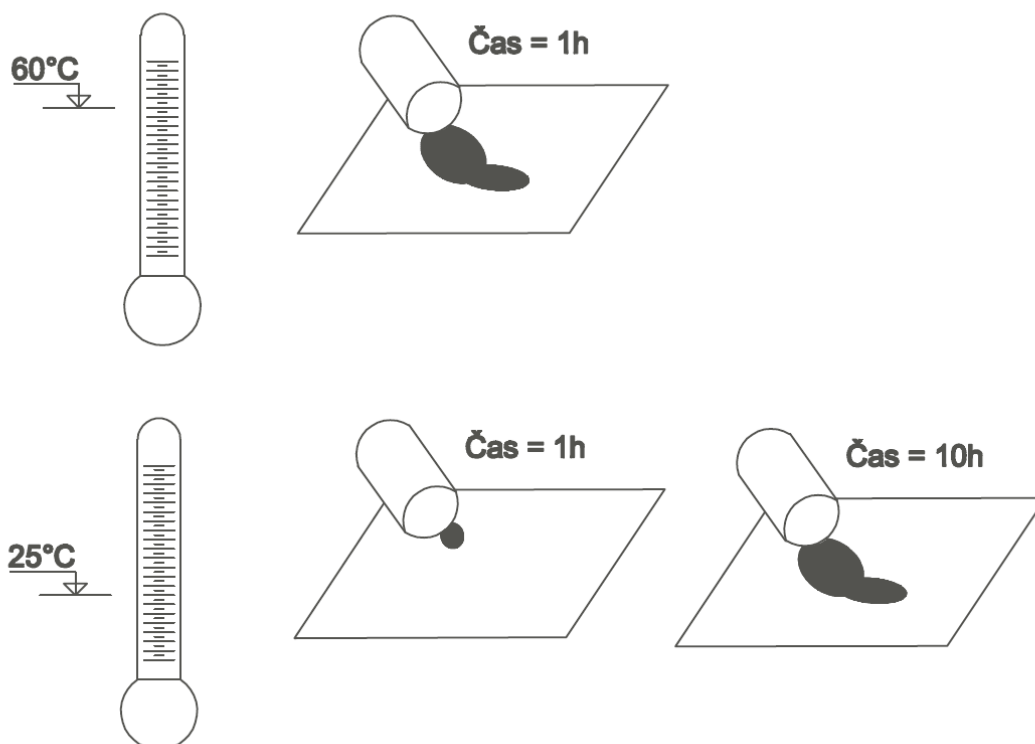
Dalšími reologickými modely jsou Burgesův, viz obr.10, Thompsonův a Binghamův. Tyto modely jsou používány k vyšetřování stavů relaxace až k nulovému napětí, tečení, ploužení. Existuje ještě řada dalších a modifikace základních, avšak tato konkrétní problematika by byla nad rámec této práce.



Obr. 10: Reologický model - Burgesův model

#### 4) Reologie asfaltu a reometrie

Jak již bylo řečeno, asfalt je materiálem viskoelastickým, tedy kombinujícím chování elastických látek a vazkých. Jeho chování je tedy závislé jednak na teplotě a jednak na velikosti resp. frekvenci zatížení. Další nezanedbatelný prvek je čas. V [4] se uvádí obecný příklad časové a teplotní závislosti chování asfaltového pojiva při 60 °C po jedné hodině stejně jako při 25 °C po deseti hodinách. Toto tvrzení je pro názornost vyobrazeno na obr. 11.



Obr. 11: Princip časové superpozice asfaltové směsi [4]

Při popisu chování asfaltu nebo dimenzování konstrukcí vozovek nás zajímají tři typy teplotního režimu, a to vysoké, nízké a střední teploty. Pro tuto práci je stěžejní chování asfaltu při vysokých teplotách.

Při vysokých teplotách, které nastávají na osluněném povrchu v letních dnech nebo v teplých oblastech kolem rovníku, se asfaltové pojivo blíží vlastnostmi viskózní kapalině. Zrovna tak se bude asfaltová směs chovat, bude-li na ni působit velké zatížení, např. od proudu těžkých vozidel pojíždějících malou rychlostí či dokonce vozidel stojících na místě. Poté se zatížení mění ve statické a na takové asfaltová směs může reagovat v podobě trvalých deformací.

Na obr. 12 jsou zachyceny trvalé deformace litého asfaltu v parkovacím pruhu v ul. Božkova v Praze 6 Dejvicích. Jedná se o exponované místo přesně ve stopě kol vozidel parkujících u chodníku.



Obr. 12: Trvalé deformace v parkovacím pruhu

Opakem extrémních vysokých teplot jsou pochopitelně teploty nízké. Při tomto působení se asfaltová směs chová převážně pružně a v podstatě dochází k porušení různým druhem trhlin a to pokud je překročena tahová pevnost nebo dojde k vytvoření únavové trhliny. U netuhých vozovek s podkladem z hydraulicky stabilizovaných směsí (vozovka polotuhá) nastává i efekt prokopírování trhlin smršťovacích na povrch obrusné vrstvy.

Zrovna tak nastává pružná odezva při zatížení dopravou rychle jedoucí. Takováto konstrukce je poté namáhána dynamicky a rozhodujícím faktorem je únavové porušení po projetí  $n$  návrhových náprav.

Takové látky jsou také náchylné na tzv. dotvarování. To vzniká při velkých zatíženích a přetvořeních, které vede na změnu struktury látky. Tato deformace vzniká za stálého napětí a je skutečně možné pozorovat změnu tvaru prvku. Po takovém přetvoření zůstává trvalá plastická deformace a těleso už nikdy nezmění tvar do původního stavu, resp. limitně se mu bude blížit.

## 5) Viskozita a reometrie

V této podkapitole budou popsány základní reologické zkoušky a zkoumané veličiny. Nejprve je však nutno blíže objasnit veličinu zvanou viskozita.

Viskozita:

Viskozita neboli vazkost je základní veličina charakterizující kapalné látky. Pokud zavedeme předpoklad, že od vnějšího zatížení vznikne trvalá deformace projevující se tečením a bude-li platit, že proudění je laminární, bude se tok kapaliny projevovat jako smyková deformace  $\gamma$ . Jelikož platí, že sousední vrstvy kapaliny se nepohybují stejnou rychlostí vlivem tření a molekulárních vazeb, bude na styku těchto vrstev vznikat také tečné napětí  $\tau$ .

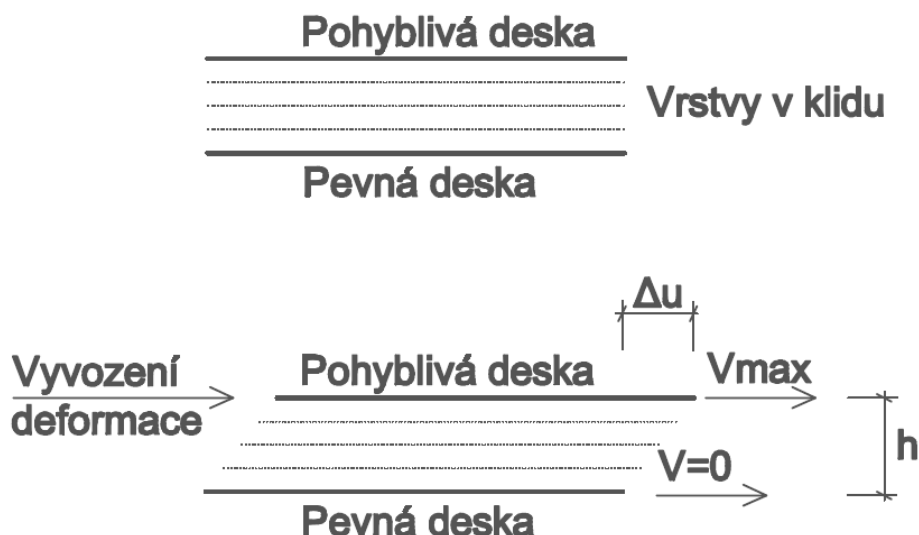
Toto tvrzení dokumentuje obr. 13.

Tečné napětí  $\tau$  je odvozeno z Newtonova zákona, kdy tečné napětí je přímo úměrné přírůstku rychlosti  $dv$  na styku dvou vrstev a nepřímo úměrné vzdálenosti vrstev  $dy$ . Tento poměr  $dv/dy$  se označuje jako gradient rychlosti.

$$\tau = \eta \frac{dv}{dy} \quad [Pa] \quad (5.1)$$

Aby výše uvedený vztah platil, vstupuje do výpočtu koeficient  $\eta$  [ $Pa \cdot s$ ]. Tento koeficient pro pochopení problematiky popisuje, jak velkou sílu je zapotřebí vyvinout, aby byla vrstva o ploše  $1 \text{ m}^2$  posunuta na úkor sousední ve vzdálenosti jeden metr přesně o jeden metr.

Parametr  $\eta$  se určuje jednak výpočtem z Newtonova zákona nebo experimentálně pomocí přístrojů zvaných viskozimetry viz dále.



Obr. 13: Rychlost deformace viskózní látky

Pro potřeby viskozimetrie se zavádí tzv. dynamická viskozita.

Odvození lze sestavit, pokud bude dle obr. 13 působit na viskoelastický model vnější zatížení, které vyvolá smykové přetvoření  $\gamma$ .

To lze vypočítat jako [4]:

$$\gamma = \frac{\Delta u}{h} \quad (5.2)$$

$\Delta u$  ..... diferenciální deformace modelu  
 $h$  ..... výška modelu

Protože se jedná o veličinu dynamickou, přepíše se do pohybového tvaru závislost smykové deformace na čase:

$$\dot{\gamma} = \frac{d\gamma}{dt} \quad (5.3)$$

Dynamická viskozita se pak dle Newtonova zákona vypočítá jako:

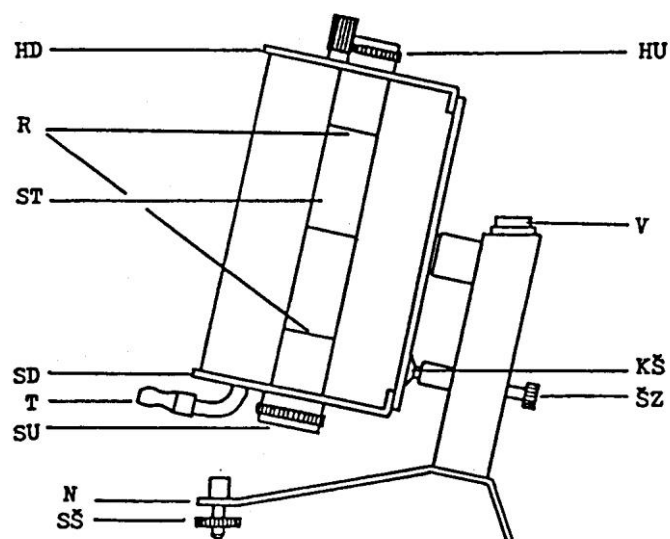
$$\eta = \tau \dot{\gamma} = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \quad [mPas] \quad (5.4)$$

### 5.1) Přístroje a postupy pro měření viskozity

#### Höpplerův viskozimetr

Tento viskozimetr patří do skupiny kapilárních viskozimetrů a řadí se mezi nejpřesnější měřící zařízení. Podstatou zkoušky je měření času, který je potřeba pro dráhu horního okraje kuličky od horní rysky tubusu po dolní rysku. K měření se používají digitální stopky. Jedinou nevýhodou toho měření je, že se dají měřit pouze průhledné newtonovské tekutiny a tedy tento viskozimetr není vhodný pro vyšetřování asfaltového pojiva.

- HD ..... horní deska
- HU ..... horní uzávěr
- KŠ ..... kotvení šroubu se zářezem
- N ..... noha
- PT ..... pryžové těsnění
- R ..... horní, resp. spodní  
ryska na spádové trubici
- SD ..... spodní deska
- SŠ ..... stavěcí šroub
- ST ..... spádová trubice
- SU ..... spodní uzávěr
- ŠS ..... šroubové spojení
- ŠZ ..... šroub se zářezem
- T ..... připojení termostatu
- TK ..... těsnicí kroužek
- V ..... vodováha
- ZI ..... zátka I
- ZII ..... zátka II



Obr.14 Höpplerův viskozimetr - schéma [101]



Obr. 15: Höpplerův viskozimetr [102]

Principem měření tohoto viskozimetru je tedy rychlost pádu kuličky v dané kapalině. Na kuličku působí jednak Archimedova síla a Stokesův sedimentační zákon. Viskozita kapaliny se pak snadno vypočítá ze znalosti vlastní tíhy kuličky, vztlakové síly a známého odporu prostředí následovně dle [7]:

Vlastní tíha kuličky: 
$$G = \frac{4}{3} \pi r^3 \rho_k g \quad (5.5)$$

r      poloměr kuličky  
g      gravitační zrychlení  
 $\rho_k$     objemová hmotnost materiálu kuličky

Vztlaková síla: 
$$F_a = \frac{4}{3} \pi r^3 \rho_v g \quad (5.6)$$

$\rho_v$     objemová hmotnost kapaliny

Stokesova síla (odpor prostředí):

$$F_s = 6\pi\eta r v \quad (5.7)$$

$\eta$       dynamická viskozita kapaliny  
v      rychlost pádu kuličky

Dle [7] se při zkoušce kulička chová v souladu s 1. Newtonovým zákonem, tedy jde o pohyb rovnoměrný přímočarý a poté musí platit vztah:

$$G - F_a - F_s = 0 \quad (5.8)$$

$$\frac{4}{3}\pi r^3 \rho_k g - \frac{4}{3}\pi r^3 \rho_v g - 6\pi \eta r v = 0 \quad (5.9)$$

Dynamická viskozita se ze vztahu vyjádří následovně:

$$\eta = \frac{2r^2(\rho_k - \rho_v)g}{9v} \quad (5.10)$$

Nespornou výhodou tohoto viskozimetru je jednoduchost měření, relativně nízká pořizovací cena a rychlé a snadné vyhodnocení měření.

Ovšem jak již bylo řečeno výše, pro měření viskozity asfaltu a obecně ne-Newtonovských kapalin není vhodný.

V literatuře [9] lze dohledat modifikaci Höpplerůva viskozimetru na reometr (dle dřívější terminologie konsistometr). Takový přístroj slouží k měření nejen viskozity, ale i pružnosti thixotropie a dalších vlastností živic (v době vzniku publikace byl používán dehet).

Podstata zkoušky spočívá v průniku kuličky zkoumanou kapalinou. Kulička je zatížena svislým tlakem a klesá do kapaliny viz obr. 16. Mezi kuličkou a stěnou nádoby dochází k laminárnímu proudění. Po dobu zkoušky se zaznamenává zatížení kuličky, její rychlost pohybu a teplota. Na kuličku lze dle [9] aplikovat zatížení od 250g do 40 kg.

Viskozita se stanoví výpočtem:

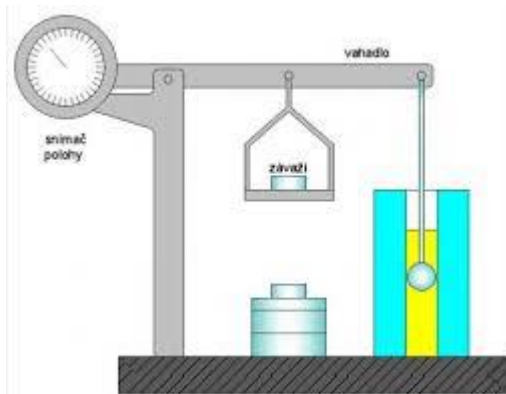
$$\eta = \frac{Gt}{s} K \quad (5.11)$$

G zatížení [g]

t čas [s]

s dráha kuličky v čase  $t$  [cm]

K přístrojová konstanta (pro kuličku  $D_n = 15$  mm,  $K=100$ ) [–]



Obr. 16: Höpplerův reometr [10]

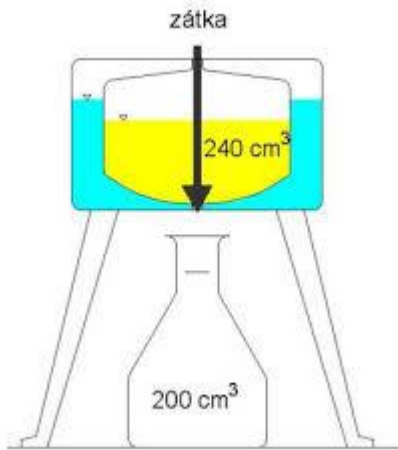
V silničních laboratořích se tedy pro potřeby zjišťování viskozity asfaltu používají přístroje vyvinuté speciálně pro vyšetřování neprůhledných, ale hlavně ne-Newtonovských kapalin.

Nejjednoduššími viskozimetry používanými v silničních laboratořích byly tzv. výtokové viskozimetry, které pracují na jednoduchém principu, kdy se do nádobky s otvorem vespod nabere zkoumaná viskózní kapalina a měří se čas, za který vyteče otvorem. To samé se udělá s kapalinou známých vlastností, např. s olejem, glycerinem atp. Poté se viskozita určí na základě převodních vztahů sestavených pro daný typ viskozimetru. Tato problematika však není náplní této práce, a tak budou dále popsány nejpoužívanější typy měřících přístrojů.



Poznámka:

Literatura [9] uvádí, že pro stanovení viskozity živice (pojem živice je uveden záměrně, protože v době vzniku publikace se ještě používal dehet jako pojivo) se používá Englerův viskozimetr, který obsahuje nádobu s otvorem na dně a měří se rychlost výtoku živičného pojiva do odměrného válce. Výsledkem byla viskozita v tzv. Englerových stupních [°E].



Obr. 17 Englerův viskozimetr [10].

Nejrozšířenějším typem je hlavně rotační viskozimetr. Jeho potřeba pro silniční praxi vyplynula z důvodu nejen složitosti reologie vlastního asfaltového pojiva, ale i z faktu, že dnešní asfalty jsou modifikovány dalšími látkami a aditivy, pro něž nejsou jednodušší měřicí stroje vhodné, neboť nedokáží vhodně popsat chování takových směsí a zůstal by nám tak skryt potenciál, který v sobě především modifikovaná pojiva skrývají.

#### Rotační viskozimetr

Obecně všechny typy rotačních viskozimetrů pracují na stejném principu a tím je rotace tělesa ve zkoumané kapalině. Přístroj v podstatě měří moment síly, který vzniká při rotačním pohybu. Tento fakt lze matematicky zapsat:

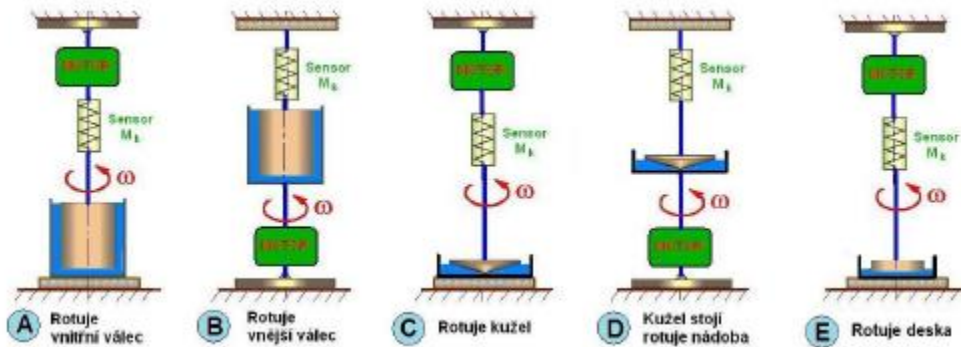
$$M = K\omega\eta \quad (5.12)$$

$K$  geometrická konstanta vystihující měřicí přístroj

$\omega$  úhlová frekvence

$\eta$  dynamická viskozita kapaliny

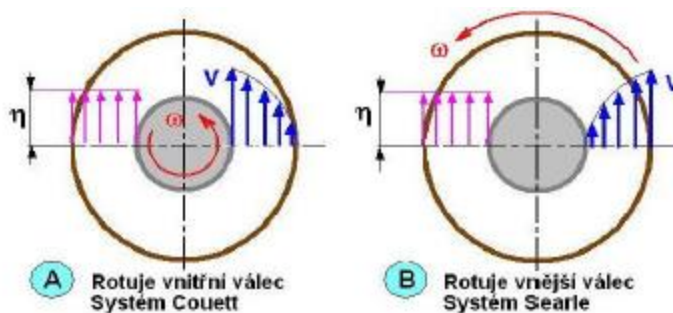
Přístrojů je celá řada dle toho, která část přístroje je pevná a která rotuje. V základní konstrukci rotuje válec ponořený v kapalině, v dalších modifikacích může rotovat nádoba s kapalinou kolem válce nebo místo válce rotuje v kapalině jehlan či destička.



Obr. 18: Schéma typů rotačních viskozimetrů [103]

Při otáčení válce v nádobě s kapalinou dochází ke zrychlení kapaliny, která má největší rychlost proudění na styku s rotujícím válcem a nejmenší na styku s pevným válcem – nádobou, přesně v souladu s principem vzniku smykové deformace kapaliny, viz obr.13. Jako odpor proti rotaci a proudění kapaliny se projeví její odezva v podobě viskozity. Toto je názorně předvedeno na obr. 19.

Viskozimetr zaznamenává počet otáček, rychlost a úhlovou frekvenci. Výpočet dynamické viskozity je na základě vztahů detailně uvedených v [8].



Obr. 19: Odezva kapaliny [103]

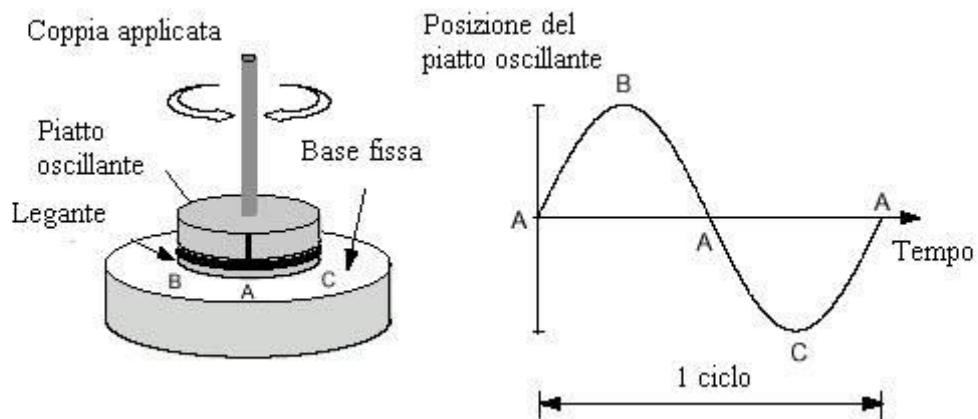
Tento viskozimetr je určen především pro ne-Newtonovské kapaliny, rychlost otáček však nesmí vyvolat turbulentní proudění. Musí být zachován předpoklad z úvodu kapitoly, tedy že režim proudění zůstává laminární.

Nyní budou popsány přístroje pro zkoumání dalších reologických vlastností. Na tato měření se používají tzv. reometry.

#### Dynamický smykový reometr DSR

Tento poměrně nový typ reometru je označován pod zkratkou DSR z anglického Dynamic Shear Rheometer.

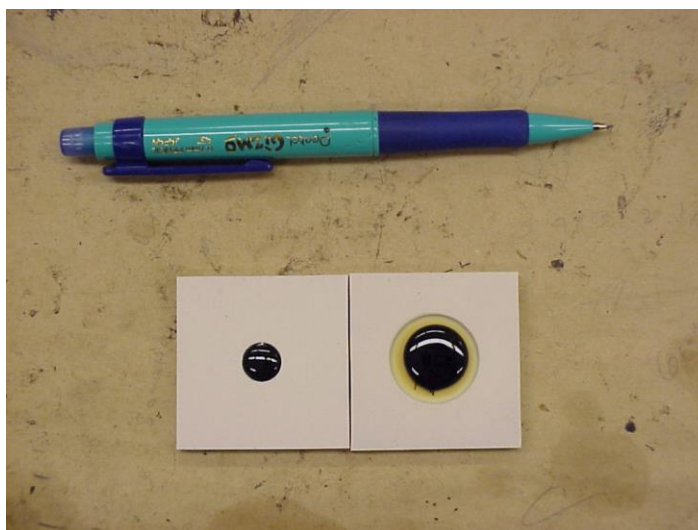
Tento víceúčelový přístroj slouží k vyšetřování nejen přetvárných vlastností pojiva, ale i k únavovým charakteristikám. Princip fungování přístroje je následující: pojivo je nalito mezi dvě destičky, přičemž jedna je pevná a druhá koná oscilující pohyb. Destička se periodicky otáčí z bodu A (obr. 20) ve směru bodu B. Následně se zastaví a otočí zpět přes bod A do směru bodu C. Tento cyklický pohyb slouží k vyšetřování viskózního a elastického chování při různých teplotách a frekvencích oscilace. Cyklické sinusové zatěžování simuluje v podstatě přejezd těžkých náprav po konstrukci vozovky [4].



Obr. 20 Schéma pracovního cyklu DSR [104]

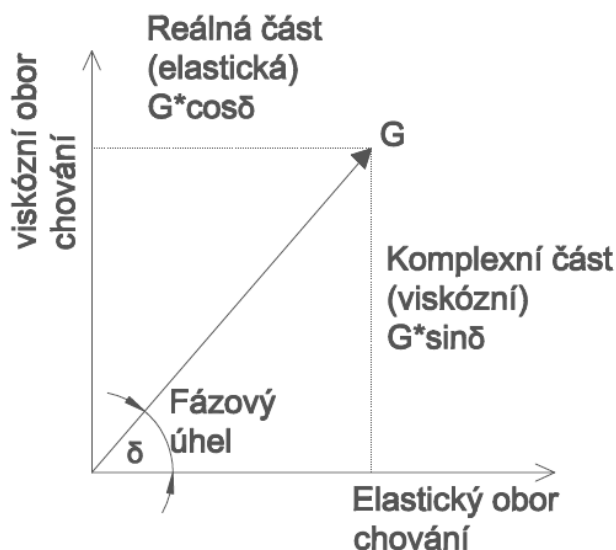
V České republice je pro laboratorní zkoušky pomocí DSR platná norma ČSN EN 14770 *Asfalty a asfaltová pojiva - Stanovení komplexního modulu ve smyku a fázového úhlu - Dynamický smykový reometr*.

Současné reometry jsou dodávány se softwarem, a tak záznam zkoušky a veškeré vyhodnocování probíhá digitálně v počítači laboratoře.



Obr. 21; 22: DSR a vzorek pojiva [105; 106]

DSR je dále používán, viz ČSN EN 14770, ke stanovení tzv. komplexního modulu  $G$  a fázového úhlu  $\delta$ . Je-li zkoumaný materiál vystaven cyklickému smykovému namáhání, poté je komplexní modul veličina definující odolnost materiálu proti přetvoření [4].



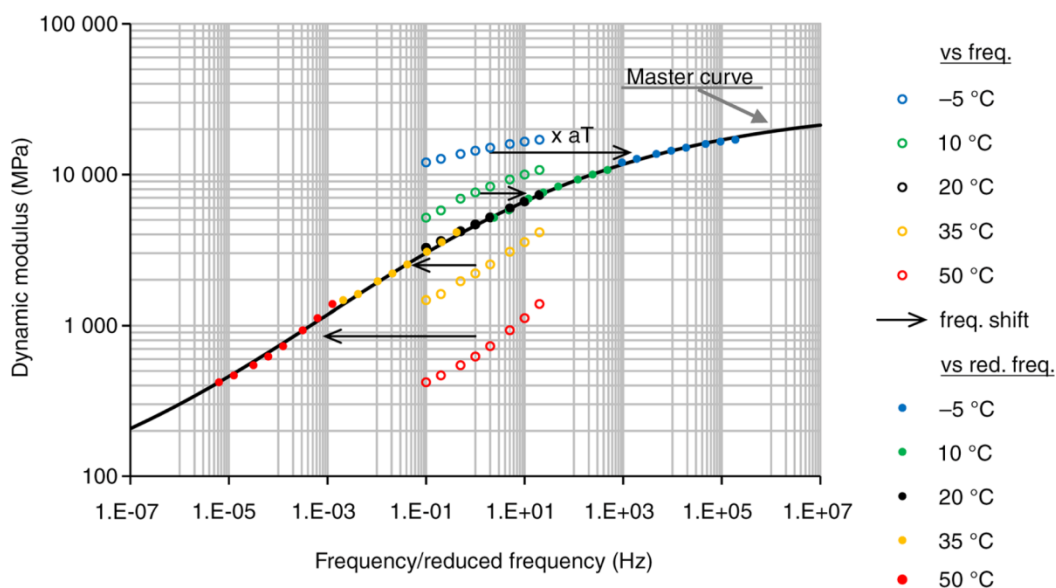
Obr. 23: Komplexní modul grafické znázornění

Jak je vyneseno graficky na obr. 23, komplexní modul si lze představit jako vektor odezvy materiálu na dané cyklické zatížení. Na sklon vektoru, resp. velikost fázového úhlu má významný vliv teplota a frekvence zatěžování. Jak již bylo řečeno, při vysokých teplotách nebo je-li asfalt vystaven zatížení s nízkou frekvencí (pomalý pojezd vozidla), má sklon chovat se jako viskózní kapalina. Poté bude komplexní modul malý a fázový úhel se bude blížit pravému úhlu. V limitním případě pro Newtonovské kapaliny je skutečně  $G = 0$  a  $\delta = 90^\circ$ . V opačném případě v oboru nízkých teplot bude asfalt vykazovat pružné chování, tedy  $G$  bude růst na hodnotě a fázový úhel se limitně bude blížit k nule [4]. Jinými slovy elastické materiály vykazují fázový úhel nulový, viskózní vykazují fázový úhel rovný  $90^\circ$ . Tedy rozsah hodnot úhlu mezi  $0^\circ - 90^\circ$  náleží materiálům viskoelastickým.

Výhodou těchto přístrojů je velká škála měřících kombinací teplot a frekvencí zatížení, tedy lze simulovat různé případy vnějších vlivů, kterým je pojivo, resp. směs ve vozovce vystavena. Z výsledků zkoušek jsme pak schopni sestavit tzv. komplexní křivku označovanou v cizojazyčné literatuře "master curve".

Tato křivka je speciálně sestavená jako závislost komplexního (dynamického) modulu na době a frekvenci zatížení [4]. Prakticky nám dává informace, jak se bude pojivo ve vozovce chovat z hlediska trvalých deformací.

Komplexní křivka, viz obr. 24, je sestavena v tzv. Van der Poelově nomogramu. Na svislé ose je dynamický modul (případně komplexní modul) a na vodorovné ose se objevuje frekvence zatěžování. Z grafu je patrné, že byly provedeny zkoušky pojiva pro různé kombinace teplot a frekvencí zatížení. Principem časověteplotní superpozice je sestavena komplexní křivka jakožto „výslednice“, několika měření. Je tedy opět názorně vidět, co již bylo opakováno, tedy že čím je nižší teplota a vyšší frekvence zatížení, tím bude pojivo tužší a dynamický modul se bude zvětšovat. Naopak čím větší bude teplota asfaltu a nižší frekvence zatížení, tím více bude pojivo vykazovat viskózní chování a jeho náchylnost na tvorbu trvalých deformací vozovky.



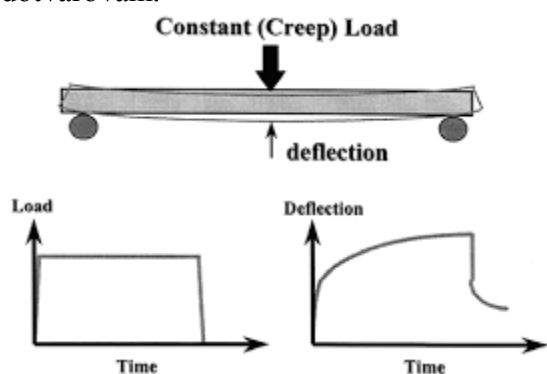
Obr. 24: Komplexní křivka Van der Poelův nomogram [110]

### Průhybový reometr BBR

Pro doplnění problematiky reometrie bude následovně popsán ještě jeden reometr a sice tzv. průhybový, neboli BBR z anglického Bending Beam Rheometer. Tento reometr se používá pro zkoumání asfaltových směsí za nízkých teplot [4]. Nízkými teplotami je zde rozuměna teplota do cca 60 °C.

Zkouška vychází z namáhání trámečku tříbodovým ohybem a je podobná zkoušce únosnosti betonového trámce v tahu za ohybu. Rozdílem je, že nehledáme stav vzniku první trhliny a napětí v průřezu, ale průhyb trámečku vystaveného dané síle, teplotě a času, po který tato zatížení působí.

V průběhu zkoušky jsou hodnoty přímo zaznamenávány pomocí čidel do počítače laboratoře a dále vyhodnocovány v softwaru dodávaným s přístrojem. Z hlediska reologie jsou zajímavé veličiny dotvarování, průhyb a dopočítáván je modul tuhosti, ohybová tuhost a graf funkce dotvarování.



Obr. 25: Schéma zatížení při zkoušce BBR [107]

Průhyb uprostřed trámečku je stanoven podle teorie pružnosti následovně:

$$W = \frac{1}{48} * \frac{FL^3}{EI} \quad (5.13)$$

- F působící síla uprostřed trámce [N]
- L rozpětí trámce [m]
- E modul pružnosti [Pa]
- I moment setrvačnosti [mm<sup>4</sup>]

Moment setrvačnosti se vypočítá jako:

$$I = \frac{1}{12}bh^3 \quad (5.14)$$

- b šířka průřezu [mm]
- h výška průřezu [mm]

Modul tuhosti se vypočítá jako:

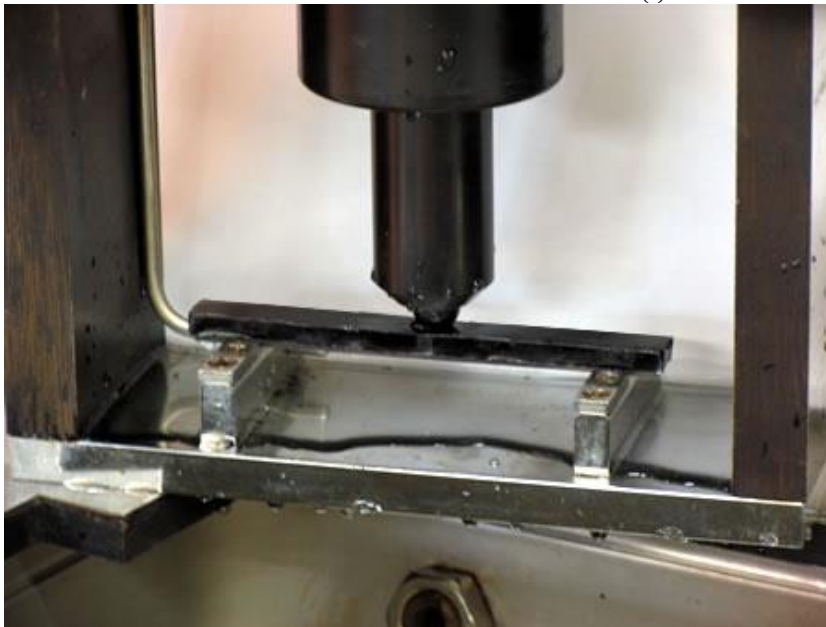
$$E = \frac{FL^3}{4bh^3w} \quad (5.15)$$

Napětí v průřezu uprostřed trámečku se vypočítá jako:

$$\sigma = \frac{3}{2} * \frac{FL}{2bh^2} \quad (5.16)$$

Poté ze znalosti funkce poddajnosti a její závislosti pro elastický materiál, můžeme snadno přepsat časově závislý modul tuhosti do podoby:

$$E_{(t)} = \frac{FL^3}{4bh^3w_{(t)}} \quad (5.17)$$



Obr. 26: Zatížení při zkoušce BBR [108]

## 6) Program SHRP

SHRP neboli Strategic Highway Research Program je výzkumný projekt zatím rozdělený do dvou etap, který byl prováděn ve Spojených státech. Tento program s rozpočtem až 150 miliónů USD [4] hrazených z federálního rozpočtu měl jako hlavní témata revizi stávajících asfaltových pojiv a směsí, návrh metodik, přístrojů a vyhodnocujících softwarů především pro potřeby zkoumání funkčních vlastností asfaltů z hlediska reologie, problematiky trvalých deformací a únavových trhlin a další problémy překračující téma této práce jako např. hospodaření s vozovkou v životním cyklu, zimní údržba nebo cementobetonové kryty či betonové mosty.

Program vznikl okolo roku 1990 na návrh tamního ekvivalentu našeho ministerstva dopravy z důvodu absence metodiky návrhu asfaltových směsí odolných vůči dlouhodobému zatížení. Doba trvání první fáze projektu byla 5 let a během této doby vzniklo nespočet zkoušek a částí výzkumu z nichž bylo prezentováno okolo dvou set závěrečných zpráv čítajících bezmála 31 000 stran textů [4].

Cíle výzkumného programu z hlediska asfaltových pojiv a směsí [4]:

- vznik a tvorba trvalých deformací
- mrazových trhlin
- únavových trhlin
- stárnutí
- odolnost proti působení vody
- adheze

Tento program resp. jeho výsledky byly přijaty i do tvorby revizí mnoha evropských norem zabývajících se problematikou návrhu asfaltových směsí.

Nedávno byla ukončena druhá část programu s názvem 2 SHRP, která se zabývala bezpečností silničního provozu, kapacitou, rychlostí a tvorbou kongescí, proto nebude dále tato část SHRP komentována.

Největším přínosem první části byl vývoj nových měřicích přístrojů nebo úprava stávajících pro potřeby schopnosti popisu chování zejména modifikovaných asfaltů. Dále byla sestavena metoda SUPERPAVE, která bude popsána dále a zřízen velkopokus, tzv. roadtest na zkušebním okruhu postaveném z rozpočtu SHRP v Nevadě. Následně probíhají a budou probíhat další zkoušky pro ověření výsledků SHRP a metodiky zkoušení. Odborníci dodnes nejsou v mnoha věcech jednotného názoru.

## 7) SUPERPAVE™

Obecně se pod tímto názvem skrývá komplexní metodika návrhu a posouzení netuhých vozovek. Tato metodika se hlouběji věnuje užitným vlastnostem z hlediska dlouhodobě odolných konstrukcí vozovek v rámci celkového životního cyklu [4].

V podstatě se jedná o dynamické zkoušení zohledňující časovou závislost chování. Obecně se tato metodika skládá ze tří částí [11]:

- nová metoda návrhu směsí zohledňující dopravní zatížení
- nové způsoby vyhodnocování zkoušek
- nové metody analýzy, zejména použití softwaru

Metodika SUPERPAVE znamená Superior Performing Asphalt Pavements neboli asfaltové vrstvy se zlepšenými užitečnými vlastnostmi [4].

Tato metodika se zabývá návrhem asfaltových hutněných směsí určených do obrusných, ložných a podkladních vrstev nových vozovek, ale i pro obnovu stávajících krytů a to i s použitím recyklovaných materiálů. Metodika tedy zahrnuje několik zásadních vlivů při tvorbě směsi, zejména dopravní a klimatické zatížení, celkovou skladbu konstrukce a specifika vlivu na životní prostředí.

Dle [11] se detailní návrh SUPERPAVE skládá ze sedmi bodů, které předchází každé navržené směsi:

- výběr kameniva, zejména zastoupení fileru
- výběr asfaltového pojiva
- laboratorní vzorky
- výkonnostní (performance) testy
- stanovení mezerovitosti
- stanovení optimálního množství pojiva
- odolnost proti vodě

Výběr kameniva:

Tato část obsahuje nejen sestavení křivky zrnitosti, která by se měla blížit ideální, ale i původ kameniva a to geologický a geografický. Jsou pochopitelně zkoumány základní vlastnosti a odolnosti kameniva. Dále je vybíráno kamenivo s ohledem na vliv odolnosti vozovky jako celku na tuhost, stabilitu, trvanlivost, odolnost proti obrusu a únavě.

Dle AASHTO PROVISIONAL STANDARDS - APRIL 2000 EDITION [11] je zkoumáno i "zakulacení" hrubého kameniva (tvarový index), neboť mezerovitost směsi s velkým podílem zakulacených zrn, která se do sebe řádně nezaklesnou při hutnění, je odlišná od kostry z ostrohrannějších zrn.

V neposlední řadě je velmi pečlivě věnována pozornost obsahu množství fileru a jemných částic. Obsah tohoto je navrhován v závislosti na dopravním zatížení. Zajímavostí je, že v metodice se pro stanovení obsahu jemných částic používá metoda ekvivalentu písku, což je dle autora přinejmenším sporná metoda, neboť výsledné odečtení hodnoty může být zastiženo řadou nejistot, v neposlední řadě i subjektivním pohledem pracovníka laboratoře.

Asfaltové pojivo

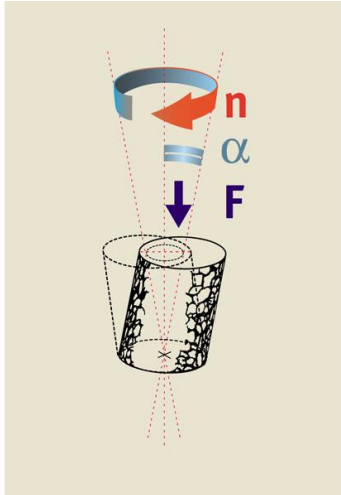
Asfaltové pojivo je v metodice SUPERPAVE vybíráno v první řadě s ohledem na předpokládané teplotní extrémy. Uvažuje se vlastní teplota krytu, teplota okolního prostředí a zeměpisná oblast, tedy prakticky je uvažováno podnebí. Pro vysoké teploty se uvažuje sedmidenní průměr.

Dále je pojivo vybráno s ohledem na zkoušku v DSR, kde je používán cyklus zatížení dle [11]  $10 \text{ rads}^{-1}$ , což odpovídá cca 1,59 Hz. Tato frekvence by měla simulovat pohyb dopravy při rychlostech okolo 90 km/h. Metodika přímo doporučuje hodnotu gradace pojiva pro konkrétní příklady jako např. křižovatky nebo truck parky, tedy použití tužších asfaltů. Pro úplnost návrhu asfaltu je ještě zohledněno dopravního zatížení v milionech ESALs (Equivalent single axle load). Prakticky se jedná o ekvivalent návrhových náprav dle TP 170 vč. dodatku č. 1. V USA je ekvivalentní jednonáprava zatížena 18 000 lb, což odpovídá cca 80 kN.



## Laboratorní vzorky

Při tvorbě laboratorních těles je kladen důraz zejména na zhutňování. V této metodice se nepoužívá tradičních marshallových těles vytvořených úderem ocelového pěstku, ale ke zhutnění se používá zařízení zvané gyrátor (krouživý zhutňovač).



Obr. 27: Princip hutnění v gyrátoru [109]

Princip hutnění je jasný z obrázku, kdy vzorek je pod úhlem  $1,25^\circ$  a otáčí se rychlostí 30 otáček za minutu. Při tomto pohybu je směs hutněna úderem dle dané zkoušky a to při vyvinutí tlaku až 600 kPa [11].

### Funkční zkoušky (Performance testy):

Výkonnostní (performance) vlastnosti směsí jsou základem pro vozovku s vysokou životností bez tvorby poruch. Tyto zkoušky jsou tak zaměřeny na užité a zejména reologické vlastnosti použitých pojiv. Zajímavostí je, že dodnes nejsou veškeré testy a teorie dokonale pochopeny a odzkoušeny, proto trvá neustálý vývoj této problematiky a vhodnosti zkušebních postupů.

### Stanovení mezerovitosti:

Při těchto zkouškách je zejména zjišťována objemová hmotnost směsi, obsah vzduchových dutin a dalších volumetrických parametrů.

### Stanovení optimálního množství pojiva:

Metodika SUPERPAVE stanovuje 4 kritéria podle kterých je množství pojiva určováno. Pokud jedno nebo více kritérií není splněno je nutno upravit složení směsi a postupovat podle pokynů metodiky vytvořených v závislosti na mezerovitosti a dopravním zatížení.

### Odolnost proti vodě:

Zkoušky vycházejí z AASHTO T 283 [16]. a stanovují odolnost proti účinkům vody z hlediska životnosti vozovky.

Takto probíhá návrh vozovek, resp. směsí podle metodiky SUPERPAVE. Na první pohled se obecně zdá, že takto probíhá návrh kdekoliv v technicky vyspělých státech světa. To je pravda. Ovšem jak lze postřehnout, případně se dočíst v [11] nebo dalších textech zabývajících se danou metodikou, veškeré kroky, kromě posledního, jsou stanoveny v závislosti na dopravním, případně klimatickém zatížení vč. výběru kameniva. To je ve výsledku rozdíl, díky kterému mohou být vozovky navržené dle metodiky SUPERPAVE únosnějšími, trvanlivějšími a ve výsledku i hospodárnějšími. Slovní spojení *mohou být* je uvedeno záměrně, neboť zatím od roku 1993, kdy se tato metodika ukotvila v odborné veřejnosti, uběhlo málo času abychom tzv. usnuli na vavřínech a bez dalších výzkumů mohli tvrdit, že takto navržené vozovky jsou opravdu SUPER VOZOVKY.

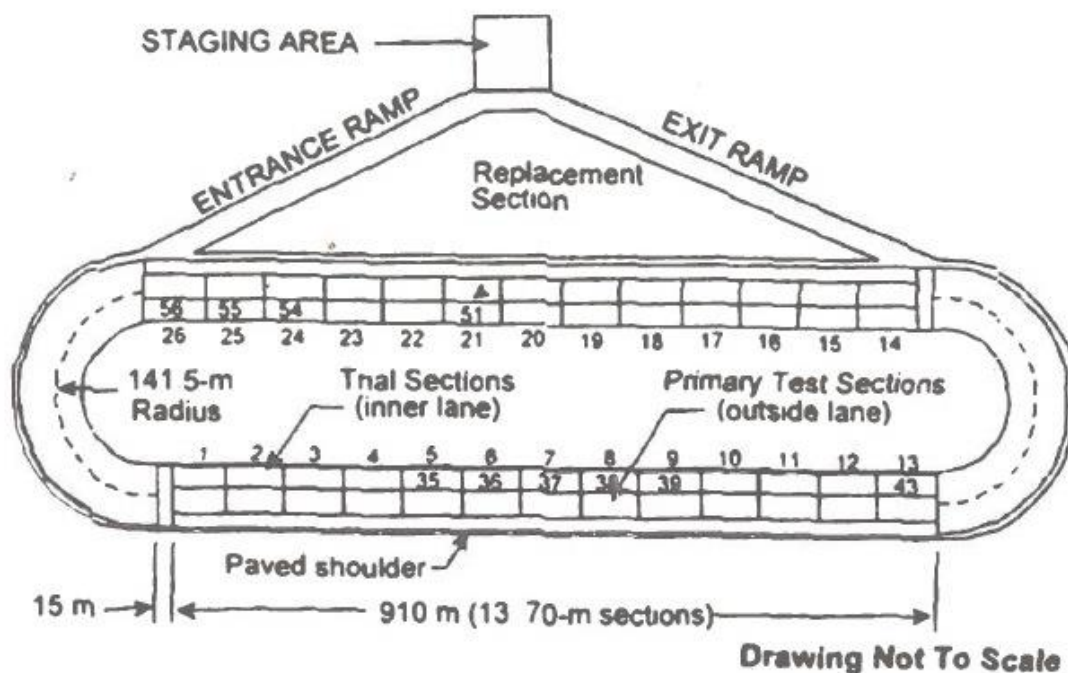
Jako objektivním a zcela logickým krokem se stal velkopokus v rámci projektu SHRP k ověření metodiky návrhu a další problematiky s užitnými vlastnostmi vozovek. Vzhledem k výše uvedenému rozpočtu a možností výzkumné činnosti byl postaven zkušební okruh a některé body programu také v urychlené verzi odzkoušeny.

## 8) Zkušební okruh Wes Track

Polní pokusy takového velkého měřítka jsou sice neobvyklé, ne však úplnou novinkou. Historicky je znám velký AASHTO Road Test z let 1959 - 1962 [4]. Ten sloužil k ověření návrhů konstrukcí vozovek a podkladních vrstev. Dalším velkopokusem byl Minnesota road research facility. Tyto testy probíhaly na uzavřeném okruhu. Mnohem rozšířenější a finančně méně náročné jsou pokusné úseky silnic a dálnic nebo jen relativně krátké úseky v rámci jízdnic pruhů délky okolo desítek metrů. Největší takové pokusné úseky jsou v USA, Francii nebo Velké Británii nacházející se v součtu na stovkách kilometrech silnic a dálnic. Na území České republiky se také nacházelo a nachází několik pokusných úseků. Takovým, poměrně známým, je silnice II/102 mezi Malou Chuchlí a Zbraslaví. Tento testovací úsek sloužil k ověření funkčnosti cementobetonových vozovek. Dalším zajímavým úsekem byl přivaděč k budované dálnici D1, jenž je součástí silnice I/3 Mirošovice - Benešov. Tento úsek sloužil také pro testování technologie CB vozovek a nedávno naopak k jeho modernizaci pomocí segmentace a aplikace SAL/SAMI vrstev.

I v současné době se nachází u nás několik pokusných úseků dlouhých pár desítek metrů na hradecké D11 ověřujících funkční parametry tenkých asfaltových koberců.

Samotný zkušební okruh Wes Track se nachází ve státě Nevada. Zřízen byl okolo roku 1994/95 a sloužil pro urychlené polní zkoušky vozovek navržených ze směsí, které prošly výzkumem SHRP. Okruh byl navržen jako ovál skládající se ze dvou rovných úseků délky cca 900 m a dvou oblouků o poloměru 1415 m, viz obr. 28.



Obr. 28: Schéma zkušební okruhu Wes Track [4].

Celková délka okruhu je 2831 m a obsahuje 26 zkušebních úseků po 70 m délky. V [4] se uvádí, že každý zkušební úsek se skládá z předpolí délky 25 m, zkušební plochy délky 40 m a dojezdové plochy o délce 5 m, která mimo jiné sloužila jako místo pro provádění destruktivních zkoušek.

Cílem polních pokusů bylo zjistit praktické provedení návrhu směsí dle metodiky SUPERPAVE a zabudování do reálné konstrukce s tím, že budou zjišťovány materiálové vlastnosti směsí ve vozovce a budou testovány užité vlastnosti v čase. Hlavními body testování užité vlastnosti měla být tvorba trvalých deformací a únavových trhlin, dále pak působení nízkých teplot a účinky vody. To je poměrně zajímavé, neboť uvědomíme-li si, že Nevada je prakticky celá tvořena pouští, muselo být zkoumání negativních účinků vody poměrně problematické. Ovšem z pohledu vysokých teplot je toto místo ideální. Zrovna tak pouštní charakter v zimě umožňuje teploty i okolo  $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$  [4].

Samotné měření probíhalo mezi léty 1996 - 1998 za jasně definovaných podmínek. Na měření a vyhodnocování výsledků se podílely tři americké university (Oregon, Berkley, University of Nevada). Vzhledem k potřebám urychleného zkoumání byly použity samojízdné tahače dlouhé přes 30 m a vyvodily za měřenou dobu přes 4,5 milionu pojezdů ESAL (ekvivalentní náprava zatížená 80 kN), které jezdily na okruhu každý den cca 16 - 22 hodin. Za tuto dobu urazily tahače přes 1,3 miliónu km [4].

Jak je uvedeno v citované literatuře [4], tahače byly řízeny na dálku bezdrátově a jejich vedení zajišťovala vodící kolejnice ve vozovce. Tím se docílilo přesné konstantní rychlosti a hlavně poježdění v stále stejné stopě.

Metodika zkoušení měla dopředu na základě Palmgren - Minerovi teorie vypočítáno, po jaké době a kolika pojezdech dojde k poruchám některých zkušebních úseků. Jak ale vyplývá z testování, zhruba v polovině doby výzkumu již poruchy začaly vykazovat všechny úseky. Jednalo se především o vyjeté koleje hloubky až 35 mm, které se po opravě opět do pár dnů

objevily [4]. Další poruchou byly únavové trhliny. V rámci SHRP byla ustanovena komise pro zjištění příčin předčasné tvorby deformací. Podrobné závěry lze dohledat v [4]. Zde je uveden jen stručný přehled, ale v zásadě dosti přispěl fakt, že vozovky zkušebních úseků byly záměrně poddimenzované pro urychlení zkoušek. Tento fakt vyplývá i z toho, že v obloucích okruhu se žádné vozovky netestovaly a byla zde použita běžná konstrukce vozovky navržená dle tamějších předpisů. Tato vozovka, ač byla v obloucích, žádné výrazné poruchy nevykazovala.

Komise také zjistila, že byl nedostatečný rozsah objemových zkoušek.

Jako příčina vzniku tvorby kolejí byl komisí stanoven vysoký obsah pojiva a mezerovitosti, což vede ke snížení tuhosti směsí. Dále byl shledán fakt, že jemnozrnné směsi vykazovaly menší hloubku kolejí než hrubozrnnější.

Záměrná poddimenzovanost vozovek tak možná ukázala, jaké problémy a nedostatky nebyly do metody SUPERPAVE zahrnuty nebo dodrženy. Pokud by test probíhal řadu let a stál mnoho finančních prostředků, nemusel by odhalit veškeré problémy. Ze závěrů komise byla vydána řada doporučení pro zamezení výskytu výše uvedených problémů.

Nejzajímavějšími doporučeními komise ale i tak bylo, že vozovky navržené i pro krátkodobé zkoumání mají být navrhovány na dvacetiletou životnost, a že se doporučuje při testování užitečných vlastností používat zkoušku pojezdu kolem, kterou zkušební komise použila, ale v rámci původní metody SHRP uvažována nebyla.

Zkušební okruh tak přinesl spousty poznatků, ponaučení a doporučení jak ještě lépe nakládat s návrhem směsí dlouhodobě odolných vozovek. Přínosem bylo sestavení modelů a výpočetních aparátů pro návrh směsí Wes Track, tedy směsí přímo na okruhu použitých a které budou použity v podobném klimatickém prostředí a také aparáty pro návrh jiných vozovek využívajících poznatky a zkušenosti z okruhu. Bude ještě dlouho trvat než veškeré poznatky a závěry získají vědecké a praktické ověření v reálných konstrukcích vozovek.

V současné době žádný takový velkopokus neprobíhá. V provozu jsou pouze zkušební úseky jak je uvedeno na začátku kapitoly.

## 9) Trvalé deformace vozovek - úvod

Historie stavby vozovek sahá do daleké minulosti. Jen samotná problematika vzniku moderních konstrukcí vozovek je na samostatnou publikaci, a tak zde na začátek této kapitoly bude uveden pouze stručný úvod.

Většina současných cest vznikala dávno v minulosti jako stezky sloužící k obchodu a propojení sousedních vsí a měst. Původní stezky vznikaly už ve starověku a byly využívány a rozšiřovány dalšími potomky původních lidí, kteří je vyšlapali při svých cestách za lovem či obchodem.

V době největší antické slávy vzniklo mnoho umělých staveb rukou Římanů, kteří byli jedni z prvních stavitelů silnic s jasnou technickou konstrukcí.

Veškeré umění starých Římanů však zůstalo zapomenuto, alespoň po dobu temna středověku a s jeho koncem se opět začala rozvíjet potřeba a realizace silnic. V Českých zemích se také stavělo, avšak po dostavbě se o vozovky nikdo nestaral a tak není divu rozčilení neznámého cestovatele, který při cestě ze Saska do Karlových Varů roku 1797 nechápaje poznamenal na stav zdejších silnic: „Proč byly cesty tak mizerné a zanedbané, když po nich každoročně přijíždělo tolik lázeňských hostů, přičemž kříží a sochami svatých, které se nacházejí hojně při cestách, nelze tyto hříchy přece odčinití“.

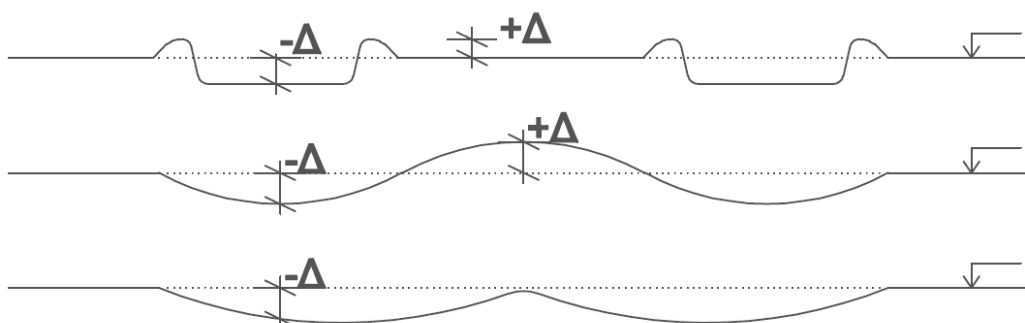
( *Neznámí cestovatel, publikace Silnice a dálnice v České republice [3] str. 30* )

Takto to pokračovalo až do období první poloviny 19. století, kdy skotský inženýr John L. McAdam vymyslel konstrukci vozovky, která se mezi silničáři vžila pod pojem makadam.

Tato na svou dobu moderní a průlomová konstrukce odstartovala prakticky vývoj konstrukcí vozovek a postupem doby přibírala fyzikální a matematické aparáty pro návrh kvalitní hospodárné vozovky. Jak bylo uvedeno v úvodu, tyto silnice se staly užívanými těžkou dopravou, a tak se s rozvojem konstrukcí objevil i rozvoj problematiky údržby vozovek, predikce deformací a návrhové přístupy, které by měly eliminovat v co největší míře rozvoj poruch.

## 10) Typy a příčiny plastických deformací

Trvalé deformace vyskytující se na vozovkách jsou dvou typů. Prvním typem je plastická deformace podloží, která není předmětem této práce, ale bude uvedena příčina vzniku a rozdíl mezi druhým typem deformace, který postihuje asfaltem stmelené vrstvy netuhých vozovek a který je hlavním tématem této práce.



Obr. 29: Rozdíl mezi plastickou deformací stmeleného souvrství, podloží a sekundárním dotvarováním podloží

Na obr. 29 je znázorněna v horní části varianta plastické deformace, která vzniká ve stopě těžkých vozidel v asfaltovém souvrství. Nezáleží po většinou až tak na podloží nebo v některých případech na nestmelených vrstvách konstrukce jako hlavně na odolnosti proti trvalým deformacím samotných stmelených vrstev. Tato problematika bude rozvinuta dále a podrobněji.

Plastické deformace podloží vznikají hlavně z důvodu neúnosných zemin, které jsou v řadě případů tvořeny namrzavými až nebezpečně namrzavými zeminami. Typická deformace má sinusový až lavorovitý tvar se zřejmým vytlačováním zeminy a konstrukčních vrstev nad niveletu vozovky, někdy i mimo vozovku. Pokud se deformace projevují až po dlouhé době od stavby, značí to nárůst těžké dopravy a vyčerpání únosnosti podloží nebo je to další indikace změny vodního režimu spojená např. se zanesenými a nefunkčními drenážemi.

Pakliže se takové deformace projevují brzy po dokončení stavby, nebylo s největší pravděpodobností dodrženo řádné hutnění aktivní zóny, nebyla použita správná zemina do aktivní zóny nebo není správně navržen systém odvodnění ochranných vrstev vozovky.

Takové deformace v naprosté většině případů vznikají ovšem z jara, kdy přes zimu podloží promrzá (je-li tvořeno namrzavou zeminou) a v zemině se tvoří ledové čochy nebo šupiny, které v jarním období roztají, podmáčí podloží a v kombinaci s pojezdy těžkých vozidel je problém brzy na světě. Ve vrcholech a na dně vln vznikají postupně trhliny, zejména podélné a dochází tak k zatékání vody do vozovky. Pakliže jsou tyto poruchy lokální, avšak blízko sebe, dochází k dynamickému namáhání vozovky. A jedná-li se o vozovky s nižším dopravním zatížením, kde asfalt není tak často pojížděn, dochází k jeho „vyschnutí“, rychlejšímu stárnutí pojiva a stmelená vrstva se pak stává křehčí. Tento proces vede následně

k tvorbě síťových trhlin a až k prolomení konstrukce vozovky. Taková porucha pak musí být odstraněna kompletní výměnou konstrukce, nikoliv jen odfrézováním a položením nové vrstvy. Bohužel na některých krajských silnicích dochází k vysprávkám tryskovou metodou dle TP 96. Takové řešení může snižovat bezpečnost provozu. Neopravená poškozená vozovka ohrožuje bezpečnost provozu na pozemní komunikaci, hlavně možností vzniku aquaplaningu.



Obr. 30: Plastická deformace podloží [111]

Na obr. 30 z Finska je poměrně dobře vidět sinusový charakter příčného řezu deformací. Zde je podloží vozovky tvořeno rašelinitou zemínou, tedy podloží s malou únosností.



Obr. 31: Vyjeté koleje v řadicím pruhu [112]

Na obr. 31 je zobrazena vyjetá kolej v asf. souvrství. Zde se jedná o plastickou deformaci asfaltových hutněných směsí, nikoliv podloží. Rozdíl mezi obr. 30 a 31 je patrný z tvaru deformace. Na obr. 31 je velmi dobře vidět vyježděný tvar kola nákladních vozidel. Zde se jedná o exponované místo v řadicím pruhu světelné křižovatky. Závěrem lze dodat, že problematika trvalých deformací podloží je na rozdíl od trvalých deformací stmelěných vrstev řešena v TP 170, resp. dodatku č. 1.

Ohledně trvalé deformace asfaltových vrstev se TP 170 vč. dodatku jen odvolává na TP 109, což je zkouška pojíždění kolem, která byla dle tohoto TP zrušena a je prováděna normou *ČSN EN 12697 -22+A1*.

Vraťme se ale k trvalým deformacím, které vznikají čistě ve stmelěných vrstvách netuhých, případně polotuhých vozovek. I zde je několik typů deformací. Jsou to jednak vyjeté koleje, nepravidelné prohlubně, hrboly a jiné nerovnosti vykazující plastický charakter a podélná deformace na celou šířku krytu, tzv. roleta.

## **11) Vyjeté koleje**

Tato plastická deformace vzniká v místě trvalého pojezdu pomalou až zastavující těžkou dopravou. Jedná se zejména o místa, kde je doprava kanalizována nebo je dopravní proud oddělen na nákladní a osobní automobily jako stoupací pruhy silnic a dálnic, rampy mimoúrovňových křižovatek, řadicí pruhy úrovňových křižovatek, vjezdy do vrátnic, vnitropodnikové komunikace průmyslových závodů, zastávky MHD nebo v případě letišť rolovací plochy.

Tvarově vyjetá kolej odpovídá obrysu kola nákladního vozidla. Šířka se pohybuje od 0,50 - 0,80 m a někdy jsou patrné i vyjeté hrbolky mezi pneumatikami náprav. Hloubka koleje se pohybuje od jednotek mm až po cca 25 mm, kdy už se stav vozovky stává havarijní. Typické pro vyjeté koleje je tvorba převalků z asfaltu, který je vytlačován nad povrch vozovky a do stran viz obr. 32.



Obr. 32: Vyjeté koleje v předpolí křižovatky [113]

Délka úseku vozovky, která je postižena touto deformací, je značně různorodá. Ve stoupacích pruzích nebo místech kanalizování dopravy vznikají koleje na celou délku takového úseku. V Praze na Jižní spojnici byl do nedávna úsek s vyjetými kolejami od Barrandovského mostu až po MÚK Štěrboholi. Postupná oprava pravého jízdního pruhu začala až v době otevření SOKP a částečného zákazu vjezdu tranzitní nákladní dopravy od Spořilova do Bráníka. V současné době vzniku této práce probíhá oprava v úseku Spořilov - Záběhllice směr Štěrboholi.

Dále se vyskytují tyto deformace na úsecích dlouhých několik desítek metrů jako např. v místě zastávek MHD, celnicích atp.

Koleje se mohou vyskytovat i lokálně na místech, kde došlo k technologickému pochybení, jako např. nehomogenní segregovaná směs, špatný postup pokládky, hutnění atd.

Další příčinou vzniku tvorby kolejí je nárůst dopravy, dokonce i krátkodobé, kdy je doprava vedena po objízdňích trasách s vozovkami navrženými na jiné dopravní zatížení.

V neposlední řadě může být vznik trvalých deformací zapříčiněn špatným technologickým postupem hutnění, zprovoznění vozovky dříve než je technologicky možné nebo odstavení hutnicí a stavební mechanizace na dosud nevychladlý a zatuhlý povrch.

Na tyto technologické problémy, na které by se mělo dát pozor, odkazuje zhotovitele TKP 7.

Vyjeté koleje ve vozovce snižují komfort jízdy, ale hlavně mohou být zdrojem dopravní nehody, zvláště v době po dešti, kdy se v nich může zachytit voda nebo v zimním období.

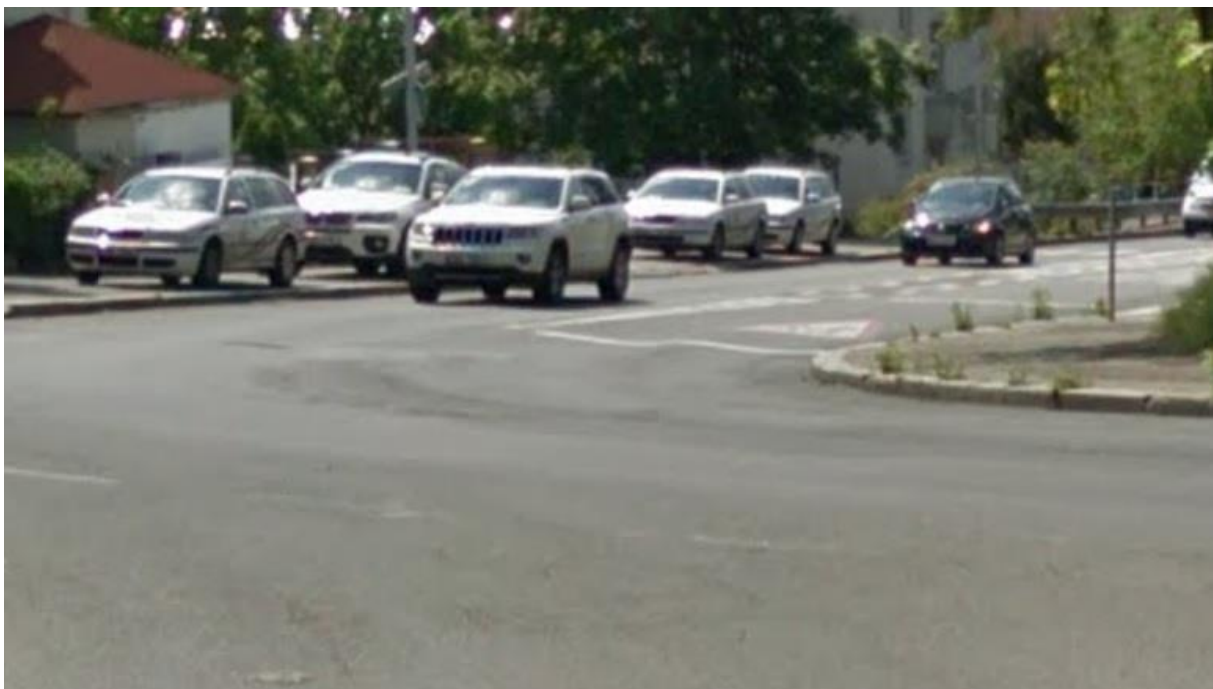
Voda v kolejí zvyšuje pravděpodobnost vzniku aquaplaningu a obecně vede ke snížení bezpečnosti pozemní komunikace.



## 12) Nepravidelné prohlubně a hrboly

Tyto poruchy vznikají jednak zcela lokálně, v místech nějakého technologického problému jako je segregovaná směs, absence řádného hutnění atp., dochází tak k vytlačování pojiva. Dalším možným důvodem vzniku je použití opakovaně nedostatečné vysprávkky, která je kolem vytlačována z místa s poruchou. Není tak komplexně řešena příčina, ale následky. Takovým typickým problémem je plastická deformace vysprávkky tryskovou metodou, která se bohužel na silnicích nižších tříd neustále opakuje. Ve smyslu TP 96 je uvedeno „dočasné vyspravení poruch“. Co je ale dočasné, zvláště v kontextu trvalých deformací, o tom se lze jen dohadovat.

Ve větší ploše tyto deformace vznikají také v místě zvýšených tangenciálních sil, zejména v obloucích s malým poloměrem a v kombinaci s klesáním, kde vozidla navíc vykazují brzdné síly. Taková deformace je typicky viditelná v Praze na ulici Budějovická nedaleko stanice metra Kačerov, viz obr. 33.



Obr. 33: Vyjeté koleje a lokální hrboly v ul. Budějovická - Praha [Google Maps]

Dalším místem vzniku lokálních prohlubní jsou místa sloužící pro odstavení vozidel, parkoviště, odpočívky, truck parky atp., kde se zatížení mění ve statické. Takové deformace v sobě mohou nést dokonce obtisk dezénu pneumatik. To nastává zvláště v letních obdobích, např. v litém asfaltu.



Obr. 34: Trvalé deformace v parkovacím pruhu - litý asfalt

Tyto poruchy vedou ke snížení bezpečnosti provozu a komfortu jízdy. Důsledkem je větší zatížení na tlumiče vozidel a stejně jako v případě vyjetých kolejí i ztížená možnost zimní údržby silnic.

### **13) Podélná deformace na celou šířku krytu**

Tato deformace, která se vžila mezi veřejností pod názvem roleta, vykazuje téměř pravidelný vlnkový průběh. V cizí odborné literatuře je označován jako corrugation. Vzniká v prostoru zastavující a rozjíždějící se dopravy, tedy typicky v předpolí světelných křižovatek. Bezprostředně neohrožuje bezpečnost provozu na pozemní komunikaci, ale snižuje komfort jízdy při průjezdu vyšší rychlostí a znesnadňuje zimní údržbu a obnovu vodorovného dopravního značení.

### **14) Legislativa**

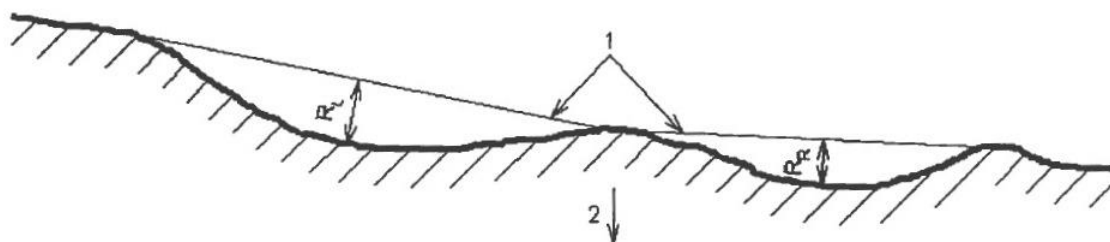
Z hlediska technických předpisů má správce komunikace, resp. projektant a zhotovitel omezenou základnu podkladů, ze kterých si dovolím citovat některé podstatné odstavce nebo tabulky. Jedná se o normu ČSN 73 6175 Měření a hodnocení nerovnosti povrchů vozovek, TP 82 Katalog poruch netuhých vozovek a TP 87 Navrhování údržby a oprav netuhých vozovek [15].

Tyto předpisy stanovují jak deformace měřit a jak je opravit.

#### 14.1) ČSN 73 6175 Měření a hodnocení nerovnosti povrchů vozovek [12]

Str. 9 odstavec d)

„Hloubka vyjeté koleje  $R$ . Vyjeté koleje v povrchu vozovky se projevují jako plynulé poklesy (prohloubeniny) v podélném směru na ploše stop kol. Hloubka vyjeté koleje se stanovuje na stopu kol. V obvyklé situaci dvou stop kol na jízdní pruh se hodnoty hloubky vyjeté koleje vyjadřují jako  $R_R$  a  $R_L$ , viz obr. 35. Hloubka vyjeté koleje je definována jako největší odchylka příčného řezu povrchu vozovky od zdánlivé referenční čáry o délce „ $L$ “, klouzající po povrchu řezu v mezích analyzované šířky spojující jednu a druhou vyvýšeninu koleje. Obvykle je délka zdánlivé referenční čáry přibližně 1,5 m až 2,0 m (přibližně polovina šířky jízdního pruhu). Délka zdánlivé referenční čáry se uvede spolu s výsledky“ [12].



##### Legenda

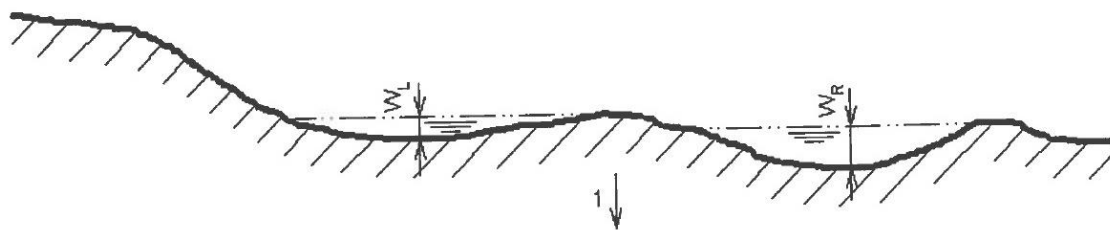
1 Zdánlivá referenční čára o délce  $< L >$  (obvykle 1,5 m až 2,0 m)

2 Gravitace

Obr. 35: Příčný profil povrchu vozovky vykazující hloubku vyjetých kolejí  $R_R$  a  $R_L$  [12]

Str. 10 odstavec e)

„Teoretická hloubka vody  $W$  je nejvyšší výška vodního sloupce, která může ve vyjeté koleji vzniknout viz obr. 36. Teoretickou hloubku vody lze změřit odděleně pro obě stopy kol, [12].



##### Legenda

1 Gravitace

Obr. 36: Příčný profil povrchu vozovky s uvedením teoretické hloubky vody  $W_R$  a  $W_L$  [12]

Požadavky na hodnocení technického stavu vozovky jsou v Tab. 1 a Tab. 2 převzaté z přílohy A citované normy.

**Tabulka A.3 – Hodnocení hloubky vyjeté koleje R v jednotlivých profilech**

Parametr	Klasifikační stupeň				
	1	2	3	4	5
R [mm]	R < 5 (4) <sup>1)</sup>	(4) <sup>1)</sup> 5 až 10 (8) <sup>1)</sup>	(8) <sup>1)</sup> 11 až 22	23 až 35	R > 35
<sup>1)</sup> Hodnota v závorce platí pro PK s dovolenou rychlostí vyšší než 90 km·h <sup>-1</sup> .					

<sup>1)</sup> TP 207, <sup>2)</sup> TP 87, TP 92

Tab. 1: Hodnocení hloubky vyjeté koleje dle ČSN 73 6175

**Tabulka A.4 – Hodnocení teoretické hloubky vody W v jednotlivých profilech**

Teoretická hloubka vody W < 8,0 mm – hodnocení vyhovující
Teoretická hloubka vody W ≥ 8,0 mm – hodnocení nevyhovující

Tab. 2: Hodnocení teoretické hloubky vody v koleji dle ČSN 73 6105

Tato norma tedy poskytuje jednak metodiku měření a jednak stanovuje kritéria pro hodnocení technického stavu vozovky. Ostatní trvalé deformace jsou odkazovány na měření podélné nerovnosti a jsou zahrnuty v indexu IRI, na který norma také odkazuje.

#### 14.2) TP 82 Katalog poruch netuhých vozovek

Zde bych si dovolil citovat volně dostupný předpis, který má k dispozici každý správce komunikace, zhotovitel i projektant.

TP 82 Katalogový list 21 [13]

„Příčina vzniku: Nedostatečná odolnost vrstev krytu proti trvalým deformacím (použití těžných kameniv, nevhodná křivka zrnitosti, vysoký obsah asfaltu, druh asfaltu o vyšší penetraci, vysoké dopravní zatížení).

Možný vývoj: Pokud nárůst trvalé deformace v prvních 1 - 3 letech dosáhne nerovnost vyšší než 10 mm, bude se vyvíjet až k hloubkám vyjetých kolejí přes 20 mm. (Pozn.: Toto tvrzení ověřeno v praktické části).  
Možnost vzniku aquaplaningu.

Návrh opravy: Dle konstrukční vrstvy, ve které vyjeté koleje vznikly:  
1) vyplnění kolejí mikrokoercem nebo asfaltovým koercem tenkým při zastaveném nárůstu hloubky koleje (cca po 8 letech užívání do 10 mm).  
2) výměna všech asfaltových vrstev, které jsou příčinou trvalé deformace (frézování a výměna vrstev v tloušťce 50 - 120 mm)" [13].

Komentář k možnostem opravy:

Je sice pravda, že vývoj trvalých deformací se po určité době výrazně zpomalí, ovšem tato doba není jednoznačně predikovatelná a je závislá na mnoha činitelích jako je klima, skladba dopravního proudu a jeho intenzita. Tedy charakteristiky, které vykazují proměnné chování. Autoři technických podmínek uvádějí značný rozsah časových údajů konkrétně 1 – 3 roky. Je pravda, že např. na tahu silnice I/13 se ve spoustě stoupacích pruhů objevují vyjeté koleje už pár měsíců po výměně horních dvou vrstev krytu.

Je tedy otázka, jak dlouho je vhodné čekat na ustálení deformací a provedení vysprávk. Metoda 1) citovaná výše je jistě vhodný způsob, ale autor radí velkou opatrnost s tímto řešením. Pokud se tato vysprávka provede řádně, neměl by vznikat problém. Je nutno dodržet řadu technologických postupů, nikoli jen kolej „zaplácnout“ směsí. Jako vhodný doplněk se jeví použití geokompozitních materiálů. Pokud deformace není ustálena, nejspíš se tato oprava mine účinkem.

Proto v místech největší expozice těžkou dopravou je vhodné vyměnit celou obrusnou vrstvu, nikoliv provádět vysprávku a čekat na další vývoj deformace už jen z důvodu, že je všude upozorňováno na potenciální vznik aquaplaningu.

Typ opravy 2) je dle názoru autora nevhodnějším způsobem opravy. V literatuře a jednotlivých zprávách krajských SÚS se tento názor neshledává vždy vítaným z hlediska finančního, ale ve výsledku je nová správně navržená konstrukce levnější než několikrát dokola opravovaná vozovka, která stejně po dovršení své životnosti musí být vyměněna.

### **14.3) TP 87 Navrhování údržby a oprav netuhých vozovek [15].**

TP 87 P6.4.1 – P6.4.3

„ P6.4.1 Omezený vývoj trvalé deformace

Pokud se vývoj prakticky zastavil (po cca 8 letech a je dosaženo hloubky nerovnosti do 0 mm), začínají se obvykle projevovat poruchy ztrátou hmoty a je možno provést údržbu trvalých deformací:

- vyplněním kolejí mikrokobercem za studena (EMK), vhodná je následná údržba celého povrchu emulzním kalovým zákrytem nebo dalším mikrokobercem.
- recyklací za horka (REMIX s přidáním vrstvy (BBTM S, SMA S, ACO S)

P6.4.2 Pokračující vývoj trvalých deformací

Pokud vývoj nadále pokračuje, lze předpokládat vývoj vyjetých kolejí a podélné nerovnosti až ke klasifikaci 4 nebo 5. V tomto případě se o opravě trvalých deformací krytu rozhodne posouzením vývrvtů v celé tloušťce asfaltových vrstev, při větších tloušťkách nejméně do hloubky 180 mm.

Provedou-li se vývrty v řezu nerovností vedle sebe (nejméně 2 vývrty v nejvyšším a nejnižším místě nerovnosti blízko sebe) tak, že je možno vykreslit změny tloušťek vrstev dokumentující pohyb směsí při vytváření vyjeté koleje, pak lze na základě tohoto pohybu operativně rozhodnout a odstranit těch vrstev, které se na trvalé deformaci podílejí. Spolehlivější je doplnění rozhodnutí laboratorním posouzením směsí. Trvalou deformaci způsobují vrstvy z asfaltové směsi zejména:

- s mezerovitostí stanovenou na vývrtech nižší než 2%, tuto vrstvu je nutno při jejím umístění v hloubce do 120 mm vždy odstranit,

- s mezerovitostí stanovenou na vývrtech vyšší než 2 %, pokud je:
  - použito hrubé těžené kamenivo s hladkým povrchem zrn,
  - obsah fileru vyšší než přípustní mezní čáry asfaltové směsi, čára zrnitosti v blízkosti středu mezních čar a nad ní (vyšší obsah jemných částic),
  - vyšší obsah pojiva než odpovídá výpočtu podle zrnitosti kameniva.

V těchto uvedených případech nárůstu trvalých deformací je nutno vrstvy, které jsou příčinou trvalé deformace krytu:

- odstranit a nahradit vrstvami splňujícími požadavky odolnosti proti trvalým deformacím,
- recyklovat za horka obvykle s přidáním předobaleného hrubého kameniva tak, aby vrstvy dosáhly odolnosti proti trvalým deformacím

Odolnost proti trvalým deformacím se prokazuje zkouškami podle ČSN EN 12697-22 a 25 a hodnotí podle ČSN EN 13108-1,-2 a -5.

Na místech s pomalou a zastavující dopravou (křižovatky) ve třídě dopravního zatížení II a vyšší je vhodné vždy použít modifikovaný asfalt, i když směsi podle ČSN EN 13108-1, -2 a -5 v kvalitě S, takový asfalt na základě výsledků zkoušky odolnosti proti trvalým deformacím nevyžadují.

#### P6.4.3 Případy nepřijatelné opravy trvalých deformací

Z mnoha důvodů se vybírají následující případy s vysvětlením:

- V případě, že se neprovede diagnostický průzkum a návrh opravy se provede na základě tvaru vyjeté koleje. Obvykle se navrhne paušální oprava výměnou vrstev podle dopravního zatížení na hloubku 100 mm až 130 mm. Takový návrh může být neekonomický. Naopak provedení výměny obrusné vrstvy neodstraní vliv ložní, případně podkladní vrstvy na další vývoj trvalých deformací a poruchy se znovu objeví.
- Návrh opravy nelze provést jen na základě odběru vývrťů situovaných vedle sebe, přitom se neshodně vyhodnotí přetvářející vrstvy, tj. nelze vyhodnotit pohyby vrstev ze stopy vozidel, ve vývrtech je více vrstev, které zůstaly jen ve stopě po již provedených dřívějších opravách, nebo ve vývrtech mimo stopu některé vrstvy chybí. Je třeba odebrat i vývrty v nedeformovaném místě.
- Na čtyřpruhových komunikacích, pokud se neprovedou vývrty a zkoušky ve všech jízdních pružích vozovky (obvykle se diagnostický průzkum nezaměřuje na levý jízdní pruh, protože byl bez vyjetých kolejí) a nenavrhne se oprava odpovídající stavu vozovky (neprovede se výměna nevhodné ložní vrstvy nebo se provede její recyklace za tepla). Při převedení dopravy na opravenou polovinu vozovky může za krátkou dobu dojít k vyjetí nových kolejí
- Oprava nebude respektovat návrh podle diagnostického průzkumu, tj. byla identifikována nevhodná ložní, případně i podkladní vrstva, a např. z důvodu nedostatečných prostředků na opravu by se provedla jen výměna obrusné vrstvy (v tomto případě je vhodnější snížit plošný rozsah opravy)" [15].

Toto výše citované TP podává odborný pohled na věc včetně návrhu opravy. Jediné, co lze předložit k diskusi, je ekonomická stránka výměny celého souvrství vozovky. Pokud se nové souvrství správně navrhne a deformace se nebudou vyskytovat, tak se opět potvrdí již mnohokrát ověřený fakt, že investovat do prevence se vždy vyplatí.

## 15) Návrhové přístupy

### 15.1) Česká republika

V České republice dosud nejsou vydány žádné normy nebo zásady pro navrhování a posuzování asfaltem stmelených vrstev vozovky z hlediska trvalých deformací. Prakticky jedinými podklady, kterými lze alespoň nějak ověřit chování asfaltové směsi jsou laboratorní zkoušky.

Ty lze využít např. při návrhu nové směsi nebo „katalogové vozovky“, ale v běžné projekční praxi projektant většinou, až na nestandardní projekty, nenavrhuje dle výsledků laboratorních zkoušek, které by sám inicioval. Tedy návrh na základě laboratorní zkoušky je povětšinou v režii technologa silniční laboratoře a to ve výzkumné činnosti nebo pro návrh směsi, kterou si může nechat ověřit zhotovitel stavby.

Do roku 2005 byla u nás používanou normou ČSN 73 6160 Zkoušení silničních živých směsí, schválenou 27. 10. 1986 s účinností od 1. 3. 1988.

Nyní je platná harmonizovaná evropská norma ČSN EN 12697 -22+A1 *Asfaltové směsi - Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka - Část 22 Zkouška pojiždění kolem* [1].

Druhou normou pro zkoušení je ČSN EN 12697-25 *Asfaltové směsi – zkušební metody pro asfaltové směsi za horka – část 25: Cyklická zkouška v tlaku*

Tyto normy jsou převzaty z německých DIN.

### 15.2) Popis normy ČSN EN 12697 -22 [1]

Laboratorní zkoušky lze dle této normy provádět na zkušebních tělesech vyrobených v laboratoři i na odebraných z konstrukce, avšak pouze pro směsi s maximální velikostí zrna kameniva 32 mm.

Podstatou zkoušky je vystavení vzorku opakovaným pojezdům zatíženého kola při stálé teplotě (postup bude popsán dále) a následné měření vyjeté hloubky koleje.

Norma rozlišuje také zkušební zařízení od malých přes velká, až po extra velká. Takovým extra velkým zkušebním zařízením může být např. zařízení na obr. 37. Předmětem této práce je ale spíše zařízení na obr. 38.

Norma dále definuje základní pojmy, pomůcky a postupy, závěrem je vyhodnocení - protokol o zkoušce.



Obr. 37: Extra velké zkušební zařízení [114]



Obr. 38: Standardní zařízení pro zkoušku poježdění kolem [115]

### 15.3) Zkušební postup

Nejprve je definován odběr vzorků, resp. příprava. Jsou stanoveny minimální hodnoty jmenovité tloušťky vzorku v závislosti na velikosti zkušebního zařízení a také tloušťce reálné vrstvy materiálu v budoucí konstrukci nebo velikosti zrna kameniva.

Dále bude pro stručnost popsána pouze metoda pro velké a malé zkušební zařízení, ostatní postupy a detaily lze najít v [1].



#### 15.4) Výpočet a interpretace výsledků

Výpočet měřené poměrné hloubky vyjeté koleje:

měřená poměrná hloubka se vypočte pro každou sadu měření dle následujícího vzorce:

$$P_i = 100 \times \sum_{j=1}^{15} (m_{ij} - m_{0j}) / 15h \quad (15.2)$$

$P_i$  měřená poměrná hloubka vyjeté koleje [%]

$m_{ij}$  místní deformace [mm]

$m_{0j}$  počáteční čtení v j-tém bodě

$h$  tloušťka zkušební tělesa [mm]

Následuje vynesení hodnot do grafu v závislosti  $P_i$  na  $N$ , kde  $N$  je počet cyklů.

#### 15.5) Malé zkušební zařízení - postup B

Norma ČSN EN 12697-22+A1 stanovuje pro malá zařízení postup B dle kapitoly 9.3.2 [1] Přírůstek hloubky vyjeté koleje na vzduchu. Zde bude popsán z toho důvodu, že následně při návrhu asfaltového betonu jsou v ČSN EN 13108-1\* stanoveny požadavky na odolnost proti trvalým deformacím v závislosti na tomto postupu. Zmíněné požadavky budou probrány následně.

\* Obdobně pro mastixový koberec asfaltový v ČSN EN 13108-5

Dle ČSN EN 12697-22+A1 se přírůstek hloubky vyjeté koleje na vzduchu stanoví jako:

$$WTS_{AIR} = \frac{d_{10\,000} - d_{5\,000}}{5} \quad (\text{mm}/10^3 \text{ zatěžovacích cyklů}) \quad (15.3)$$

$d_{10\,000}$ ,  $d_{5\,000}$  hloubka vyjeté koleje po 10 000 a 5 000 cyklech v mm

Výsledek zkoušky se rozumí aritmetický průměr  $WTS_{AIR}$  ze dvou zkušebních těles.

Dále je stanovena průměrná poměrná hloubka vyjeté koleje  $PRD_{AIR}$  na vzduchu jako průměr poměrné hloubky vyjeté koleje ze dvou zkušebních těles v přesnosti  $\pm 0,1$  %.

#### 15.6) Požadavky ČSN EN 13108-1

Odolnost proti trvalé deformaci - velká zkušební zařízení, maximální poměrná hloubka vyjeté koleje  $P$  [14].

Max poměrná hloubka vyjeté koleje %	Kategorie P
5,0	P <sub>5</sub>
7,5	P <sub>7,5</sub>
10,0	P <sub>10</sub>
15,0	P <sub>15</sub>
20,0	P <sub>20</sub>
Bez požadavku	P <sub>NR</sub>
Pro zatížení návrhovou nápravou ≥ 13 tun	

Tab. 3: Maximální poměrná hloubka koleje dle ČSN EN 13108-1

Odolnost proti trvalé deformaci - malá zkušební zařízení typu B, temperování vzduchem, maximální přírůstek hloubky vyjeté koleje,  $WTS_{AIR}$  [14].

Maximální poměrná hloubka vyjeté koleje mm/ 10 <sup>3</sup> zatěžovacích cyklů	Kategorie $WTS_{AIR}$
0,03	$WTS_{AIR0,03}$
0,05	$WTS_{AIR0,05}$
0,07	$WTS_{AIR0,07}$
0,10	$WTS_{AIR0,10}$
0,15	$WTS_{AIR0,15}$
0,30	$WTS_{AIR0,30}$
0,40	$WTS_{AIR0,40}$
0,50	$WTS_{AIR0,50}$
0,60	$WTS_{AIR0,60}$
0,80	$WTS_{AIR0,80}$
1,00	$WTS_{AIR1,00}$
Bez požadavků	$WTS_{AIRNR}$
Pro zatížení návrhovou nápravou <13 tun	

Tab. 4: Maximální poměrná hloubka koleje dle ČSN EN 13108-1

Odolnost proti trvalé deformaci - malá zkušební zařízení typu B, temperování vzduchem, maximální poměrná hloubka vyjeté koleje,  $PRD_{AIR}$  [14].

Maximální poměrná hloubka vyjeté koleje %	Kategorie PRD <sub>AIR</sub>
1	PRD <sub>AIR1,0</sub>
1,5	PRD <sub>AIR1,5</sub>
2	PRD <sub>AIR2,0</sub>
3	PRD <sub>AIR3,0</sub>
5	PRD <sub>AIR5,0</sub>
7	PRD <sub>AIR7,0</sub>
9	PRD <sub>AIR9,0</sub>
Bez požadavků	PRD <sub>AIRNR</sub>
Pro zatížení návrhovou nápravou < 13 tun	

Tab. 5: Maximální poměrná hloubka koleje dle ČSN EN 13108-1

Porovnání s tabulkami NA-E.5.1 - 3. - Požadavky na asfaltové směsi [14].

Typ směsi	S		+		bez označení			CH
Označení směsi	11 S, 16 S		11 +, 16 +		8, 11, 16			8 CH
D <sub>max</sub>	ACO 11 S	ACO 16 S	ACO 11 +	ACO 16 +	ACO 8	ACO 11	ACO 11	ACO 8 CH
PRD <sub>AIR</sub> (%) <sup>1)</sup>	5,0		PRD <sub>deklarovaná</sub> <sup>2)</sup>		-			-
WTS <sub>AIR</sub> (mm/10 <sup>3</sup> ) <sup>1)</sup>	0,07		WTS <sub>deklarovaná</sub> <sup>2)</sup>		-			-
Ložní vrstvy								
Typ směsi	S		+		bez označení			
Označení směsi	16 S, 22 S		16 +, 22 +		16, 22			
D <sub>max</sub>	ACL 16 S	ACL 22 S	ACL 16 +	ACL 22 +	ACL 16		ACL 22	
PRD <sub>AIR</sub> (%) <sup>1)</sup>	3,0		PRD <sub>deklarovaná</sub> <sup>2)</sup>		-			
WTS <sub>AIR</sub> (mm/10 <sup>3</sup> ) <sup>1)</sup>	0,05		WTS <sub>deklarovaná</sub> <sup>2)</sup>		-			
Podkladní vrstvy								
Typ směsi	S		+					
Označení směsi	16 S, 22 S		16 +, 22 +					
D <sub>max</sub>	ACP 16 S		ACP 22 S		ACP 16 +		ACP 22 +	
PRD <sub>AIR</sub> (%) <sup>1)</sup>	-		-		-			
WTS <sub>AIR</sub> (mm/10 <sup>3</sup> ) <sup>1)</sup>	-		-		-			
<sup>1)</sup> Zkouška odolnosti proti tvorbě trvalých deformací se provede dle ČSN EN 13108-20:2008 tab D.1, řádek 4 - <i>Zkoušky typu</i> <sup>2)</sup> Hodnota se deklaruje pouze pro TDZ II nebo pro pomalou a zastavující dopravu pro TDZ III, v obou případech pouze při použití nemodifikovaného pojiva								

Tab. 6: Kritéria odolnosti proti trvalým deformacím dle ČSN EN 13108-1

## 15.7) Slovenská republika

Na Slovensku je situace o poznání lepší, alespoň co do existence předpisů týkajících se návrhů a ověření vozovek na trvalé deformace.

Slovenští kolegové mají k dispozici TP 03/2009 [2], tedy dokument obsahující výpočetní metodiku pro návrh konstrukce vozovky a ověření na odolnost proti trvalým deformacím.

Technické podmínky obsahují postup, tedy vzorový příklad, pro výpočet netuhé i polotuhé vozovky. Dále bude představena metoda výpočtu trvalé deformace pro netuhou vozovku.

Jako druhý předpis používaný na Slovensku je TP 11/2015 vycházející ze STN EN 12697-22+A1. Prakticky se jedná o harmonizovanou slovenskou normu a postup pro stanovení zkoušky vyjždění kolem je obdobný jako v české verzi ČSN EN 12697 - 22+A1.

## 15.8) Výpočet obecně

Trvalá deformace netuhé vozovky se vypočítá jako součet trvalých deformací jednotlivých vrstev:

$$Y_{trv,NT} = K_p y_p + \sum_{i=1}^{i=n} K_i (y_{pr,i} - y_{pr,i+1}) \quad (15.4)$$

$y_p$  pružný průhyb na povrchu podloží vypočtený pomocí modelu vozovky, viz [2]

$y_{pr,i}$  pružný průhyb vespod  $i$ -té vrstvy

$y_{pr,i+1}$  pružný průhyb na  $i+1$  vrstvě (horní vrstva)

$K_p, K_i$  deformační součinitele vyjadřující poměr pružné a trvalé deformace zeminy v podloží a materiálů vrstev vozovky (v závislosti na opakování zatížení).

Dle technických podmínek se pružné průhyby vypočítají od zatížení návrhovou nápravou o hmotnosti 10 tun, tedy 100 kN. Do výpočtu trvalých deformací dále vstupuje intenzita dopravy vozidel připadající na období jaro, léto a podzim.

Tedy po dosazení těchto parametrů vypadá výše uvedená rovnice pro výpočet trvalých deformací následovně:

$$Y_{trv,NT} = K_p y_p + \sum_{i=1}^{i=n} K_{i,l} (y_{pr,i,l} - y_{pr,i-1,l}) + \sum_{i=1}^{i=n} K_{i,j} (y_{pr,i,j} - y_{pr,i-1,j})$$

$K_{i,l}$  je deformační součinitel materiálu  $i$ -té vrstvy a vypočte se podle vztahu:

$$K_{i,l} = m \cdot N_l^n \quad (15.5)$$

a  $N_l$  se stanoví jako:

$$N_l = 0,3N_c \quad (15.6)$$

Parametr  $N_c$  vyjadřuje počet návrhových náprav (návrhové zatížení) za celé návrhové období vozovky.

Součinitele  $m$  a  $n$  zohledňují materiály vrstev, viz Tab.7.

Materiál - stmelené směsi	m	n
AC, PA	4,50	0,23
ACmodif, SMA, BBTM	3,50	0,22
MA	4,50	0,21
ACpodkladní	4,50	0,25
ACpodkladní modifikovaný	4,40	0,24
Materiál - nestmelené kamenivo	m	n
ŠP	2,00	0,30
ŠD, ŠV	2,00	0,25
MSK	2,50	0,22
Materiál - Makadamy, vtlačná úprava	4,00	0,25
Poznámka: názvy materiálů dle slovenského názvosloví		

Tab. 7: Hodnoty součinitelů  $m$  a  $n$

$K_{i,j}$  deformační součinitel materiálu  $i$ -té vrstvy, přičemž:

$$N_j = 0,5N_c \quad (15.7)$$

$K_p$  deformační součinitel podloží viz tabulka 8

Parametr podloží	$K_p$
$E_p, n \leq 45 \text{ Mpa}$	$1,3 + 0,70 \log N_{def}$
$45 \leq E_p, n \leq 60 \text{ Mpa}$	$1,3 + 0,65 \log N_{def}$
$E_p, n > 60 \text{ Mpa}$	$1,3 + 0,60 \log N_{def}$

Tab. 8: Hodnoty  $K_p$ ,

kde  $N_{def}$  se vypočte jako:

$$N_{def} = 0,5N_c + 0,3N_c = N_j + N_c \quad (15.7)$$

$N_c$  návrhové dopravní zatížení za návrhové období vyjádřené počtem návrhových náprav.

Uváděný postup výpočtu dle těchto TP dokonce umí zohlednit kromě standardního zatížení i nestandardní, tedy takové zatížení, které vyvozuje vozidlo brzdící, stojící nebo rozjíždějící se. V případě, že není počet těchto nestandardních náprav z celkového množství návrhových náprav  $N_{def}$  známo nebo zadáno objednatel, tyto TP uvádějí postup, jak toto procento zastoupení odhadnout.

Odhad nestandardních náprav je uváděn jako 60 % z celkového počtu návrhových náprav  $N_{def}$ , a jejich účinek se uvažuje při období jara a podzimu, tedy průměrných klimatických podmínek takto:

$$0,6 * 0,5N_c = 0,30N_c \quad (15.8)$$

a pro letní podmínky:

$$0,6 * 0,3N_c = 0,18N_c \quad (15.9)$$

Pro výpočet s uvažováním takto upravených vztahů je nutno uvažovat hodnoty modulu pružnosti  $E$  a Poissonova čísla stanovených pro dobu trvání zatížení 60 s.

V [2], kapitola 4 jsou tabulky uvádějící potřebné parametry pro výpočet v závislosti na teplotě ( $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $11\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $27\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) a době trvání zatížení, tedy 60 s nebo standardní hodnota  $E$ ,  $\nu$ .

Počet návrhových náprav se standardním účinkem se uvažuje jako 40 % z celkového počtu návrhových náprav  $N_{\text{def}}$ , tedy:

jaro, podzim:

$$0,4 * 0,5N_c = 0,20N_c \quad (15.10)$$

léto:

$$0,4 * 0,3N_c = 0,12N_c \quad (15.11)$$

Na závěr už zbývá stanovit kritéria pro hloubku kolejí dle [2], kapitola 5.3.

### 15.9) Kritéria pro hloubku kolejí

Na povrchu netuhé vozovky se hloubka kolejí určí z empirického vztahu:

$$H_k = 1,40 \cdot Y_{trv,NT} \quad (15.12)$$

Vozovka dle metodiky v TP 03/2009 vyhovuje, pokud je hloubka koleje menší než přípustné hodnoty:

- vozovky na dálnicích a rychlostních silnicích	20,00 mm
- vozovky na silnicích I. a II. třídy	25,00 mm
- vozovky na silnicích III. třídy	30,00 mm

Minimální hodnoty pro hloubku vyjeté koleje může dle těchto TP investor komunikace upravovat.

## 16) Program CalMe

Výpočetní program CalMe byl vyvinut v Pavement Research Centre v Kalifornii na základě poznatků insitu měření při programu SHRP. Použití programu je vhodné pro numerickou analýzu chování nových netuhých vozovek nebo jejich oprav a rekonstrukcí se zaměřením na posuzování a predikci tvorby trvalých deformací a únavových trhlin.

Popisovat detailně celý software by bylo na dlouho, neboť jen zjednodušená uživatelská příručka obsahuje na 150 stran textu. Bude tedy popsán stručně jen základ a to z důvodu, že se v rámci zpracování diplomové práce nepodařilo zajistit funkční licenci. Další výpočty podle metodiky software CalMe byly provedeny pomocí aplikace Microsoft Excel viz Praktická část. Pro bližší informace o nastavení programu a postupu práce lze odkázat na uživatelskou příručku, která je součástí softwaru.

Program pracuje na bázi velké knihovny vstupů do výpočtů, odsud jsou čerpány vstupní hodnoty přímo nebo je možné si založit knihovnu vlastní, či data doplňovat. Knihovna obsahuje data od klimatických pásem pro určité silnice a dálnice v USA přes materiálové charakteristiky až po nepřeberné množství zatěžovacích náprav. Po spuštění se program automaticky zeptá, zda se bude jednat o novostavbu nebo rekonstrukci. Pro účely této práce by byla volba jasná - novostavba. Nyní si program žádá o regionální začlenění posuzované oblasti (stát) a číslo silnice. Volba těchto dat nemá vliv na výpočet, pouze se přepíše do hlavičky výpočtu.

Nyní si program žádá o zadání návrhových parametrů: klimatická zóna, dopravní zatížení a konstrukce vozovky. Po tomto zadání se program dotáže, zda chce uživatel posoudit vozovku sám nebo mu ji má program navrhnout. Poté již stačí zadat omezující parametry na hloubku deformací, procentuální množství trhlin atd. Posledním vstupem je datum uvedení vozovky do provozu, návrhová rychlost a případná hodnota IRI (v případě posuzování již realizovaných vozovek).

## 17) Závěr teoretické části

Závěrem první kapitoly bych nejprve rád shrnul dosavadní text a návrhové přístupy používané v České republice a u zahraničních kolegů.

Úvodem byly představeny základní pojmy a vysvětlen obor zabývající se viskoelastickými materiály - reologie. Dále byly popsány reologické modely pro aproximaci chování materiálu v závislosti na délce trvání zatížení nebo působení teploty. Součástí této kapitoly byly i postupy a přístroje sloužící k vyšetřování výše popsaných vlastností materiálu. Poslední část byla věnována zejména návrhovým přístupům k predikci a eliminaci (resp. oddálení) vzniku trvalých deformací.

Stručně lze říci, že Česká republika a další evropské země používající harmonizované EN normy postupují dle (ČSN, DIN) EN 12697-22+A1 Asfaltové směsi - Zkušební metody pro asf. směsi za horka - Část 22: Zkouška pojíždění kolem.

Poté je proveden návrh směsi ve smyslu ČSN EN 13108 - x Specifikace pro materiály (1-Asfaltový beton, 2 - BBTM, 5 - SMA...), tedy porovnání naměřených hodnot při zkoušce pojíždění kolem s tabulkami NA-E5.1-3. na str. 47, 48 a 49 ČSN EN 13108-1 a obdobně ČSN EN 13108-5).

Na Slovensku jsou výše uvedené harmonizované normy taktéž platné, avšak je pro návrh vozovky s ohledem na trvalé deformace možno využít TP 3/2009 obsahující výpočetní postup posouzení netuhé a polotuhé vozovky.

V USA, konkrétně v Kalifornii, mají silniční kolegové k dispozici dle mého názoru revoluční software pro posuzování vozovek CalMe.

Při studování podkladů, návrhových metod a reologického chování asfaltových hutněných směsí nebyla nalezena další ucelená metodika, harmonizovaný postup nebo alespoň jiné empirické doporučení, jak problematiku trvalých deformací v netuhých vozovkách řešit.

## B Praktická část

### 1) Úvod

V této druhé části diplomové práce bude provedeno posouzení vybraných konstrukcí vozovek dle slovenského TP 3/2009 a americkým programem CalMe.

Obecně platí, že cílem této diplomové práce je zhodnotit výše uvedené nástroje pro výpočet trvalých deformací a ověřit jejich případné využití pro českou projekční praxi. Výpočty budou tedy provedeny dle slovenského TP 3/2009 a metodiky softwaru CalMe, avšak pro Českou republiku. Bude proto vybrán úsek české silnice I. třídy se známou denní průměrnou intenzitou TNV a klimatickou oblastí.

Pro potřeby výpočtu byla vybrána oblast Ostravy, a to z důvodu blízkosti k slovenským státním hranicím. Dá se předpokládat, že tu bude podobné klimatické podnebí jako na Slovensku. Důvod tohoto rozhodnutí bude patrný dále. V metodice TP 3/2009 nelze volit teplotní oblasti dle regionu, ale jen v rámci Slovenska.

Tato oblast byla také vybrána z důvodu větší koncentrace průmyslových oblastí a poloze vzhledem k tranzitním trasám na Slovensko a do Polska. Dá se zde tudíž předpokládat větší počet těžkých nákladních vozidel než na jiných silnicích první třídy.

Konkrétně byla vybrána silnice I/11 Prodloužená Rudná - provizorní sjezd na silnici II/647 (úsek č. 1) a I/11 Rudná úsek před křižovatkou s I/56 (úsek č. 2).

Pro oba výpočetní postupy byly vybrány skladby vozovky používaných pro silnice první třídy případně dálniční přivaděče. Nutno dodat, že podkladní vrstvy byly zredukovány pouze na jednu vrstvu MZK a ŠDA z důvodu posouzení vozovky v programu OPMECO a také z důvodu, že se do níže popsaných skladeb často používá cementová stabilizace (nebo recyklace stabilizace za studena s přidáním cementu u modernizovaných úseků), ale poté se již jedná o vozovku tzv. polotuhou a taková není předmětem této práce. Dále je vozovka zredukována i z důvodu praktických. Pro účely této práce není rozhodující, aby byla vozovka nadimenzovaná s vysokou rezervou a vydržela po dobu životnosti veškeré vnější zatížení, ale aby byl představen a posouzen výpočetní postup, který by mohl být vhodný teoreticky začít používat i při návrhu v České republice.

#### 1.1) Skladba konstrukce vozovky č.1

Asfaltový koberec mastixový modif. s posypem předobaleným kamenive fr. 2/4	SMA 11S	PMB 45/80-60	40 mm 1,5 kg/m <sup>2</sup>	ČSN EN 13108-5 ČSN 73 6121
Spoj. postřík kationaktivní emulzí modif.	PS-EP C 60 B5		0,35 kg/m <sup>2</sup> *	ČSN EN 13808 ČSN 73 6129
Asfaltový beton pro ložní vrstvu modif.	ACL 16S	PMB 25/55-60	80 mm	ČSN EN 13108-1 ČSN 73 6121
Spoj. postřík kationaktivní emulzí modif.	PS-EP C 60 B5		0,35 kg/m <sup>2</sup> *	ČSN EN 13808 ČSN 73 6129
Asfaltový beton pro podkladní vrstvu modif.	ACP 22	50/70	100 mm	ČSN EN 13108-1 ČSN 73 6121
Infilt. postřík kationaktivní emulzí s posypem kamenive fr. 2/4	PI-E C 60 B5		0,60 kg/m <sup>2</sup> * 3,0 kg/m <sup>2</sup>	ČSN EN 13808 ČSN 73 6129
Mechanicky zpevněné kamenivo	MZK	0/32 G <sub>A</sub>	200 mm	ČSN EN 13285 ČSN 73 6126 -1
Štěrkodrt'	ŠD <sub>A</sub>	0/32 G <sub>E</sub>	250 mm	ČSN EN 13285 ČSN 73 6126 -1

Konstrukce celkem

min 670 mm



\* postřiky jsou uváděny v množství zbytkového pojiva

## 1.2) Skladba konstrukce vozovky č.2

Asfaltový koberec mastixový modif. s posypem předobaleným kamenive fr. 2/4	SMA 11S	PMB 45/80-60	40 mm 1,5 kg/m <sup>2</sup>	ČSN EN 13108-5 ČSN 73 6121
Spoj. postřík kationaktivní emulzí modif.	PS-EP C 60 B5		0,35 kg/m <sup>2</sup> *	ČSN EN 13808 ČSN 73 6129
Asfaltový beton pro ložní vrstvu modif.	ACL 16S	PMB 25/55-60	80 mm	ČSN EN 13108-1 ČSN 73 6121
Spoj. postřík kationaktivní emulzí modif.	PS-EP C 60 B5		0,35 kg/m <sup>2</sup> *	ČSN EN 13808 ČSN 73 6129
Směs s vysokým modulem tuhosti Infilt. postřík kationaktivní emulzí s posypem kamenive fr. 2/4	VMT 16 PI-E C 60 B5	PMB 25/55-55	100 mm 0,60 kg/m <sup>2</sup> * 3,0 kg/m <sup>2</sup>	TP 151 ČSN EN 13808 ČSN 73 6129
Mechanicky zpevněné kamenivo	MZK	0/32 G <sub>A</sub>	200 mm	ČSN EN 13285 ČSN 73 6126 -1
Štěrkožtrť	ŠD <sub>A</sub>	0/32 G <sub>E</sub>	250 mm	ČSN EN 13285 ČSN 73 6126 -1

---

Konstrukce celkem min 670 mm

\* postřiky jsou uváděny v množství zbytkového pojiva

## 1.3) Skladba konstrukce vozovky č.3

Asfaltový beton pro obrusnou vrstvu.	ACO 11S	50/70	40 mm	ČSN EN 13108-1 ČSN 73 6121
Spoj. postřík kationaktivní emulzí	PS-E C 60 B5		0,35 kg/m <sup>2</sup> *	ČSN EN 13808 ČSN 73 6129
Asfaltový beton pro ložní vrstvu	ACL 16S	PMB 25/55-60	80 mm	ČSN EN 13108-1 ČSN 73 6121
Spoj. postřík kationaktivní emulzí	PS-E C 60 B5		0,35 kg/m <sup>2</sup> *	ČSN EN 13808 ČSN 73 6129
Směs s vysokým modulem tuhosti Infilt. postřík kationaktivní emulzí s posypem kamenive fr. 2/4	VMT 16 PI-E C 60 B5	PMB 25/55-55	100 mm 0,60 kg/m <sup>2</sup> * 3,0 kg/m <sup>2</sup>	TP 151 ČSN EN 13808 ČSN 73 6129
Mechanicky zpevněné kamenivo	MZK	0/32 G <sub>A</sub>	150 mm	ČSN EN 13285 ČSN 73 6126 -1
Štěrkožtrť	ŠD <sub>A</sub>	0/32 G <sub>E</sub>	250 mm	ČSN EN 13285 ČSN 73 6126 -1

---

Konstrukce celkem min 620 mm

\* postřiky jsou uváděny v množství zbytkového pojiva

## 1.4) Dopravní zatížení

Dopravní zatížení bylo převzato z podkladů Ředitelství silnic a dálnic pro celostátní sčítání dopravy dostupné online na adrese <http://scitani2010.rsd.cz>.

Úsek č. 1: I/11 Prodloužená Rudná - provizorní sjezd na silnici II/647 úsek 7-5193  
RPDI - všechny dny - voz/24h:

I/ 11 Prodloužená Rudná sjezd na II/ 647	
Typ vozu	RPDI
LN Lehké nákladní vozidlo	1105
SN Střední nákl. Voz	561
SNP Stř. nákl. voz + přívěs	69
TN Těžké. nákl. voz	358
TNP Těžké. nákl. + přívěs	108
NSN Návěsová souprava	451
A Autobus	42
AK Autobus kloubový	0

Tab. 9: Výsledky sčítání dopravy - úsek č.1

Úsek č. 2: I/11 mezikřižovatkový úsek po křižovatku s I/56 úsek 7-3392  
RPDI - všechny dny - voz/24h:

I/ 11 Prodloužená Rudná sjezd na II/ 647	
Typ vozu	RPDI
LN Lehké nákladní vozidlo	1718
SN Střední nákl. Voz	877
SNP Stř. nákl. voz + přívěs	65
TN Těžké. nákl. voz	587
TNP Těžké. nákl. + přívěs	173
NSN Návěsová souprava	829
A Autobus	336
AK Autobus kloubový	148

Tab. 10: Výsledky sčítání dopravy - úsek č.2

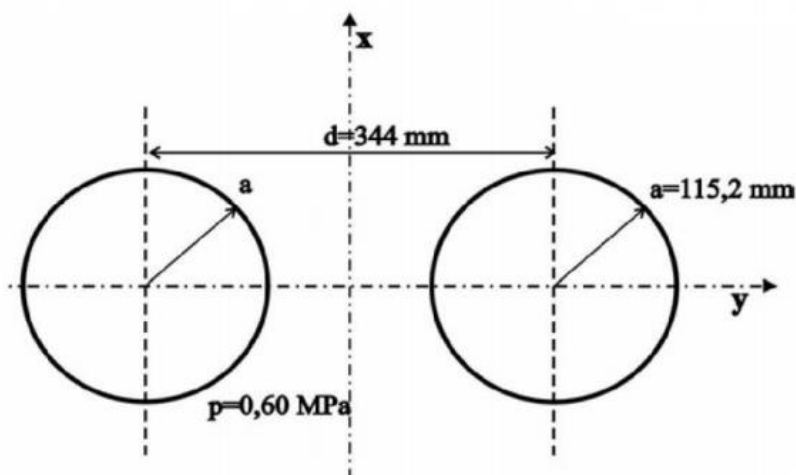
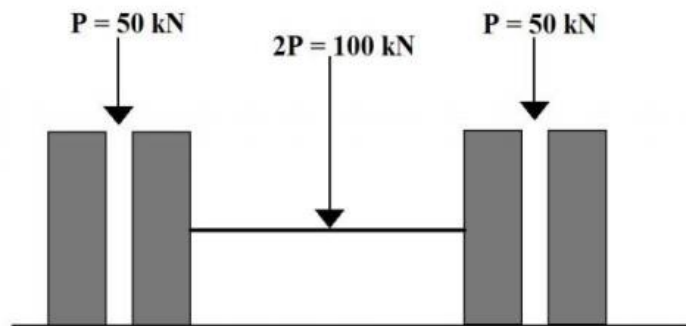
Nyní bude podrobně popsán výpočet pro skladbu vozovky č. 1 na úseku č. 1 a pro skladbu č. 1 na úseku č. 2 a na úseku č. 2 (před křižovatkou) bude vždy proveden i výpočet s uvažováním pomalé až zastavující dopravy. Zbývající konstrukce na daných lokalitách budou popsány jen výsledkově. Dále byl proveden výpočet vozovek na daných úsecích nejen po 20 letech (konec návrhového období), ale po jednotlivých rocích, aby byl jasně patrný nárůst deformace a bylo možno provést grafické vyhodnocení konstrukcí a výpočtů.

## 2) Posouzení vozovky dle TP 3/2009

### 2.1) Skladba vozovky č. 1 na úsek č. 1

Dopravní zatížení dle metodiky TP 3/2009 Kapitola 5 pro potřeby posouzení tvorby trvalých deformací se stanovuje jako počet návrhových náprav, které projedou přes konstrukci vozovky za návrhové období. Návrhová náprava o hmotnosti 10 t a styčné kružnice jsou popsány na obr. 39.

$2P = 100 \text{ kN}$   
 $P = 50 \text{ kN}$   
 $d = 344 \text{ mm}$   
 $a = 115,2 \text{ mm}$   
 $p = 0,60 \text{ MPa}$



Obr. 39: Schéma návrhové nápravy dle TP 3/2009

Dopravní zatížení:

Přepoččet nákladních vozidel na ekvivalentní návrhovou nápravu:

$$NV = N1 + N2 + PN2 + PN3 + NS + A + PA \quad (2.1)$$

N1	lehké nákladní automobily	(LN)
N2	střední nákladní automobily	(SN)
PN2	přívěsy střední nákladních automobilů	(SNP-SN)
N3	těžké nákladní automobily	(TN)
PN3	přívěsy těžkých nákladních automobilů	(TNP-TN)
NS	návěsové soupravy	(NSN)
A	autobus	
PA	přívěsy autobusů	

Jak si lze všimnout, slovenská metodika třídění vozidel při sčítání dopravy je trochu odlišná od naší. V závorce jsou uvedeny zkratky používané v české metodice. Dále je možno si všimnout, že TP 3/2009 neuvažuje kloubový autobus, traktor a traktor s přívěsem. Protože jeden z vybraných úseků se nachází v intravilánu a intenzita kloubových autobusů zde není zanedbatelná, dovoluje si autor tuto položku do vzorce přidat.

Dále slovenská metodika třídí nákladní vozidla a návěsy zvlášť oproti naší, to však nepředstavuje problém. Do výpočtu se zahrnou přívěsy zvlášť a nákladní automobily se přičtou k ostatním bez přívěsu. Upravená RPDÍ pak bude následující:

N1	lehké nákladní automobily	1105	voz/24h
N2	střední nákladní automobily	561	voz/24h
PN2	přívěsy středních nákladních automobilů	69	voz/24h
N3	těžké nákladní automobily	358	voz/24h
PN3	přívěsy těžkých nákladních automobilů	108	voz/24h
NS	návěsové soupravy	451	voz/24h
A	autobus	42	voz/24h
PA	přívěsy autobusů	-	
AK	kloubový autobus, dodatek autora	0	voz/24h

Upravená rovnice (2.1):

$$NV = N1 + N2 + PN2 + PN3 + NS + A + PA + AK \quad (2.2)$$

$$NV = 1105 + 561 + 69 + 358 + 108 + 451 + 42 + 0$$

$$NV = \underline{\underline{2694 \text{ voz/24h}}}$$

Počet ekvivalentních návrhových vozidel v obou směrech za 24h se vypočítá dle vztahu (2.3):

$$NV_p = 0,5(\delta_z + \delta_k)NV \quad (2.3)$$

$$NV_p = 0,5(1,1 + 1,46)2694 \doteq \underline{\underline{3449 \text{ voz/24h}}}$$

$\delta_z$   $\delta_k$  koeficienty růstu dopravy na začátku a na konci návrhového období dle TP 3/2009 příloha P2, pro silnice I. třídy - návrhové období 20 let (2010-2030)

Redukovaný počet v jednom jízdním dimenzovaném pruhu:

$$NV_{\text{red}} = C1 \cdot C2 \cdot C3 \cdot C4 \cdot NV_p \quad (2.4)$$

$$NV_{\text{red}} = 0,5 \cdot 1,0 \cdot 0,53 \cdot 1,3 \cdot 3449 = \underline{\underline{1189 \text{ voz/24h/pruh}}}$$

C1 součinitel převodu dopravního zatížení na jeden směr, nejsou-li dány poměry směrovosti z dopravního průzkumu doporučuje se volit hodnotu 0,5

C2 součinitel vyjadřující pravděpodobnost přejezdu vozidel do jiného jízdního pruhu na rampě MÚK lze uvažovat hodnotu 1,0

C3 součinitel vyjadřující vytiženost nosnosti nákladních vozidel, pro silnice I. třídy je doporučeno uvažovat 70 % vytiženosti, čemuž odpovídá hodnota 0,53

C4 součinitel vyjadřující zvýšený účinek vozidel a nestandardní zatížení, pro řadící a stoupací pruhy (lze přiřadit této klasifikace větev MÚK - sjezd silnice I/11 Prodloužená Rudná) silnice I. třídy, uvažujeme tedy hodnotu 1,3

Celkový počet nákladních vozidel za návrhové období:

$$NV_c = NV_{red} \cdot 365 \cdot n_0 \quad (2.5)$$

$$NV_c = 1189 \cdot 365 \cdot 20 = \underline{\underline{8\ 679\ 700\ voz/20\ let}}$$

$n_0$  návrhové období v letech

Celkový počet návrhových náprav za návrhové období:

$$N_c = C5 \cdot NV_c \quad (2.6)$$

$$N_c = 2 \cdot 8\ 679\ 700 = \underline{\underline{17\ 359\ 400\ náprav/20\ let}}$$

Přehled dopravního zatížení, viz Příloha 1.

Výpočet trvalých deformací:

Vstupní údaje - pružné deformace vrstev byly spočteny v programu OPMECO. Hodnoty modulů pružnosti a Poissonova čísla jsou v souladu s TP 3/2009 Příloha 4.3.

Konstrukce vozovky č. 1							
Konstrukce vozovky		Modul pružnosti E(Mpa)			Poissonovo číslo		
Název vrstvy	Tloušťka (m)	27°C	11°C	0°C	27°C	11°C	0°C
SMA 11SPMB 45/80-60	0,04	3750,00	6000,00	-	0,40	0,30	-
AQL 22SPMB 25/55-60	0,08	2800,00	4600,00	-	0,40	0,30	-
ACP 22SA 50/70	0,10	1250,00	3050,00	-	0,44	0,33	-
MZK 0/32 Ga	0,20	600,00	600,00	-	0,25	0,25	-
Šta 0/32 Ce	0,25	350,00	350,00	-	0,30	0,30	-

Tab. 11: Návrhové parametry konstrukce č.1

Výpočet trvalé deformace vychází ze vztahů podrobně popsanych v kapitole 15.7 Teoretické části.

Nejprve se vypočtou pružné deformace vrstev vozovky:

Vypočtené hodnoty průhybu - Opmeeco (cm)	11°C	27°C
Průhyb na povrchu obrusné vrstvy	0,0399226	0,0452339
Průhyb na spodku obrusné vrstvy	0,0398330	0,0452843
Průhyb na povrchu ložné vrstvy	0,0398330	0,0452843
Průhyb na spodku ložné vrstvy	0,0393309	0,0445096
Průhyb na povrchu podkladní vrstvy	0,0393542	0,0445619
Průhyb na spodku podkladní vrstvy	0,0388361	0,0434287
Průhyb na povrchu 1. NV	0,0391736	0,0432583
Průhyb na spodku 1. NV	0,0368768	0,0406145
Průhyb na povrchu 2. NV	0,0371831	0,0410111
Průhyb na spodku 2. NV	0,0344563	0,0376340

Tab. 12: Výsledky z programu OPMECO

$m_{SMA}$	3,50	$n_{SMA}$	0,22
$m_{ACL}$	4,50	$n_{ACL}$	0,23
$m_{ACP}$	4,40	$n_{ACP}$	0,24
$m_{MZK}$	2,50	$n_{MZK}$	0,22
$m_{SD}$	2,00	$n_{SD}$	0,25

Tab. 13: Součinitele vrstev

Vliv ročního období:

$$N_{léto} = 0,3N_c = 0,3 \cdot 17\,359\,400 = \mathbf{5\,207\,820 \text{ \u00e1prav/20let}} \quad (2.7)$$

$$N_{jaro} = 0,5 N_c = 0,5 \cdot 17\,359\,400 = \mathbf{8\,679\,700 \text{ \u00e1prav/20let}} \quad (2.8)$$

Parametr  $N_c$  vyjad\u0159uje po\u00eet n\u00e1vrhov\u00fdch \u00e1prav (n\u00e1vrhov\u00e9 zat\u00ed\u017een\u00ed) za cel\u00e9 n\u00e1vrhov\u00e9 obdob\u00ed vozovky.

Stanoven\u00ed deforma\u00e7n\u00edch sou\u00e7initel\u00fa:

$$K_{i,l\u00e9to}, K_{i,jaro} \quad K_{i,l\u00e9to/jaro} = m \cdot N_{l\u00e9to/jaro}^n$$

$K_{SMA,l\u00e9to}$	105,1314	$K_{SMA,jaro}$	117,6357
$K_{ACL,l\u00e9to}$	157,7769	$K_{ACL,jaro}$	177,4470
$K_{ACP,l\u00e9to}$	180,0736	$K_{ACP,jaro}$	203,5606
$K_{MZK,l\u00e9to}$	75,0938	$K_{MZK,jaro}$	84,0255
$K_{SD,l\u00e9to}$	95,5419	$K_{SD,jaro}$	108,5566

Tab. 14: Sou\u00e7initele trval\u00fdch deformac\u00ed vrstev

Trval\u00e1 deformace = vliv podlo\u017d\u00ed + vliv letn\u00edho období (27 \u00b0C) + jarn\u00edho/podzimn\u00edho období (11 \u00b0C)

$$Y_{trv,NT} = K_p y_p + \sum_{i=1}^{i=n} K_{i,l} (y_{pr,i,l} - y_{pr,i-1,l}) + \sum_{i=1}^{i=n} K_{i,j} (y_{pr,i,j} - y_{pr,i-1,j}) \quad (2.9)$$

Vliv podlo\u017d\u00ed: viz kapitola 15.7 Teoretick\u00e9 \u00e1sti

$$K_p = 1,3 + 0,70 \log N_{def} = 1,3 + 0,70 \log(0,5N_c + 0,3N_c) = 1,3 + 0,70 \log(8\,679\,700 + 5\,207\,820) = \mathbf{6,299837288}$$

$$\text{Trval\u00e1 deformace podlo\u017d\u00ed: } K_p y_p = 6,299837288 \cdot 0,344563 = \mathbf{2,17069 \text{ mm}}$$

$y_p$  vypo\u00e7ten\u00e1 hodnota pr\u00fahybu na pl\u00e1n\u00ed

$Y_{pr,i,l} - Y_{pr,i-1,l}$ (mm)	$Y_{pr,i,j} - Y_{pr,i-1,j}$ (mm)	$K_{i,l\acute{e}to} * (Y_{pr,i,j/l} - Y_{pr,i-1,j/l})$ (mm)	$K_{i,jaro} * (Y_{pr,i,j/l} - Y_{pr,i-1,j/l})$ (mm)
$Y_{pr,SMA,l\acute{e}to}$ 0,000000	$Y_{pr,SMA,jaro}$ 0,000896	0,000000000	0,105401573
$Y_{pr,AQL,l\acute{e}to}$ 0,007747	$Y_{pr,AQL,jaro}$ 0,005021	1,222297551	0,890961257
$Y_{pr,ACP,l\acute{e}to}$ 0,011332	$Y_{pr,ACP,jaro}$ 0,005181	2,040594322	1,054647677
$Y_{pr,MZK,l\acute{e}to}$ 0,026438	$Y_{pr,MZK,jaro}$ 0,022968	1,985330979	1,929897419
$Y_{pr,SD,l\acute{e}to}$ 0,033771	$Y_{pr,SD,jaro}$ 0,027268	3,226546347	2,960120971

Tab. 15: Trvalé deformace vrstev vozovky

Dosazením do vztahu (2.9) dostáváme součet trvalé deformace podloží, vozovky v letním období a jarním. Celková trvalá deformace tedy je:

$$Y_{trv,NT} = 2,17069 + 8,474769 + 6,941029 = \underline{\underline{17,58649 \text{ mm}}}$$

Dle TP 3/2009 je kritérium hloubky kolejí na netuhých vozovkách silnic I. třídy stanoveno jako:

$$H_k = 1,40 Y_{trv,NT} \leq 25 \text{ mm}$$

$$H_k = 1,40 \cdot 17,58649 \leq 25 \text{ mm}$$

$$\underline{\underline{H_k = 24,621 \text{ mm} \leq 25 \text{ mm}}}$$

**Vozovka VYHOVUJE kritériu TP 3/2009**

## 2.2) Skladba vozovky č.1 na úsek č. 2

Nyní bude spočtena vozovka tvořena konstrukcí č. 1 na úseku č. 2, kde se nachází úrovnňová křižovatka a tudíž se zde dá očekávat výskyt pomalu jedoucích a stojících vozidel.

Výpočet bude proveden dle metodiky TP 3/2009 nejprve bez uvážení zastavující dopravy a posléze s uvážení zastavující dopravy. Pro výpočet zastavující dopravy budou použity výpočetní parametry modulu tuhosti a Poissonova čísla stanovené při době zatížení 60 s.

Dopravní zatížení:

$$NV = N1 + N2 + PN2 + PN3 + NS + A + PA + AK \quad (2.10)$$

$$NV = 1718 + 877 + 65 + 587 + 173 + 829 + 336 + 0 + 148$$

$$NV = \underline{\underline{4733 \text{ voz/24h}}}$$

Počet ekvivalentních návrhových vozidel v obou směrech za 24h se vypočítá dle vztahu (2.10):

$$NV_p = 0,5(\delta_z + \delta_k)NV \quad (2.11)$$

$$NV_p = 0,5(1,1 + 1,46)4733 \doteq \underline{\underline{6059 \text{ voz/24h}}}$$

Redukovaný počet v jednom jízdním dimenzovaném pruhu:

$$NV_{red} = C1 \cdot C2 \cdot C3 \cdot C4 \cdot NV_p \quad (2.12)$$

$$NV_{red} = 0,5 \cdot 0,9 \cdot 0,53 \cdot 2,0 \cdot 6059 = \underline{\underline{2891 \text{ voz/24h/pruh}}}$$

C2 součinitel vyjadřující pravděpodobnost přejezdu vozidel do jiného jízdního pruhu

úsek místní komunikace  $C2 = 0,9$

C4 součinitel vyjadřující zvýšený účinek vozidel a nestandardní zatížení, pro řadící a místní komunikace, kde vozidla často stojí  $C4 = 2$

Celkový počet nákladních vozidel za návrhové období:

$$NV_c = NV_{red} \cdot 365 \cdot n_0 \quad (2.13)$$

$$NV_c = 2891 \cdot 365 \cdot 20 = \underline{\underline{21\ 104\ 300\ voz/20\ let}}$$

$n_0$  návrhové období v letech

Celkový počet návrhových náprav za návrhové období:

$$N_c = C5 \cdot NV_c \quad (2.14)$$

$$N_c = 2 \cdot 21\ 104\ 300 = \underline{\underline{42\ 208\ 600\ náprav/20\ let}}$$

Výpočet trvalých deformací:

Vstupní údaje - pružné deformace vrstev byly spočteny v programu OPMECO. Hodnoty modulů pružnosti a Poissonova čísla jsou v souladu s TP 3/2009 Příloha 4.3.

Konstrukce vozovky č. 1							
Konstrukce vozovky		Modul pružnosti E(Mpa)			Poissonovo číslo		
Název vrstvy	Tloušťka (m)	27°C	11°C	0°C	27°C	11°C	0°C
SMA 11SPMB 45/80-60	0,04	3750,00	6000,00	-	0,40	0,30	-
ACL 22SPMB 25/55-60	0,08	2800,00	4600,00	-	0,40	0,30	-
ACP 22SA 50/70	0,10	1250,00	3050,00	-	0,44	0,33	-
MZK0/32 Ca	0,20	600,00	600,00	-	0,25	0,25	-
Šta 0/32 Ce	0,25	350,00	350,00	-	0,30	0,30	-

Tab. 16: Návrhové parametry konstrukce č. 1

Pružné deformace vrstev vozovky:

Vypočtené hodnoty průhybu - Opmecco (cm)	11°C	27°C
Průhyb na povrchu ohrubné vrstvy	0,0399226	0,0452339
Průhyb na spodku ohrubné vrstvy	0,0398330	0,0452843
Průhyb na povrchu ložné vrstvy	0,0398330	0,0452843
Průhyb na spodku ložné vrstvy	0,0393309	0,0445096
Průhyb na povrchu podkladní vrstvy	0,0393542	0,0445619
Průhyb na spodku podkladní vrstvy	0,0388361	0,0434287
Průhyb na povrchu 1. NV	0,0391736	0,0432583
Průhyb na spodku 1. NV	0,0368768	0,0406145
Průhyb na povrchu 2. NV	0,0371831	0,0410111
Průhyb na spodku 2. NV	0,0344563	0,0376340

Tab. 17: Výsledky z programu OPMECO



$m_{SMA}$	3,50	$n_{SMA}$	0,22
$m_{ACL}$	4,50	$n_{ACL}$	0,23
$m_{ACP}$	4,40	$n_{ACP}$	0,24
$m_{MZK}$	2,50	$n_{MZK}$	0,22
$m_{SD}$	2,00	$n_{SD}$	0,25

Tab. 18: Součinitele vrstev

Vliv ročního období:

$$N_{léto} = 0,3N_c = 0,3 \cdot 42\,208\,600 = \mathbf{12\,662\,580 \text{ náprav/20let}} \quad (2.15)$$

$$N_{jaro} = 0,5 N_c = 0,5 \cdot 42\,208\,600 = \mathbf{21\,104\,300 \text{ náprav/20let}} \quad (2.16)$$

Stanovení deformačních součinitelů:

$$K_{i,léto}, K_{i,jaro} \quad K_{i,léto/jaro} = m \cdot N_{léto/jaro}^n$$

$K_{SMA,léto}$	127,8271	$K_{SMA,jaro}$	143,0308
$K_{ACL,léto}$	193,5498	$K_{ACL,jaro}$	217,6797
$K_{ACP,léto}$	222,8733	$K_{ACP,jaro}$	251,9427
$K_{MZK,léto}$	91,3051	$K_{MZK,jaro}$	102,1649
$K_{SD,léto}$	119,3055	$K_{SD,jaro}$	135,5572

Tab. 19: Součinitele trvalých deformací vrstev

Trvalá deformace = vliv podloží + vliv letního období (27 °C) + jarního/podzimního období (11 °C)

$$Y_{trv,NT} = K_p y_p + \sum_{i=1}^{i=n} K_{i,l} (y_{pr,i,l} - y_{pr,i-1,l}) + \sum_{i=1}^{i=n} K_{i,j} (y_{pr,i,j} - y_{pr,i-1,j}) \quad (2.17)$$

Vliv podloží: viz kapitola 15.7 Teoretické části

$$K_p = 1,3 + 0,70 \log N_{def} = 1,3 + 0,70 \log(0,5N_c + 0,3N_c) = \mathbf{6,588373911}$$

$$\text{Trvalá deformace podloží: } K_p y_p = 6,588373911 \cdot 0,344563 = \mathbf{2,270110 \text{ mm}}$$

$y_p$  vypočtená hodnota průhybu na pláni

$y_{pr,i,l} - y_{pr,i-1,l}$ (mm)	$y_{pr,i,j} - y_{pr,i-1,j}$ (mm)	$K_{i,léto} * (y_{pr,i,j/l} - y_{pr,i-1,j/l})$ (mm)	$K_{i,jaro} * (y_{pr,i,j/l} - y_{pr,i-1,j/l})$ (mm)
$y_{pr,SMA,léto}$ 0,000000	$y_{pr,SMA,jaro}$ 0,000896	0,000000000	0,128155622
$y_{pr,ACL,léto}$ 0,0077470	$y_{pr,ACL,jaro}$ 0,0050210	1,499429933	1,092969528
$y_{pr,ACP,léto}$ 0,0113320	$y_{pr,ACP,jaro}$ 0,0051810	2,525600011	1,305314905
$y_{pr,MZK,léto}$ 0,026438	$y_{pr,MZK,jaro}$ 0,0229680	2,413923437	2,346522904
$y_{pr,SD,léto}$ 0,0337710	$y_{pr,SD,jaro}$ 0,0272680	4,029066792	3,696374955

Tab. 20: Trvalé deformace vrstev vozovky

Dosažením do vztahu (2.17) dostáváme součet trvalé deformace podloží, vozovky v letním období a jarním. Celková trvalá deformace tedy je:

$$Y_{trv,NT} = 2,270110 + 10,46802017 + 8,569337914 = \underline{\underline{21,307468 \text{ mm}}}$$

Dle TP 3/2009 je kritérium hloubky kolejí na netuhých vozovkách silnic I. třídy stanoveno jako:

$$H_k = 1,40 Y_{trv,NT} \leq 25 \text{ mm}$$

$$H_k = 1,40 \cdot 21,307468 \leq 25 \text{ mm}$$

**H<sub>k</sub> = 29,83 mm > 25 mm**

**Vozovka NEVYHOVUJE kritériu TP 3/2009**

Jak je vidět, vozovka na takto vysoké dopravní zatížení z hlediska hloubky vyjetých kolejí nevyhověla, a tudíž nevyhoví ani při aplikaci nestandardního zastavujícího zatížení. Nicméně si ale spočteme tento případ zatížení, ať je vidět jaký je rozdíl ve výpočtu a hlavně výsledku. Celková trvalá deformace se určí jako součet účinku standardního zatížení tedy vozidla s rychlostí 60 km/h a nestandardního neboli zastavujícího. Množství vozidel s nepříznivým účinkem TP 3/2009 doporučuje uvažovat jako 60 % N<sub>def</sub> není-li dáno jinak (např. investorem) Konstrukce č. 1 - úsek č. 2 - pomalá až zastavující doprava

Konstrukce vozovky č. 1							
Konstrukce vozovky		Modul pružnosti E(Mpa)			Poissonovo číslo		
Název vrstvy	Tloušťka (m)	27°C	11°C	0°C	27°C	11°C	0°C
SMA 11SPMB45/80-60	0,04	3750,00	6000,00	-	0,40	0,30	-
ACL22SPMB25/55-60	0,08	2800,00	4600,00	-	0,40	0,30	-
ACP22SA 50/70	0,10	1250,00	3050,00	-	0,44	0,33	-
MZK0/32 Ga	0,20	600,00	600,00	-	0,25	0,25	-
Šta 0/32 Ge	0,25	350,00	350,00	-	0,30	0,30	-

Tab. 21: Návrhové parametry konstrukce č. 1 - standardní zatížení

Konstrukce vozovky č. 1							
Konstrukce vozovky		Modul pružnosti E(Mpa) t=60s			Poissonovo číslo t=60s		
Název vrstvy	Tloušťka (m)	27°C	11°C	0°C	27°C	11°C	0°C
SMA 11SPMB45/80-60	0,04	2400,00	4800,00	-	0,47	0,35	-
ACL22SPMB25/55-60	0,08	1600,00	3200,00	-	0,47	0,35	-
ACP22SA 50/70	0,10	800,00	2000,00	-	0,47	0,35	-
MZK0/32 Ga	0,20	600,00	600,00	-	0,25	0,25	-
Šta 0/32 Ge	0,25	350,00	350,00	-	0,30	0,30	-

Tab. 22: Návrhové parametry konstrukce č. 1 - nestandardní zatížení

Pružné deformace vrstev vozovky (standardní a nestandardní):

Vypočtené hodnoty průhybu - Opmeco (cm)	11°C	27°C	Vypočtené hodnoty průhybu - Opmeco (cm)	11°C	27°C
Hodnoty pro E, v - t = 60s					
Průhyb na povrchu obrusné vrstvy	0,0399226	0,0452339	Průhyb na povrchu obrusné vrstvy	0,0424294	0,0500898
Průhyb na spodku obrusné vrstvy	0,0398330	0,0452843	Průhyb na spodku obrusné vrstvy	0,0423883	0,0502951
Průhyb na povrchu ložné vrstvy	0,0398330	0,0452843	Průhyb na povrchu ložné vrstvy	0,0423883	0,0502951
Průhyb na spodku ložné vrstvy	0,0393309	0,0445096	Průhyb na spodku ložné vrstvy	0,0416857	0,0490197
Průhyb na povrchu podkladní vrstvy	0,0393542	0,0445619	Průhyb na povrchu podkladní vrstvy	0,0417236	0,0490681
Průhyb na spodku podkladní vrstvy	0,0388361	0,0434287	Průhyb na spodku podkladní vrstvy	0,0409449	0,0473175
Průhyb na povrchu 1. NV	0,0391736	0,0432583	Průhyb na povrchu 1. NV	0,0411418	0,0466841
Průhyb na spodku 1. NV	0,0368768	0,0406145	Průhyb na spodku 1. NV	0,0386187	0,0437448
Průhyb na povrchu 2. NV	0,0371831	0,0410111	Průhyb na povrchu 2. NV	0,0389690	0,0442168
Průhyb na spodku 2. NV	0,0344563	0,0376340	Průhyb na spodku 2. NV	0,0359294	0,0403198

Tab. 23, 24: Výsledky z programu OPMECO - standardní, nestandardní zatížení

Parametry materiálu zůstávají neměnné:

$m_{SMA}$	3,50	$n_{SMA}$	0,22
$m_{ACL}$	4,50	$n_{ACL}$	0,23
$m_{ACP}$	4,40	$n_{ACP}$	0,24
$m_{MZK}$	2,50	$n_{MZK}$	0,22
$m_{SD}$	2,00	$n_{SD}$	0,25

Tab. 25: Součinitele vrstev

Vliv ročního období:

počet standardních náprav uvažujeme 40 %

$$N_{léto} = 0,4 \cdot 0,3 N_c = 0,4 \cdot 0,3 \cdot 42\,208\,600 = \mathbf{5\,065\,032 \text{ náprav/20let}} \quad (2.18)$$

$$N_{jaro} = 0,4 \cdot 0,5 N_c = 0,4 \cdot 0,5 \cdot 42\,208\,600 = \mathbf{8\,441\,720 \text{ náprav/20let}} \quad (2.19)$$

počet nestandardních náprav uvažujeme 60%

$$N_{léto} = 0,6 \cdot 0,3 N_c = 0,6 \cdot 0,3 \cdot 42\,208\,600 = \mathbf{7\,597\,548 \text{ náprav/20let}} \quad (2.20)$$

$$N_{jaro} = 0,6 \cdot 0,5 N_c = 0,6 \cdot 0,5 \cdot 42\,208\,600 = \mathbf{12\,662\,580 \text{ náprav/20let}} \quad (2.21)$$

Stanovení deformačních součinitelů pro standardní a nestandardní zatížení:

$$K_{i,léto}, K_{i,jaro} \quad K_{i,léto/jaro} = m \cdot N_{léto/jaro}^n$$

Nestandardní účinek		Nestandardní účinek		Standardní účinek		Standardní účinek	
$K_{SMA,léto}$	114,2395	$K_{SMA,jaro}$	127,8271	$K_{SMA,léto}$	127,8271	$K_{SMA,jaro}$	143,030828
$K_{ACL,léto}$	172,0947	$K_{ACL,jaro}$	193,5498	$K_{ACL,léto}$	193,54975	$K_{ACL,jaro}$	217,679651
$K_{ACP,léto}$	197,1580	$K_{ACP,jaro}$	222,8733	$K_{ACP,léto}$	222,87328	$K_{ACP,jaro}$	251,942657
$K_{MZK,léto}$	81,5996	$K_{MZK,jaro}$	91,3051	$K_{MZK,léto}$	91,30507	$K_{MZK,jaro}$	102,164877
$K_{SD,léto}$	105,0022	$K_{SD,jaro}$	119,3055	$K_{SD,léto}$	119,30552	$K_{SD,jaro}$	135,557245

Tab. 26: Součinitele trvalých deformací vrstev

Vliv podloží: viz kapitola 15.7 Teoretické části

Standardní zatížení

$$K_p = 1,3 + 0,70 \log(0,4 \cdot N_{\text{def}}) = 1,3 + 0,70 \log(16\ 883\ 440) = \mathbf{6,359222657}$$

Trvalá deformace podloží:  $K_p y_p = 6,359222657 \cdot 0,344563 = \mathbf{2,191152836\ mm}$

Nestandardní zatížení

$$K_p = 1,3 + 0,70 \log(0,6 \cdot N_{\text{def}}) = 1,3 + 0,70 \log(25\ 325\ 160) = \mathbf{6,482486538}$$

Trvalá deformace podloží:  $K_p y_p = 6,482486538 \cdot 0,359294 = \mathbf{2,329118518\ mm}$

$y_p$  vypočtená hodnota průhybu na pláni

Trvalá deformace je součtem účinků 40% standardního zatížení a 60% nestandardního zatížení.

$$Y_{trv,NT,STANDARD} = K_p y_p + \sum_{i=1}^{i=n} K_{i,l} (y_{pr,i,l} - y_{pr,i-1,l}) + \sum_{i=1}^{i=n} K_{i,j} (y_{pr,i,j} - y_{pr,i-1,j}) \quad (2.22)$$

$$Y_{trv,NT,NeSTANDARD} = K_p y_p + \sum_{i=1}^{i=n} K_{i,l} (y_{pr,i,l} - y_{pr,i-1,l}) + \sum_{i=1}^{i=n} K_{i,j} (y_{pr,i,j} - y_{pr,i-1,j}) \quad (2.23)$$

Dosažení do vztahů (2.22 a 2.23)

parametry pro nestandardní zatížení:

$y_{pr,i,l} - y_{pr,i-1,l}$ (mm)	$y_{pr,i,j} - y_{pr,i-1,j}$ (mm)	$K_{i,l\acute{e}to} * (y_{pr,i,l} - y_{pr,i-1,l})$ (mm)	$K_{i,j\acute{a}ro} * (y_{pr,i,j} - y_{pr,i-1,j})$ (mm)
$y_{pr,SMA,\acute{e}to}$ 0,000000	$y_{pr,SMA,\acute{a}ro}$ 0,000411	0,000000000	0,052536937
$y_{pr,AQL,\acute{e}to}$ 0,012754	$y_{pr,AQL,\acute{a}ro}$ 0,0070260	2,194895361	1,359880561
$y_{pr,ACP,\acute{e}to}$ 0,017506	$y_{pr,ACP,\acute{a}ro}$ 0,0077870	3,451447162	1,735514233
$y_{pr,MZK,\acute{e}to}$ 0,029393	$y_{pr,MZK,\acute{a}ro}$ 0,0252310	2,398457807	2,303718218
$y_{pr,SD,\acute{e}to}$ 0,038970	$y_{pr,SD,\acute{a}ro}$ 0,0303960	4,091935360	3,626410655

Tab. 27: Trvalé deformace vrstev vozovky - nestandardní zatížení

parametry pro standardní zatížení:

$y_{pr,i,l} - y_{pr,i-1,l}$ (mm)	$y_{pr,i,j} - y_{pr,i-1,j}$ (mm)	$K_{i,l\acute{e}to} * (y_{pr,i,l} - y_{pr,i-1,l})$ (mm)	$K_{i,j\acute{a}ro} * (y_{pr,i,j} - y_{pr,i-1,j})$ (mm)
$y_{pr,SMA,\acute{e}to}$ 0,000000	$y_{pr,SMA,\acute{a}ro}$ 0,000896	0,000000000	0,128155622
$y_{pr,AQL,\acute{e}to}$ 0,0077470	$y_{pr,AQL,\acute{a}ro}$ 0,0050210	1,499429933	1,092969528
$y_{pr,ACP,\acute{e}to}$ 0,0113320	$y_{pr,ACP,\acute{a}ro}$ 0,0051810	2,525600011	1,305314905
$y_{pr,MZK,\acute{e}to}$ 0,0264380	$y_{pr,MZK,\acute{a}ro}$ 0,0229680	2,413923437	2,346522904
$y_{pr,SD,\acute{e}to}$ 0,0337710	$y_{pr,SD,\acute{a}ro}$ 0,0272680	4,029066792	3,696374955

Tab. 28: Trvalé deformace vrstev vozovky - standardní zatížení

$$Y_{trv,NT} = Y_{trv,NT,STANDARD} + Y_{trv,NT,NeSTANDARD} =$$

$$(6,359222657 + 10,468020174 + 8,569337914) +$$

$$(6,482486538 + 12,136735690 + 9,078060604) =$$

$$Y_{trv,NT} = \underline{\underline{44,772425736 \text{ mm}}}$$

Dle TP 3/2009 je kritérium hloubky kolejí na netuhých vozovkách silnic I. třídy stanoveno jako:

$$H_k = 1,40 Y_{trv,NT} \leq 25 \text{ mm}$$

$$H_k = 1,40 \cdot 44,77242576 \leq 25 \text{ mm}$$

**H<sub>k</sub> = 62,68 mm >> 25 mm**

**Vozovka NEVYHOVUJE kritériu TP 3/2009**

Jak je vidět, na vozovce by se vytvořily koleje hlubší než je sama obrusná vrstva ještě před přenásobením bezpečnostním koeficientem. Takový výsledek je čistě akademický a slouží k porovnání výpočtu plynulé dopravy versus zastavující. Poddimenzovaná skladba byla volena záměrně, aby rozdíl byl bezpečně patrný. Pokud by byla navržena „super skladba“ s malými rozdíly deformací, panovala by z autorovi strany obava o správnosti porovnávaných hodnot.

Posouzení skladby č. 2 a 3 na úseku č. 1 a 2 + uvážení zastavující dopravy je uvedeno již jen výsledkově. Grafické vyhodnocení vypočtených deformací po jednotlivých letech je obsahem Přílohy 1 a je diskutováno v kapitole C Závěr.

Trvalá deformace (mm) po přenásobení bezpečnostním koeficientem									
Rok	koc. č. 1 úsek č. 1 60 km/h +	koc. č. 2 úsek č. 1 60 km/h +	koc. č. 2 úsek č. 2 <60 km/h	koc. č. 1 úsek č. 2 <60 km/h	koc. č. 1 úsek č. 2 60 km/h +	koc. č. 2 úsek č. 2 60 km/h +	koc. č. 3 úsek č. 2 60 km/h	koc. č. 3 úsek č. 1 60 km/h	koc. č. 3 úsek č. 2 ≤60 km/h
2030	24,62	18,59	45,54	62,68	29,83	22,39	23,97	19,91	51,36
Vyhovuje kritériu 25mm	ANO	ANO	NE	NE	NE	ANO	ANO	ANO	NE

Tab. 29: Přehled výsledků posuzovaných vozovek

### 3) Posouzení vozovky metodikou dle programu CalMe

Posouzení vozovky proběhlo dle metodiky programu CalMe v aplikaci Microsoft Excel. Samotnému výpočtu předchází výroba laboratorních vzorků pro zkoušky pojíždění kolem. Z těchto zkoušek jsou získána data, která vstupují do výpočtu dle hlavní rovnice celé metodiky, viz níže. Hlavními daty ze zkoušky je počet zatěžovacích cyklů a jim odpovídající tangenciální napětí.

Základní rovnice metodiky dle programu CalMe: (3.1)

$$\gamma_i = \exp \left\{ A + \alpha \left[ 1 - \exp \left( \frac{-\ln(N)}{\gamma} \right) * \left( 1 + \frac{\ln(N)}{\gamma} \right) \right] \right\} * \exp \left( \frac{\beta * \tau}{\tau_{ref}} \right) * \gamma_e^\delta$$

$\gamma_i$	Poměrné přetvoření i-té vrstvy
$A, \alpha, \gamma, \beta, \delta$	Proměnné parametry závislé na výsledcích zkoušek – získány iteračně
$N$	Počet zatěžovacích cyklů
$\tau$	Tangenciální napětí (MPa)
$\tau_{ref}$	Atmosférický tlak (0,10 MPa)
$\gamma_e$	Poměrné smykové přetvoření dle (3.2)

$$\gamma_e = \frac{\tau}{E/(1+\nu)} \quad (3.2)$$

$E$	Modul pružnosti
$\nu$	Poissonovo číslo

Posouzení vozovek proběhlo stejně jako v kapitole věnované výpočtu dle TP 3/2009 pro konstrukce vozovek č. 1 - 3 na úsecích 1 a 2 silnice I/11 Rudná. Dopravní zatížení bylo uvažováno stejné jako v předchozí metodice výpočtu.

V silniční laboratoři fakulty stavební ČVUT byly provedeny laboratorní zkoušky na asfaltových směsích, které jsou použité v ověřovaných konstrukcích vozovek. Z těchto zkoušek byly získány hodnoty poměrných přetvoření a tangenciálních napětí. Pro každou směs byl proveden iterační výpočet rovnice (3.1) pro získání parametrů  $A, \alpha, \gamma, \beta, \delta$  v závislosti na počtu zatěžovacích cyklů.

Přehled koeficientů  $A, \alpha, \gamma, \beta, \delta$  pro jednotlivé směsi je součástí přílohy 2.

V dalším kroku byly vypočteny trvalé deformace pro konkrétní konstrukce vozovek na konkrétních úsecích silnice I/11. Níže bude popsán vzorový výpočet pro konstrukci č. 1 na úseku č. 1 a ostatní kombinace budou již jen výsledkově a graficky součástí přílohy 2 a diskuse výsledků bude provedena v samostatné kapitole části Závěr.

### 3.1) Posouzení konstrukce vozovky č. 1 na úseku č. 1

Z laboratorních zkoušek a počtu zatěžovacích cyklů byly iteračním výpočtem rovnice (3.1) zjištěny parametry  $A, \alpha, \gamma, \beta, \delta$ , viz tabulka 30.

Směs	Teplota (°C)	E	$\nu$	A	$\alpha$	$\gamma$	$\beta$	$\delta$
SMA 11S	27,00	3750,00	0,40	3,00027	2,80021	2,49985	1,00073	0,99627
ACL 16S	27,00	2800,00	0,40	3,15112	2,50070	3,29916	0,83038	0,98641
ACP 16	27,00	1250,00	0,40	3,01624	2,58496	3,29500	1,07594	1,02149
SMA 11S	11,00	6000,00	0,30	3,29865	2,59842	0,80015	0,99960	1,01766
ACL 16S	11,00	4600,00	0,30	3,15137	2,70015	3,29906	0,90071	0,96681
ACP 16	11,00	3050,00	0,33	3,09209	2,70182	3,09509	1,38550	1,08192

Tab. 30: Návrhové parametry

Nyní se provede zpětné dosazení vypočtených parametrů  $A, \alpha, \gamma, \beta, \delta$  do (3.1) pro každou konstrukční vrstvu zvlášť, a dále se dosadí dopravní zatížení jakožto počet zatěžovacích cyklů a tangenciální napětí vypočtené v programu OPMECO ze znalosti modulu pružnosti a Poissonova čísla je dle vztahu (3.2) dopočítáváno poměrné smykové přetvoření  $\gamma_e$ , viz tabulka

31. Z těchto výpočtů dostaneme průběh trvalé deformace pro každou vrstvu zvlášť pro teploty 11 °C a 27 °C - tabulkové a grafické vyjádření viz tab. 32 a grafy 1 - 4.

Směs	Teplota (°C)	$\gamma_e$	$\tau$ (Mpa)
SMA 11S	27,00	6,94E-06	0,01859
ACL 16S	27,00	1,45E-05	0,02897
ACP 16	27,00	3,07E-05	0,02661
SMA 11S	11,00	5,15E-06	0,02375
ACL 16S	11,00	1,08E-05	0,03836
ACP 16	11,00	1,44E-05	0,03295

Tab. 31: Poměrné smykové přetvoření

Trvalá deformace celé vozovky se vypočte:

$$dp_i = Kh_i\gamma_i$$

K Kalibrační konstanta

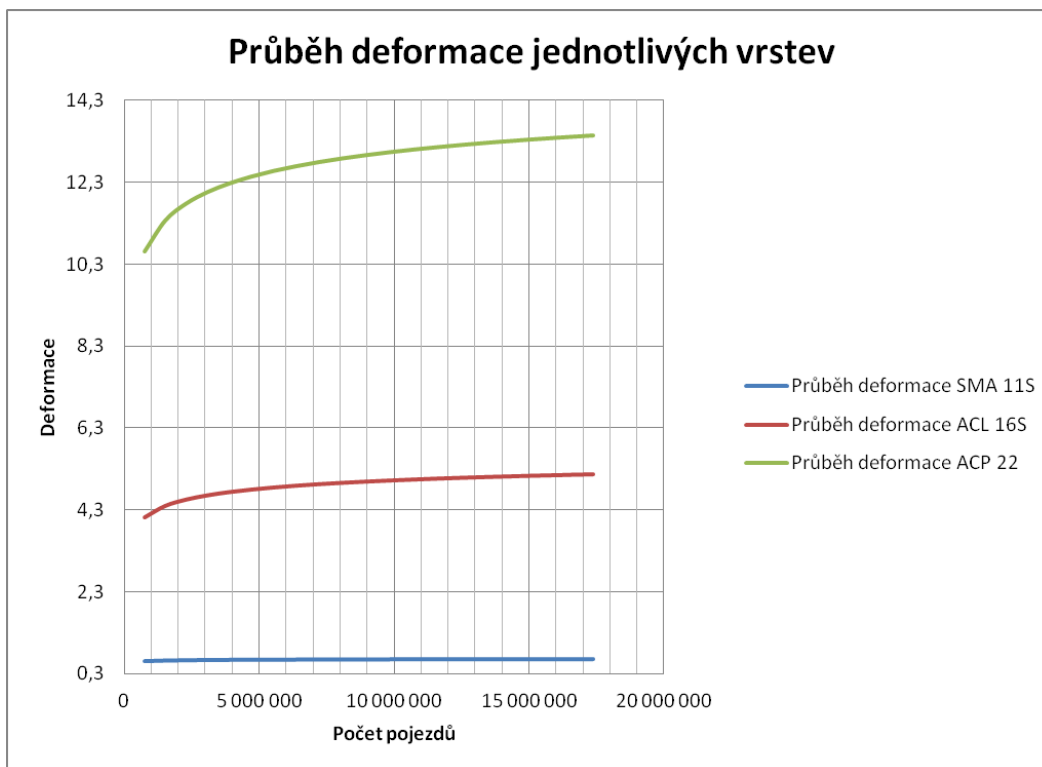
$h_i$  Tloušťka i-té vrstvy

$\gamma_i$  Poměrné přetvoření i-té vrstvy

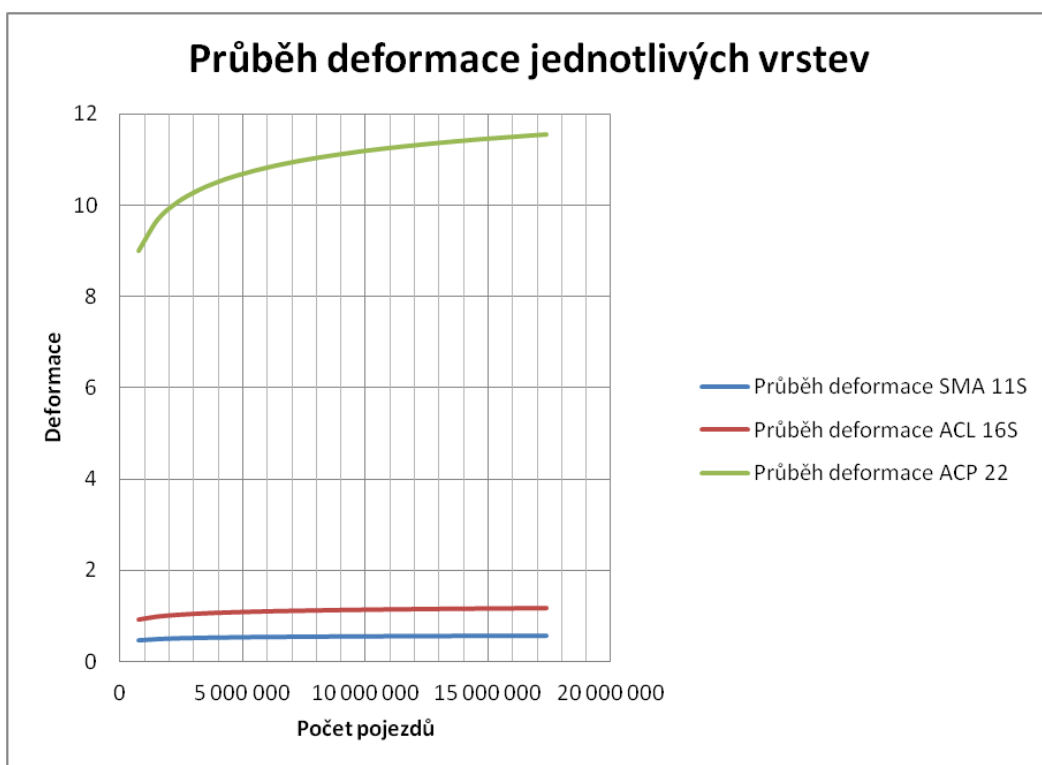
Trvalé deformace se tak vypočítají zvlášť pro období léta (27 °C) a průměrných podmínek (11 °C). Celková trvalá deformace je nakonec vypočtena jako vážený průměr deformací obou období.

Počet pojezdů	27°C	11°C
	Kce č. 1	Kce č. 1
750 440	15,3249	13,2843
1 515 480	16,3865	13,2843
2 292 930	16,9637	13,2843
3 080 600	17,3531	13,2843
3 879 950	17,6447	13,2843
4 695 360	17,8773	13,2843
5 518 800	18,0686	13,2843
6 353 920	18,2310	13,2843
7 200 720	18,3718	13,2843
8 066 500	18,4969	13,2843
8 945 420	18,6086	13,2843
9 828 720	18,7084	13,2843
10 723 700	18,7993	13,2843
11 630 360	18,8827	13,2843
12 559 650	18,9604	13,2843
13 490 400	19,0317	13,2843
14 445 240	19,0990	13,2843
15 124 140	19,1437	13,2843
16 366 600	19,2196	13,2843
17 359 400	19,2755	13,2843
Deformace (mm)	15,2814	

Tab. 32: Celková trvalá deformace

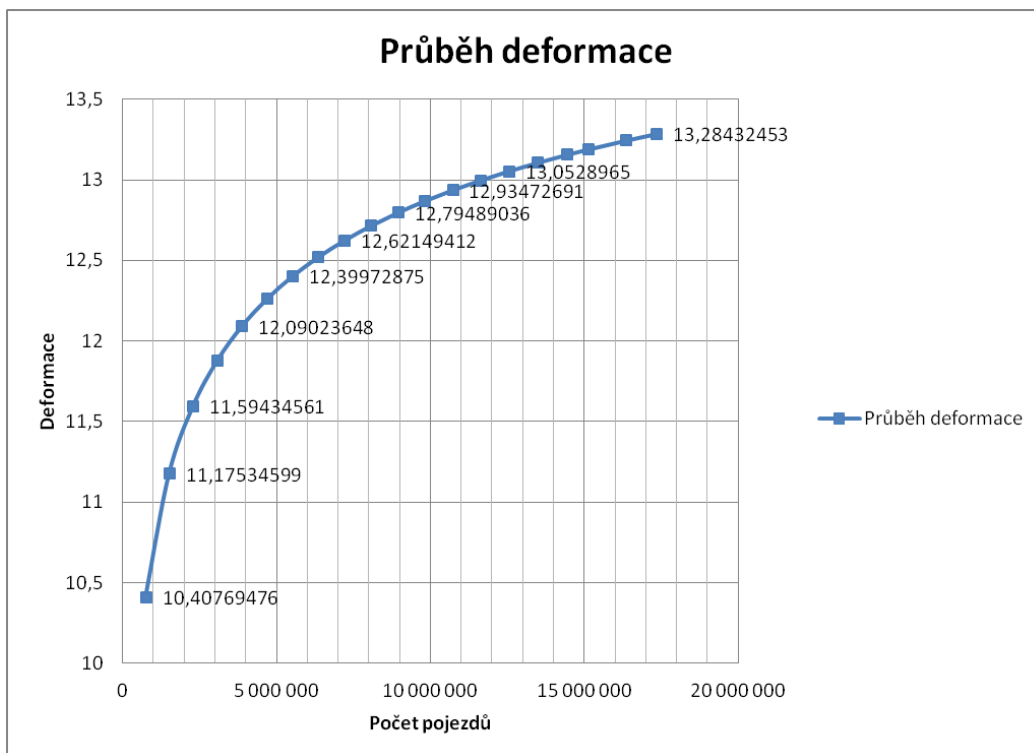


Graf 1: Průběh deformace jednotlivých vrstev konstrukce č. 1 27°C [mm]

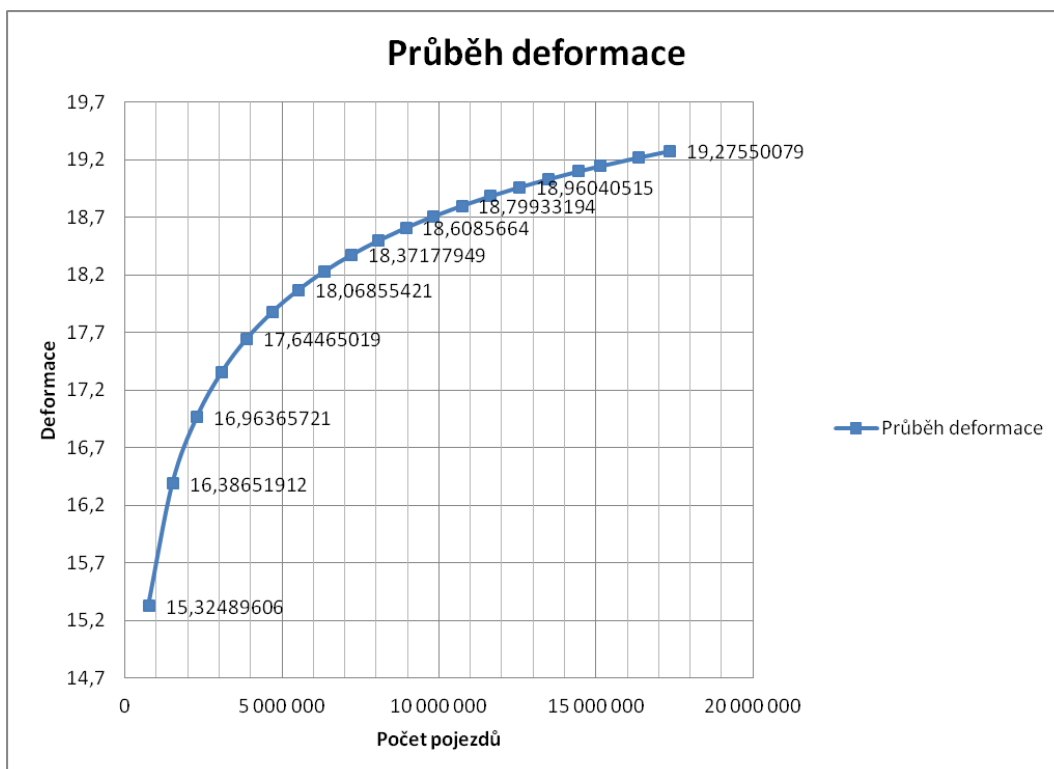


Graf 2: Průběh deformace jednotlivých vrstev konstrukce č.1 11°C [mm]





Graf 3: Průběh deformace konstrukce č. 1 27°C [mm]



Graf 4: Průběh deformace konstrukce č. 1 11°C [mm]

Hloubka vyjeté koleje by dle této metodiky byla 15,2814 mm. Kdybychom provedli předpoklad, že hodnotu přenásobíme bezpečnostním koeficientem 1,4 jako dle TP 3/2009, byla by výsledná hloubka koleje 21,3940 mm a pro kritérium TP 3/2009 by vyhověla.

Souhrn výsledků posouzení konstrukcí dle metodiky CalMe viz níže:

Celková trvalá deformace:

Lokalita 1			Lokalita 2		
Kce č. 1	Kce č. 2	Kce č. 3	Kce č. 1	Kce č. 2	Kce č. 3
15,2814	12,6208	13,5197	19,3455	14,3571	16,5683

Tab. 33: Vypočtené hodnoty hloubky kolejí v milimetrech

Nyní provedeme teoretické porovnání kritéria TP 3/2009 pro hloubku koleje. Hodnoty jsou přenášobeny bezpečnostním součinitelem 1,40 a kritérium pro vyhovující technický stav vozovky je max. hloubka koleje  $\leq 25$  mm.

Lokalita 1			Lokalita 2		
Kce č. 1	Kce č. 2	Kce č. 3	Kce č. 1	Kce č. 2	Kce č. 3
21,3939	17,6691	18,9275	27,0837	20,1000	23,1956
ANO	ANO	ANO	NE	ANO	ANO

Tab. 34: Vypočtené hodnoty hloubky kolejí v milimetrech - porovnání kritéria

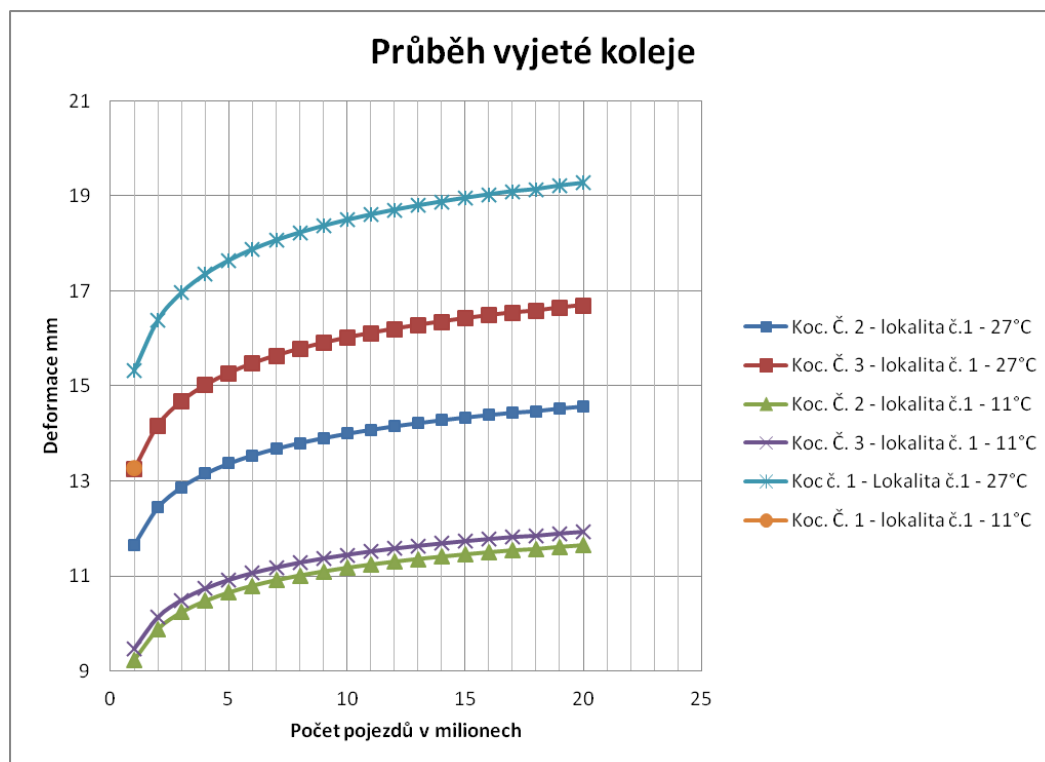
Pokud by byl tedy výpočet porovnán s kritériem metodiky TP 3/2009, kromě konstrukce č. 1 na úseku č. 2, by konstrukce vyhověly.

Přehled vypočtených deformací (mm) dle metodiky CalMe							
Letní období 27°C				Průměrné období 11°C			
Lokalita 1				Lokalita 1			
Počet pojezdů	Kce č. 1	Kce č. 2	Kce č. 3	Počet pojezdů	Kce č. 1	Kce č. 2	Kce č. 3
750 440	15,3249	11,6577	13,2446	750 440	10,4077	9,2348	9,4638
1 515 480	16,3865	12,4432	14,1703	1 515 480	11,1753	9,8849	10,1297
2 292 930	16,9637	12,8694	14,6743	2 292 930	11,5943	10,2378	10,4909
3 080 600	17,3531	13,1567	15,0147	3 080 600	11,8778	10,4756	10,7343
3 879 950	17,6447	13,3715	15,2697	3 879 950	12,0902	10,6535	10,9162
4 695 360	17,8773	13,5429	15,4733	4 695 360	12,2600	10,7954	11,0613
5 518 800	18,0686	13,6837	15,6408	5 518 800	12,3997	10,9120	11,1804
6 353 920	18,2310	13,8032	15,7830	6 353 920	12,5185	11,0109	11,2815
7 200 720	18,3718	13,9068	15,9064	7 200 720	12,6215	11,0966	11,3692
8 066 500	18,4969	13,9988	16,0160	8 066 500	12,7131	11,1727	11,4469
8 945 420	18,6086	14,0809	16,1139	8 945 420	12,7949	11,2407	11,5163
9 828 720	18,7084	14,1543	16,2015	9 828 720	12,8681	11,3014	11,5784
10 723 700	18,7993	14,2211	16,2812	10 723 700	12,9347	11,3566	11,6348
11 630 360	18,8827	14,2823	16,3543	11 630 360	12,9958	11,4073	11,6865
12 559 650	18,9604	14,3395	16,4225	12 559 650	13,0529	11,4545	11,7347
13 490 400	19,0317	14,3918	16,4851	13 490 400	13,1052	11,4978	11,7789
14 445 240	19,0990	14,4412	16,5441	14 445 240	13,1546	11,5386	11,8206
15 124 140	19,1437	14,4741	16,5834	15 124 140	13,1875	11,5658	11,8483
16 366 600	19,2196	14,5298	16,6500	16 366 600	13,2433	11,6119	11,8954
17 359 400	19,2755	14,5708	16,6991	17 359 400	13,2843	11,6458	11,9300

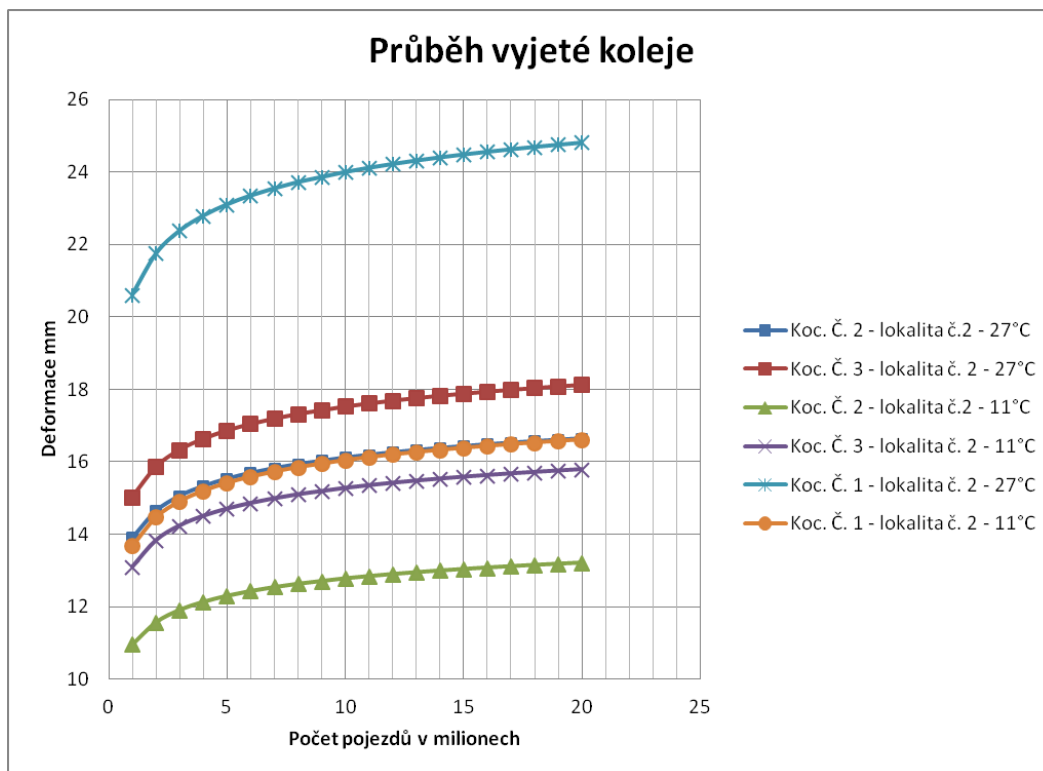
Tab. 35: Přehled vypočtených deformací - úsek č. 1

Přehled vypočtených deformací (mm) dle metodiky CalMe							
Letní období 27°C				Průměrné období 11°C			
Lokalita 2				Lokalita 2			
Počet pojezdů	Koc. č. 1	Koc. č. 2	Koc. č. 3	Počet pojezdů	Koc. č. 1	Koc. č. 2	Koc. č. 3
1 827 920	20,6171	13,9035	15,0285	1 827 920	13,6775	10,9608	13,1042
3 655 840	21,7540	14,6486	15,8660	3 655 840	14,4699	11,5727	13,8346
5 575 740	22,3854	15,0618	16,3317	5 575 740	14,9106	11,9119	14,2391
7 489 800	22,8001	15,3328	16,6379	7 489 800	15,2003	12,1344	14,5044
9 438 900	23,1100	15,5352	16,8668	9 438 900	15,4168	12,3005	14,7023
11 414 280	23,3548	15,6951	17,0478	11 414 280	15,5880	12,4316	14,8586
13 418 860	23,5565	15,8267	17,1970	13 418 860	15,7290	12,5396	14,9872
15 458 480	23,7279	15,9385	17,3237	15 458 480	15,8489	12,6312	15,0964
17 390 790	23,8670	16,0293	17,4267	17 390 790	15,9462	12,7056	15,1849
19 615 100	24,0059	16,1198	17,5295	19 615 100	16,0433	12,7798	15,2733
21 737 210	24,1219	16,1954	17,6153	21 737 210	16,1245	12,8418	15,3471
23 897 280	24,2268	16,2638	17,6930	23 897 280	16,1978	12,8978	15,4137
26 078 520	24,3217	16,3256	17,7633	26 078 520	16,2643	12,9484	15,4740
28 299 180	24,4091	16,3825	17,8280	28 299 180	16,3254	12,9950	15,5295
30 539 550	24,4892	16,4347	17,8874	30 539 550	16,3815	13,0378	15,5804
32 809 120	24,5635	16,4831	17,9425	32 809 120	16,4335	13,0774	15,6275
35 120 300	24,6330	16,5284	17,9940	35 120 300	16,4821	13,1145	15,6716
37 449 000	24,6977	16,5705	18,0420	37 449 000	16,5274	13,1489	15,7126
39 806 900	24,7584	16,6100	18,0870	39 806 900	16,5699	13,1813	15,7511
42 208 600	24,8160	16,6475	18,1297	42 208 600	16,6102	13,2120	15,7876

Tab. 36: Přehled vypočtených deformací - úsek č.2



Graf 5: Průběh deformace konstrukcí - úsek 1



Graf 6: Průběh deformační konstrukcí - úsek 2

## C Závěr

### 1) Zhodnocení návrhových metod a diskuse výsledků

#### 1.1) Česká republika

Metoda zkoušky poježdění kolem, vycházející z normy popsané v teoretické části, je jediným předpisem v České republice věnující se problematice trvalých deformací a vychází z ní parametry porovnáváné v tabulkách NA E.5.1-3. v ČSN EN 13108-1 a obdobně pro další směsi patřící do hutněných asfaltových vrstev.

Zkušební metoda simuluje zatížení vozovky, ale bohužel neumí zohlednit dopravu velmi pomalou až statickou, zejména těžkou. Myšleno autobusové zastávky, ramena křižovatek, nakládací rampy, vrátnice nebo stojánky. Metoda pochopitelně nemůže zohlednit veškeré negativní vlivy působící na vozovku. Jediné nepříznivé vnější zatížení je kromě tlaku na kolo výše teploty.

Velkou nevýhodou je ale fakt, že umíme ověřit, jak nám budou reagovat jednotlivé vrstvy na dané zatížení a jaká bude přibližně odezva na základě zkoušky, ale neumíme ověřit celé stmelené souvrství vyjma extra velkých zařízení. Tedy norma a metoda je vhodná pro ověření chování nově navržené směsi, nikoliv celé vozovky.

Možným řešením by byla kombinace se zkouškami v triaxiálním přístroji nebo jiných, či vyvinutí metodiky pro výpočet na základě metody konečných prvků a sestavit uživatelsky

příjemný software pro ověření odezvy vozovky nebo podobný systém výpočtu jako používají kolegové na Slovensku, prakticky ruční výpočet vhodný pro běžného projektanta.

Současný stav v praxi vypadá dle mého názoru následovně: tam, kde je rychlá doprava není co řešit a tam, kde je pomalá nebo zastavující doprava, tam necht' se dá (v lepším případě) konstrukce souvrství předdimenzovaná (tedy nehospodárná), použije se geosintetikum nebo se správně zvolí konstrukce vozovky jako polotuhá nebo tuhá.

Někdy to ale dopadne tak, že už v projekční fázi se tato problematika nezohlední, vzniknou poruchy vozovky, které omezují a ohrožují bezpečnost provozu na pozemní komunikaci a následně je správce komunikace vystaven problému co s tím. Na jednotlivých cestmistrovstvích většinou nikoho nenapadne nic lepšího než vozovku odfrézovat a položit zpět novou vrstvu a nejspíše čekat, že se poruchy do pár let opět dostaví. Neštěstí je, pokud někoho napadne vyjeté koleje vyplnit asfaltovým betonem bez dalších úprav, tak jak se stalo před cca deseti lety na jižní spojnici mezi Kačerovem a Spořilovem.

## 1.2) Slovenská republika

TP 3/2009

Byly posouzeny tři konstrukce vozovky výše uvedené skladby pro dvě lokality na silnici I/11 Ostrava Rudná. Výpočet byl proveden v souladu s TP 3/2009 a předpokladem výpočtu bylo, že konstrukce č. 1 a 2 na úseku 1 vyhoví a konstrukce č. 3 ověří vhodnost použití směsi VMT. Pro lokalitu č. 2 a uvážení zastavující dopravy nebyl předpoklad vyřčen.

Jak ukázal výpočet, konstrukce č. 1 a 2 na úseku č. 1 Prodloužená Rudná skutečně vyhověly kritériu uvedenému v TP 3/2009.

Na úseku č. 2 vyhověla konstrukce č. 2 a 3 a to díky tomu, že místo ACP byla použita směs s vysokým modulem tuhosti ve smyslu TP 151. Pro úsek č. 2 s uvážením pomalé až zastavující dopravy nevyhověla ani jedna skladba.

Oproti očekávání se ukázalo, že konstrukce č. 3 tvořená asfaltovými betony bez modifikovaného pojiva a v tenčí skladbě než konstrukce č. 1 vyhověla na úsecích č. 1 i 2 a při uvážení zastavující dopravy na úseku č. 2 sice nevyhověla, ale vykazovala na konci životnosti o 18% menší deformace než konstrukce č. 1. Jednoznačně se tedy potvrdilo při srovnání konstrukce č. 1 a 3, že použití VMT dle TP 151 je vhodným krokem ke snížení trvalých deformací. I když se na vozovky ve správě ŘSD nemá používat pojivo gradace 50/70 bez modifikace (už jen z důvodu použití max. do TDZ III pro obrusnou vrstvu ČSN EN 13108-1) na komunikacích nižších tříd ho lze úspěšně použít a v kombinaci s VMT (popř. 2xACP 22S) může tvořit vozovku s dobrými parametry odolnosti proti tvorbě trvalých deformací.

Zohlednění pomalé až zastavující dopravy představuje uvážení 60 % takto nepříznivého dopravního zatížení a navíc do výpočtu vstupují hodnoty modulu pružnosti a Poissonova čísla stanovené při zatěžovací zkoušce pro čas zatížení 60 s. Tím dochází k poklesu modulu pružnosti o cca 30% a zvětšení pPoissonova čísla o zhruba 15 %. To jen dokládá fakt, který byl komentován v Teoretické části, že s dlouho trvajícím zatížením se asfaltová hutněná směs stává náchylnou k tvorbě trvalých deformací, tzv. měkne. Tato skutečnost byla tedy dokázána nejen teoreticky, ale i početně.

Deformace byly vypočteny pro každý rok v průběhu návrhového období vozovky, aby bylo možno sestavit deformační křivku konstrukce. Z těchto výpočtů byl sestaven graf 1 obsahující

skutečně vypočtené deformace a graf 2 s přenásobenými hodnotami deformací bezpečnostním koeficientem 1,40. Průběh deformačních křivek je pochopitelně totožný, v grafu s návrhovými hodnotami (přenásobenými) je vynesena přímka znázorňující mez hloubky deformace 25,0 mm. Veškeré deformační křivky pod touto mezí splňují podmínku a jím příslušné konstrukce z hlediska odolnosti proti trvalým deformacím vyhovují.

Jak je možno si z grafického zpracování všimnout, průběh křivek je rostoucí v prvních cca šesti letech s mocninným nárůstem. I to je v souladu s teorií výpočtu dle TP 3/2009, kde hlavní parametr trvalé deformace je mocninná funkce.

Do výpočtu vstupovalo i dopravní zatížení, které meziročně vzrůstá, a to lineárně. Pokud by bylo dopravní zatížení konstantní, dalo by se předpokládat, že dojde k ustálení deformací mnohem dříve. To by však bylo v rozporu s faktem, že dopravní zatížení skutečně narůstá s každým rokem a s každým otevřením kapacitní komunikace na sebe tato váže množství dopravy, které bylo dříve rozmělněno do více silnic nižší třídy v daném kraji. V neposlední řadě je ve výpočtu obsažen i koeficient C3, který zohledňuje vytíženost nákladních vozidel. Do výpočtu byla uvažována 70 % vytíženost. Je pravda, že v dnešní době některé společnosti nákladní vozy spíše přetěžují, ale musíme zohlednit i fakt, že určité typy vozů jedou alespoň jednu cestu prázdné (zejména vozy na odpad, cisterny). Např. autobusy vozí pasažéry, nikoliv hmotná břemena. Uvažovat 100 % vytížení by bylo konzervativní.

Trvalé deformace, jak je vidno, se limitně blíží ustálené hodnotě, kdy v obecném čase bude přírůstek minimální. Výpočty však ukazují, že k tomu nedojde (pro dané skladby vozovky) v návrhovém období. I proto je žádoucí se hlediskem trvalých deformací zabývat.

Z grafického zpracování výpočtů je patrné, že konstrukce vozovky č. 1, 2 a 3 na úseku č. 2 s uvážením zastavující pomalé dopravy nevyhovují už v prvním roce od realizace. To dokládá, že zvolené skladby nejsou pro tak vysoké dopravní zatížení vhodné (dle metodiky výpočtu).

Nabízí se otázka, zda konstrukce vozovky nevyhoví už např. po dvou měsících užívání. Výpočet tak krátkého období byl autorem zamítnut a to z důvodu, že během dvou měsíců není reálné, aby nastaly průměrné hodnoty podnebí (návrhové teploty) a profilem projelo návrhové zatížení počítané z ročního průměru.

Proto lze doporučit, že příliš krátké termíny od realizace stavby nejsou vhodné pro uvažování do výpočtu. Meziroční hodnoty byly spočteny jen z důvodu sestavení „hladké“ deformační křivky vozovky. Pokud by bylo nutno počítat vznik deformací pro kratší intervaly, bylo by potřeba vyvinout vhodnější aproximační model.

Doporučuji, aby byly hodnoty trvalých deformací počítány nejprve po dvou až třech letech a následně každý další druhý rok a na konci návrhového období. Správce komunikace tak může mít přehled po kolika letech již vozovka nebude z hlediska trvalých deformací vyhovovat. Pokud by tyto hodnoty byly zaneseny do systému hospodaření s vozovkou a výpočet by byl kalibrován na aktualizované sčítání dopravy, může být včasné plánovaná celková oprava komunikací spojená nejen s problémem trvalých deformací.

#### Zhodnocení metody:

Z předchozích odstavců je jasně patrné, že slovenští kolegové mají k dispozici TP 03/2009, které vychází z podobných teoretických předpokladů jako naše TP 170, resp. TP 170 + dodatek č. 1. Uvedený předpis obsahuje teorii k posouzení vozovky tuhé i netuhé a posouzení podloží vč. ochrany proti promrzání. Dále je zde jedna kapitola věnována problematice zvýšení únosnosti podloží.

Největší výhodou těchto TP je postup ke stanovení trvalých deformací nejen netuhé vozovky, ale i vozovky polotuhé. Projektant působící na Slovensku má tedy v ruce v podstatě „kuchařku“ na výpočet trvalých deformací, do které stačí „jen“ dosadit vstupy a porovnat s kritérii.

Velkým přínosem pro běžnou praxi je fakt, že výpočet je poměrně jednoduchý. Jistě jeho teorie vychází z mnoha zjednodušení, která by nebyla např. při výpočtu MKP možná zanedbat, ale jeho logika je jasná. Jedná se v podstatě o stanovení nejprve pružných deformací podloží a jednotlivých vrstev, tedy hodnoty, které lze vypočítat v běžně dostupném software jako je např. Laymed nebo OPMECO.

Pružné deformace jsou pak přenásobeny parametry  $K_p, K_i$ , což jsou součinitele vyjadřující poměr pružné a trvalé deformace zeminy v podloží a materiálů vrstev vozovky (v závislosti na opakování zatížení).

Tyto parametry obsažené v tabulce jsou s největší pravděpodobností zjištěny experimentálně, pravděpodobně ze statické zatěžovací zkoušky a zkoušky pojíždění kolem. Stanovení těchto deformačních parametrů by bylo pravděpodobně na samostatnou diplomovou práci.

Dalším velkým přínosem je, podle mého názoru, možnost modifikace výpočtu na konkrétní situaci. Např. je možné zjednodušeně zohlednit, zda výpočet posuzuje vozovku na dálnici, ve stoupacím pruhu nebo větvi MÚK nebo intravilánové světelně řízené křižovatce.

Tím je myšleno, že dálniční vozovka by byla dimenzována na standardní pojezd návrhovými nápravami při rychlostech větších než 60 km/h v celé ploše, ač se uvažuje s pojezdem těžkých náprav v pravém pruhu, ale přece jen s větší rychlostí. Jiná situace by byla na rampách MÚK nebo stoupacích pruzích, kde jsou těžká vozidla usměrněná do jedné jízdní stopy, tedy jich tudy projede za běžné situace 100 % a jako poslední modifikací výpočtu je možné zohlednit vozovku na světelně řízené křižovatce, kde dochází ke stání vozidel v závislosti na délce cyklu.

Tento výpočet je možné modifikovat (viz výše) pro výpočet takových případů. Navíc je to i prakticky proveditelné, neboť konstrukce vozovky se na větvích křižovatek a samotných úrovnových křižovatkách běžně dělá jiná než na hlavní trase. V profilu dálnice sice není úplně nejvhodnější mít pravý a levý pruh pásu z jiné konstrukce, ale lze celou šíři jízdního pásu navrhnout na odolnost proti trvalým deformacím.

Jinou specifickou oblastí je návrh parkovišť, resp. ploch pro odstavování vozidel na delší dobu. Na křižovatkách lze do výpočtu dosadit hodnoty modulu pružnosti a Poissonova čísla stanovené pro dobu zatížení 60 s, což je dostatečné např. pro světelné křižovatky, kde v průměru doba stání nápravy na jednom místě je kolem 30 s - 80 s dle délky cyklu. Na parkovištích, odstavných plochách odpočívek, a nebo rampách průmyslových a skladových objektů už dochází ke stání nápravy delší dobu, než řídka v řádu minut až hodin. Jedná se tedy o zatížení statické. Pro takové konstrukce tedy není pravděpodobně tato metoda vhodná.

Jako nevýhoda metody posouzení odolnosti proti trvalým deformacím dle TP 03/2009 může být zjednodušenost nebo teoreticky hodnoty deformačních součinitelů, které by nemusely věrně vystihovat plastické chování materiálu. Další nevýhodou je, že tato metoda neumí zohlednit vznik příčné trvalé deformace, tzv. rolety.

Z hlediska konkrétního posouzení vybraných vozovek na silnici I/11 Ostrava Rudná se ukázalo, že průběhy deformací jsou pro dané posuzované skladby totožné. Je to dáno jednak podobností skladeb vozovky a jednak tím, že hlavní parametr výpočtu je funkce trvalé deformace, což je funkce obecně rostoucí a její sklon udávají materiálové konstanty  $m$  a  $n$  a dále růst dopravního zatížení.

Z hlediska možného uplatnění slovenské metody v České republice bych navrhoval zařadit do výpočtu dopravního zatížení i kloubové autobusy, neboť v dnešní době zejména v oblasti velkých měst a spádových oblastí VHD a MHD je již hojně kloubových autobusů užíváno a tak tvoří zejména na intravilánových vozovkách nezanedbatelný počet. Hledisko podnebí není velký problém, návrhové teploty by byly stejné jako pro dimenzování vozovek v TP 170 tedy 15 °C a 30 °C a jim odpovídající materiálové parametry.

Závěrem části věnované metodice dle TP 3/2009 bych rád navrhl tuto metodiku zanést do českých podkladů pro navrhování vozovek. Jako řešení se nabízí při nejbližší revizi nebo aktualizaci českých podkladů zahrnout tento výpočetní postup do samostatné kapitoly. Takovému kroku pochopitelně musí předcházet výzkum, revize a odborné debaty, které by mohly do problematiky přinést další poznatky a zkušenosti projektantů, technologů a samotných správců pozemních komunikací. Po zapracování výše popsaných návrhů a odborném přezkoumání a projednání doporučuji, aby tato metoda byla přijata v České republice jako nástroj pro další kritérium posuzování vozovek.

### 1.3) Metodika CalME

Posouzení výše popsaných vozovek na dané dopravní zatížení proběhlo rovněž dle Kalifornské metodiky zakotvené v programu CalMe, i když byl výpočet z důvodu absence programu sestaven v aplikaci Microsoft Excel. Jako základní vstupy do výpočtu jsou výše popsané parametry vypočtené z údajů naměřených tangenciálních napětí a poměrných přetvoření a hodnoty modulů pružnosti a Poissonova čísla pro dané teploty. Získání těchto dat je pro projektanta, popřípadě správce komunikace sice o dost složitější než použití tabulkových hodnot v TP 3/2009, není však nereálné.

Nutnost provedení laboratorních zkoušek předcházejících výpočtu je velkým pokrokem v kvalitním návrhu konstrukcí, i když může být při aplikaci stejných konstrukcí na podobných lokalitách (podnebí, dopravní zatížení) poněkud zdlouhavá. Ovšem provedení laboratorních zkoušek před výpočtem, např. geotechnických konstrukcí, je absolutní standard, nad kterým se dnes již nikdo ani nepozastaví. Nebylo by tedy divné, pokud by taková příprava předcházela i každému návrhu konstrukce vozovky, např. ve stupni PDPS nebo RDS pro třídu dopravního zatížení I - III.

Konkrétní vypočtené hodnoty trvalých deformací jsou součástí tab. 35 a 36 v Praktické části. V tab. 33 a 34 pak jsou celkové deformace porovnány v kontextu kritéria mezní hloubky 25 mm dle TP 3/2009. Obecně hodnoty trvalých deformací vycházejí menší než dle metodiky TP 3/2009 a to okolo cca 5 %. Poměrně vysoká shoda je dána hned několika faktory. Za prvé pro oba výpočty jsou shodné okrajové podmínky (návrhové parametry materiálu E,  $\nu$ , dopravní zatížení) a také teplota při výpočtu. Samotný program CalMe sice umí pracovat s průměrnou roční a denní teplotou ovzduší a povrchu vozovky v závislosti na zvolené klimatické oblasti (hory, nížina, poušť atd.), ale pro ruční výpočet to není optimální. Do ručního výpočtu taktéž nebylo uvažováno s hodnotou IRI nebo s faktorem stárnutí asfaltového pojiva. Důvod, proč je hodnota deformace dle Kalifornské metody nižší je také fakt, že ve výpočtu nebylo uvažováno s podložími a nestmelenými konstrukčními vrstvami. Tento důvod je prostý. Nebyly laboratorně zkoumány odezvy na trvalé deformace pro tyto materiály, a tak vypočtené hodnoty odpovídají pouze třem stmeleným vrstvám.



Jak se při výpočtu ukázalo (viz grafické vyhodnocení - Příloha 2), průběhy deformací vozovek jsou podobné jako pro metodiku dle TP 3/2009. Pochopitelně může klamat zvolené měřítko vykreslení grafu.

Dále výpočet ukázal, že trvalé deformace vznikají i v chladném období. Obecně jsou menší než deformace vzniklé v létě. Není však pravda, že by nevznikaly vůbec nebo se výrazně zpomalily. Je to dáno především hlavními zákony stavební mechaniky. V chladném období je asfaltová hutněná směs chladná a má tudíž výrazně vyšší modul pružnosti a nižší hodnotu Poissonova čísla. Čím je materiál více tuhý, tím vyšší se v něm koncentruje napětí. I to potvrzuje základní teorii chování netuhých vozovek, kdy asfaltová hutněná směs hromadí napětí "unikne" díky vzniku deformace. To jen potvrzuje základní rozdíl mezi vozovkami tuhými a netuhými.

Výpočet dále ukázal (viz grafické vyhodnocení Přílohy 2), že nejvíce náchylná na trvalé deformace je ložná, popřípadě podkladní vrstva (není-li užito VMT). Trvalá deformace je pochopitelně viditelná na povrchu, tedy na obrusné vrstvě. Je však nutné vždy provést řádný diagnostický průzkum a ne jen odfrézovat obrusnou či ložnou vrstvu, když problém může způsobovat až vrstva podkladní. I toto tvrzení, které potvrdil výpočet, je správně komentováno v TP 87, stejně tak i fakt, že cca 80 % deformací se projeví do cca osmi let od uvedení do provozu (viz Teoretická část). Je tedy vždy nutno v případě rekonstrukce zajistit řádný diagnostický průzkum ve smyslu TP 87 [15], tedy provést vývrt ve stopě vozidel i mimo a nechat stanovit zbytkovou životnost konstrukce. V případě novostaveb je taktéž nutné do ložných a podkladních stmelených vrstev vybírat materiály odolné proti trvalým deformacím, ale i odolné proti vzniku únavových trhlin. Velmi vhodným materiálem se opět ukázala být směs VMT ve smyslu TP 151.

Pokud by byl použit program CalMe v celé verzi s jasně nadefinovaným podnebím, dopravním zatížením a parametry jednotlivých vrstev (vč. podloží a nestmelených vrstev), bylo by nejspíš dosaženo o něco vyšší trvalé deformace. Je ale také dost možné, že pro horské oblasti by deformace naopak mohly vycházet podstatně menší, protože je zde jiné podnebí a uvážení návrhové teploty 27 °C může být značně konzervativní. Je tedy velkým přínosem programu, že je teoreticky schopen pomocí databáze zohlednit hodnoty teplot charakterizujících dané podnebí. Z logiky věci musí být jiné deformace pro teplotní oblast hor a pouště nebo pro aplikaci v České republice - hory a např. nížiny.

Původním záměrem bylo také vypočítat trvalé deformace pro období 0 - 5 let od uvedení vozovky do provozu po jednotlivých měsících. Byl by tak patrný nárůst trvalých deformací v čase v závislosti na klimatickém období. Jako vstup do výpočtu by bylo potřeba mít data teplot naměřených na povrchu vozovek, ale tato data se nepodařilo do konce zpracování diplomové práce obstarat.

Jak již bylo řečeno, nepodařilo se pro potřeby diplomové práce obstarat funkční licenci programu CalMe, a tak nemohl být ověřen po všech stránkách návrhu a posouzení trvalé deformace vozovek, protože přestal po změně celé řady parametrů fungovat a před dokončením diplomové práce se nepodařilo zprovoznit novou funkční licenci programu CalMe.

Není tedy objektivně možné prohlásit, že by měl být používán v České republice bez dalších ověření a kalibrací na naše podmínky. Velkým rozdílem oproti Spojeným státům je návrhová náprava, resp. počet náprav, i když v databázi CalMe je možno nápravy měnit a posuzovat tak např. letištní plochy nebo nestandardní objekty (přístupové komunikace do kamenolomu atp.). Dalším rozdílem je výše komentované podnebí, kde by bylo potřeba vytvořit databázi alespoň

na úrovni krajů. V neposlední řadě pak parametry asfaltových hutněných směsí používaných dle našich norem.

Po provedení výše popsaných kalibrací a vytvoření vstupní databáze s návrhovými hodnotami pro Českou republiku, by byl tento program zajímavým nástrojem k posuzování konstrukcí vozovek jak v projekční přípravě, tak i v průběhu životnosti. Tím, že program je schopen posuzovat rekonstruovanou vozovku, je možno reagovat na zvýšení dopravního zatížení nebo změnu technického stavu konstrukce a navrhnout optimální metodu rekonstrukce závislou na diagnostickém průzkumu a laboratorních zkouškách odebraných a navrhovaných směsí.

Pokud by tedy byl výše popsaný program CalMe kalibrován na české podmínky projektování dle našich norem a obsahoval bohatou databázi vstupních údajů, byl by jistě velkým přínosem pro kvalitní a ekonomický návrh a posouzení vozovek vystavených vysokému dopravnímu zatížení.

## 2) Závěr

V předkládané diplomové práci zaměřené na vznik trvalých deformací netuhých vozovek byl na úvod představen vědní obor, který se zabývá zkoumáním viskoelastických látek - reologie. Byly představeny modely pro aproximaci daného materiálového spektra a odvození funkce pro nejdůležitější odezvy viskoelastických látek. Dále byly prezentovány metody a přístroje pro moderní vyšetřování odezvy takových látek, zejména asfaltových pojiv a směsí.

Práce navazuje na obecné popisy návrhových přístupů v České republice, Slovenské republice a v USA. Následují výpočty dle slovenské metodiky TP 3/2009 a americké metodiky dle programu CalMe. Pro výpočty byly vybrány dvě lokality na silnici I/11 Ostrava Rudná (viz Praktická část) a tři konstrukce vozovky kombinující materiály běžně používané na vozovkách ve správě Ředitelství silnic a dálnic ČR. Podrobně jsou výsledky diskutovány v jednotlivých kapitolách Praktické části a grafické vyhodnocení je součástí Příloh 1 a 2.

V obecné míře shrnutí diplomové práce výpočty potvrdily to, co bylo několikrát popsáno v předchozích kapitolách. V zásadě se potvrdilo, že vznik a rozvoj trvalých deformací je problematika, která se týká všech netuhých a polotuhých konstrukcí vozovek. Rozdílná odezva je však závislá nejen na dopravním zatížení, ale hlavně na rychlosti pojezdu. Právě fakt, že těžké nákladní vozy jedou pomalu v jedné stopě nebo dokonce zastavují, způsobuje největší problémy s trvanlivostí vozovek.

Je nutno si uvědomit, že problematika spojená s trvalými deformacemi má velký vliv na ekonomickou životnost vozovky a hlavně na bezpečnost pro uživatele.

Z pohledu ekonomie je pochopitelně nejlevnější kvalitní návrh a provedení konstrukce vozovky od aktivní zóny po obrusnou vrstvu. Pro novostavby je situace jednodušší, je možno celou konstrukci zemního tělesa a konstrukčních vrstev navrhnout v souladu s předpisy a případně posoudit početně i na odolnost proti trvalým deformacím. To ovšem není tak jednoduché pro rekonstrukce silnic I. tříd a nižších.

Na nižších třídách s vozovkou dimenzovanou na menší dopravní zatížení může být převedena těžká doprava v rámci dopravně inženýrských opatření, a nebo některé přepravní společnosti používají tyto silnice jako objízdné trasy k vyhnutí se placeným úsekům. Poté dochází k obecnému přetížení a poškození vozovky a tvorbě trvalých deformací.

Na mnohých krajských SÚS chybí ročně mnoho finančních prostředků na údržbu vozovek, které tvoří převážnou část silniční infrastruktury. Správce komunikace je tak často vystavován

otázce zda provést vysprávku, celkovou opravu nebo investovat peníze do urgentnějšího problému.

Pokud se provedou pouze lokální vysprávky bez řádného diagnostického průzkumu, zpravidla se vysprávka mívá účinku a naopak může být nebezpečnější než původní stav. Oprava stmelené části konstrukce je jistě správný krok, ovšem bez geotechnického průzkumu a neúnosné pláň vozovky se může stát, že problémem nemusí být stmelené souvrství, ale podloží. Je-li podloží únosné, nabízí se výměna stmelených vrstev. To je jistě správný krok, ovšem jak již bylo řečeno výše a uvedeno v TP 87 výměna jen části vrstev nemusí být dostatečná. Je tedy opět nutné provedení diagnostiky a zjištění zbytkové únosnosti konstrukce, popřípadě je nutno vyměnit celé konstrukční vrstvy.

Výpočet ukazuje, že největší podíl na trvalých deformacích má ložná nebo podkladní vrstva. Tyto vrstvy by tedy měly obecně splňovat požadavky odolnosti proti vzniku trvalých deformací. Jako velmi výhodná se jeví vrstva VMT ve smyslu TP 151.

Použití těchto vrstev je sice nákladnější, ale vrstva VMT je vysoce odolná podkladní vrstva zabraňující nejen vzniku trvalých deformací. Navrhování třívrstevních vozovek s VMT nebo čtyřvrstevních s dvěma vrstvami ACP 22 má i výhodu při pozdější údržbě, kdy je možno odfrézovat obrusnou vrstvu (ztráta protismykových vlastností, deformace, stárí pojiva) a ložnou vrstvu. Podkladní vrstva tak může tvořit pevný kompaktní podklad pro pokládku nové ložné a obrusné vrstvy, aniž by byla konstrukce vozovky v průběhu stavby otevřena a vystavena nepřízní počasí a vlivům staveniště.

Jak je vidět, i přes to, že trvalé deformace jsou palčivým problémem některých úseků silnic a dálnic, není odborná veřejnost mnohdy jednotného názoru na odstranění problému v projekční fázi ani při hospodaření s vozovkou a bohužel mnohdy není ani řádně seznámena s důsledky této problematiky. To se promítá pak do každodenního života, kdy vozovka vykazující vyjeté koleje a jiné deformace je nejen nekomfortní, ale hlavně se stává životu nebezpečnou. Není nic neobvyklého, že v místě překlápění vozovky a malého podélného spádu dochází k pomalému příčnému odvodnění srážkových vod a pokud se ještě v tomto místě vyskytují vyjeté koleje, drží se v nich nahromaděná voda, která v zimních měsících může i namrznat.

Už jen možnost vzniku aquaplaningu je značně zvýšena přítomností vody v koleji. Je proto žádoucí, aby k problematice trvalých deformací bylo přistupováno stejně jako k problematice protismykových vlastností a jiných hlavních návrhových prvků konstrukce vozovky.

Dle názoru autora by bylo velkým přínosem zavedení výpočetní metodiky do Českých návrhových postupů a ověření skutečného chování navržených konstrukcí.

Zavedení posouzení odolnosti netuhých vozovek do návrhových podkladů by jistě celoročně ušetřilo nemalé finanční částky vynakládané na mnohdy neodborně vyprojektované a realizované opravy a v neposlední řadě velmi zvýšilo bezpečnost provozu na pozemních komunikacích.

# Příloha 1

## 1) Výsledky výpočtů

### 1.1) TP 3/2009

Počet návrhových náprav		
	Lokalita 1	Lokalita 2
2011	750 440	1 827 920
2012	1 515 480	3 655 840
2013	2 292 930	5 575 740
2014	3 080 600	7 489 800
2015	3 879 950	9 438 900
2016	4 695 360	11 414 280
2017	5 518 800	13 418 860
2018	6 353 920	15 458 480
2019	7 200 720	17 390 790
2020	8 066 500	19 615 100
2021	8 945 420	21 737 210
2022	9 828 720	23 897 280
2023	10 723 700	26 078 520
2024	11 630 360	28 299 180
2025	12 559 650	30 539 550
2026	13 490 400	32 809 120
2027	14 445 240	35 120 300
2028	15 124 140	37 449 000
2029	16 366 600	39 806 900
2030	17 359 400	42 208 600

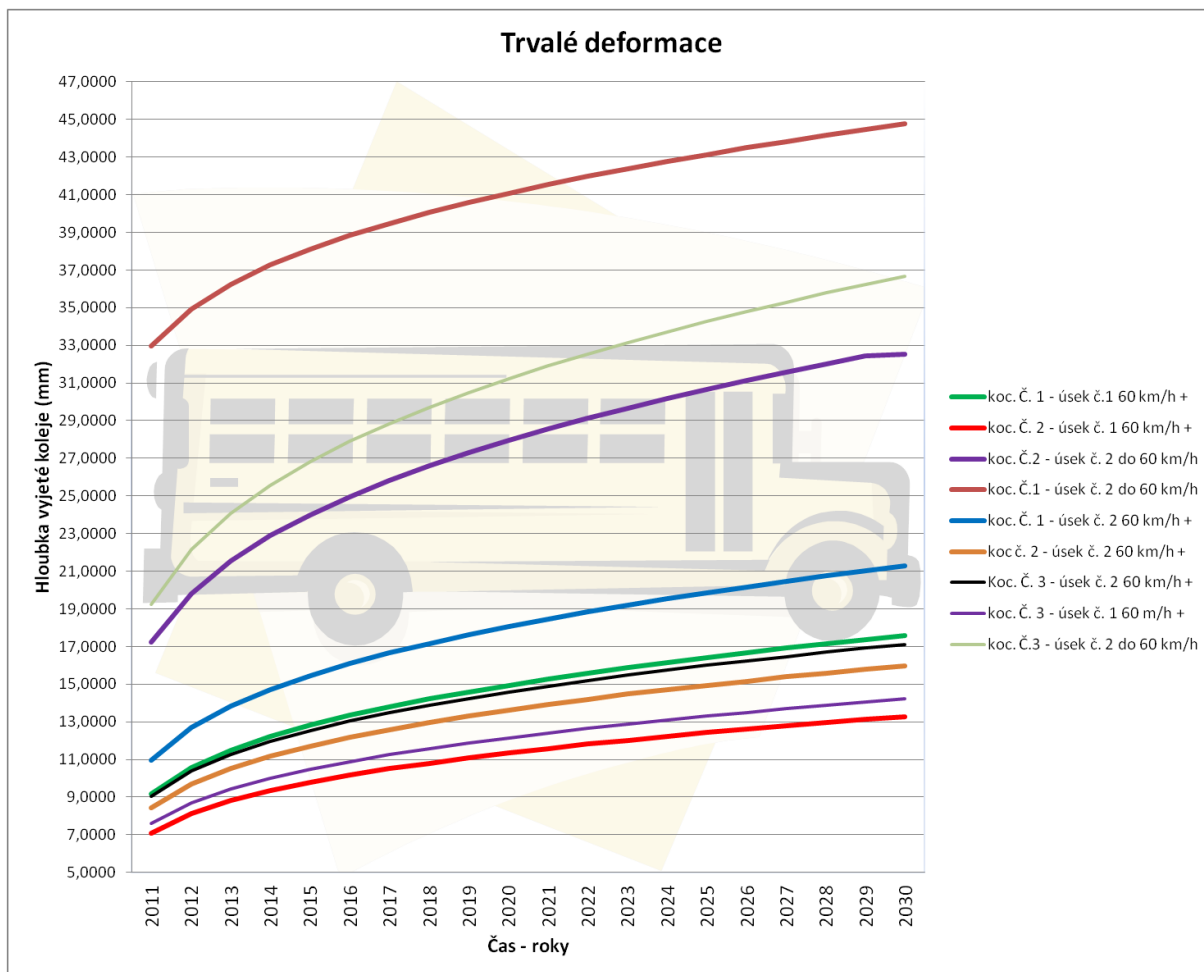
Tab. 1: Přehled dopravního zatížení

Trvalá deformace (mm) před přenásobení bezpečnostním koeficientem									
Rok	koc. č. 1 úsek č. 1 60 km/h +	koc. č. 2 úsek č. 1 60 km/h +	koc. č. 2 úsek č. 2 ≤ 60 km/h	koc. č. 1 úsek č. 2 ≤ 60 km/h	koc. č. 1 úsek č. 2 60 km/h +	koc. č. 2 úsek č. 2 60 km/h +	koc. č. 3 úsek č. 2 60 km/h	koc. č. 3 úsek č. 1 60 km/h	koc. č. 3 úsek č. 2 ≤ 60 km/h
2011	9,163199	7,094565	17,218930	32,958453	10,978390	8,429050	9,034460	7,604400	19,236300
2012	10,559610	8,125213	19,813544	34,931247	12,687490	9,685893	10,378660	8,708169	22,139670
2013	11,494720	8,813781	21,545142	36,244950	13,830350	10,524650	11,276050	9,445300	24,076640
2014	12,217360	9,345164	22,886031	37,260900	14,716380	11,174150	11,951780	10,014040	25,535160
2015	12,816760	9,785490	24,000056	38,104348	15,453100	11,713750	12,547860	10,485230	26,821770
2016	13,336790	10,167230	24,960154	38,830729	16,088440	12,178790	13,045120	10,893670	27,895090
2017	13,795430	10,503700	25,811020	39,474135	16,651790	12,590920	13,485760	11,253630	28,846160
2018	14,209490	10,807310	26,581316	40,056368	17,162010	12,964030	13,884620	11,578410	29,707070
2019	14,591310	11,087160	27,284597	40,587756	17,628020	13,304670	14,248750	11,877750	30,492990
2020	14,942040	11,344120	27,935320	41,079279	18,059340	13,619860	14,585630	12,152570	31,220117
2021	15,272200	11,585940	28,542560	41,537831	18,461960	13,913980	14,899900	12,411180	31,898590
2022	15,579740	11,811110	29,115400	41,970301	18,841870	14,191440	15,196500	12,651970	32,538570
2023	15,870350	12,023840	29,654687	42,377352	19,199610	14,475670	15,475640	12,879440	33,141025
2024	16,146320	12,225790	30,169120	42,765566	19,540940	14,701830	15,740700	13,095370	33,713107
2025	16,412490	12,420530	30,657510	43,134059	19,865050	14,938380	15,994500	13,303580	34,261188
2026	16,664310	12,604730	31,124890	43,486643	20,175280	15,164770	16,236500	13,500500	34,783200
2027	16,909120	12,783760	31,575915	43,826836	20,474710	15,383230	16,469920	13,691920	35,286900
2028	17,141790	12,953890	32,007806	44,152550	20,761480	15,592420	16,697100	13,876220	35,777200
2029	17,366270	13,118000	32,424535	44,466789	21,038230	15,794270	16,909000	14,049210	36,234600
2030	17,586400	13,278930	32,529908	44,772425	21,307470	15,990620	17,118780	14,221270	36,687300

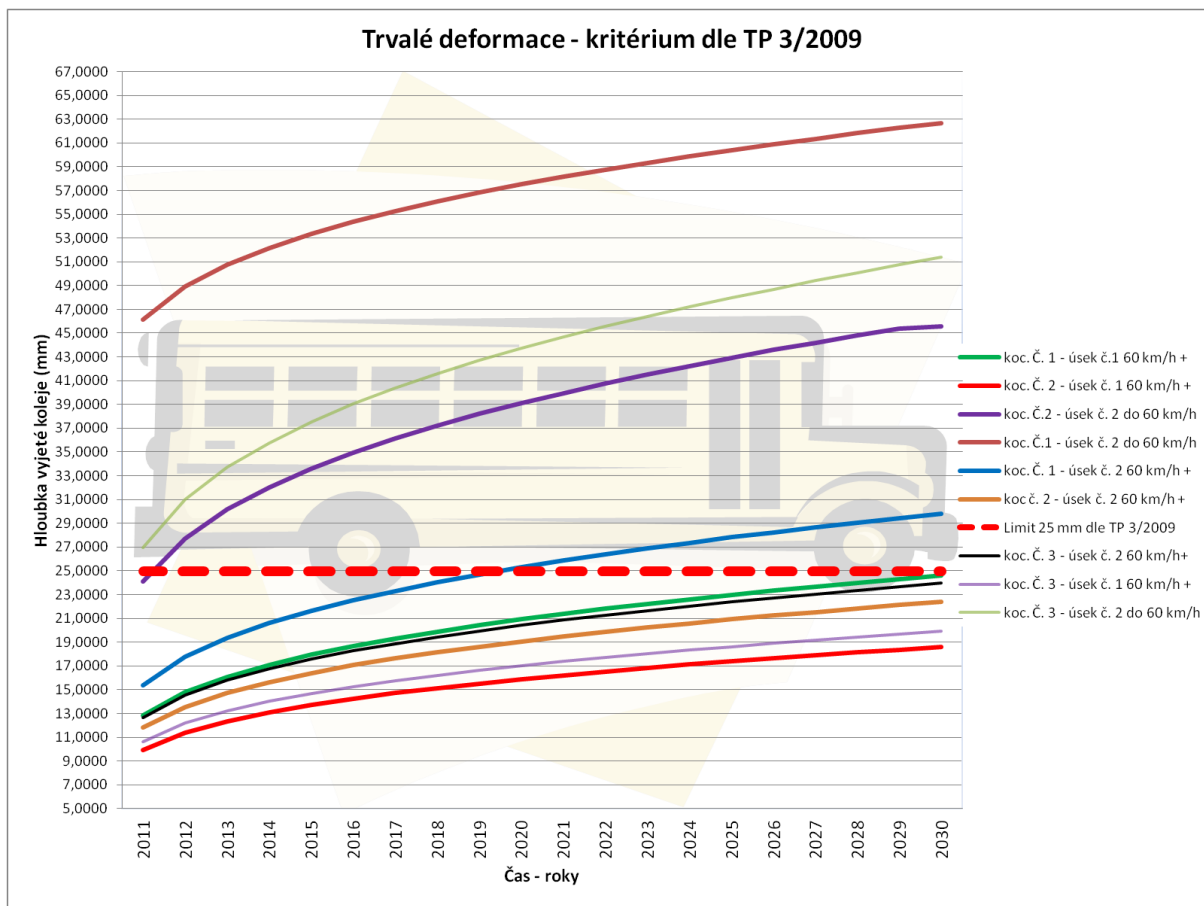
Tab. 2: Přehled vypočtených trvalých deformací v průběhu životnosti vozovky

Trvalá deformace (mm) po přenásobení bezpečnostním koeficientem									
Rok	koc. č. 1 úsek č. 1 60 km/h +	koc. č. 2 úsek č. 1 60 km/h +	koc. č. 2 úsek č. 2 > 60 km/h	koc. č. 1 úsek č. 2 > 60 km/h	koc. č. 1 úsek č. 2 60 km/h +	koc. č. 2 úsek č. 2 60 km/h +	koc. č. 3 úsek č. 2 60 km/h	koc. č. 3 úsek č. 1 60 km/h	koc. č. 3 úsek č. 2 ≤ 60 km/h
2011	12,828479	9,932391	24,106502	46,141834	15,369746	11,800670	12,648244	10,646160	26,930820
2012	14,783454	11,375298	27,738961	48,903745	17,762486	13,560250	14,530124	12,191437	30,995538
2013	16,092608	12,339293	30,163199	50,742930	19,362490	14,734510	15,786470	13,223420	33,707296
2014	17,104304	13,083230	32,040443	52,165260	20,602932	15,643810	16,732492	14,019656	35,749224
2015	17,943464	13,699686	33,600078	53,346087	21,634340	16,399250	17,567004	14,679322	37,550478
2016	18,671506	14,234122	34,944216	54,363021	22,523816	17,050306	18,263168	15,251138	39,053126
2017	19,313602	14,705180	36,135428	55,263789	23,312506	17,627288	18,880064	15,755082	40,384624
2018	19,893286	15,130234	37,213842	56,078915	24,026814	18,149642	19,438468	16,209774	41,589898
2019	20,427834	15,522024	38,198436	56,822858	24,679228	18,626538	19,948250	16,628850	42,690186
2020	20,918856	15,881768	39,109448	57,510991	25,283076	19,067804	20,419882	17,013598	43,708164
2021	21,381080	16,220316	39,959584	58,152963	25,846744	19,479572	20,859860	17,375652	44,658026
2022	21,811636	16,535554	40,761559	58,758422	26,378618	19,868016	21,275100	17,712758	45,553998
2023	22,218490	16,833376	41,516562	59,328293	26,879454	20,265938	21,665896	18,031216	46,397435
2024	22,604848	17,116106	42,236768	59,871792	27,357316	20,582562	22,036980	18,333518	47,198350
2025	22,977486	17,388742	42,920514	60,387683	27,811070	20,913732	22,392300	18,625012	47,965663
2026	23,330034	17,646622	43,574846	60,881300	28,245392	21,230678	22,731100	18,900700	48,696480
2027	23,672768	17,897264	44,206281	61,357570	28,664594	21,536522	23,057888	19,168688	49,401660
2028	23,998506	18,135446	44,810928	61,813570	29,066072	21,829388	23,375940	19,426708	50,088080
2029	24,312778	18,365200	45,394349	62,253505	29,453522	22,111978	23,672600	19,668894	50,728440
2030	24,620960	18,590502	45,541871	62,681395	29,830458	22,386868	23,966292	19,909778	51,362220

Tab. 3: Přehled vypočtených trvalých deformací v průběhu životnosti vozovky - návrhová hodnota



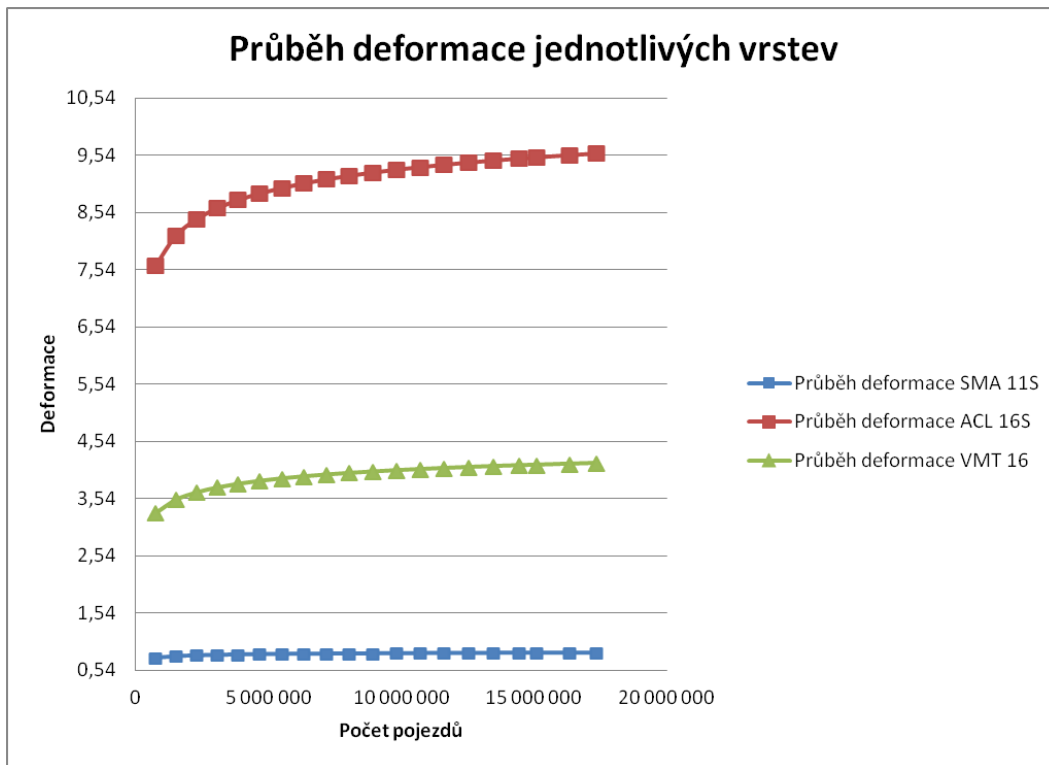
Graf 1: Trvalé deformace dle TP 3/2009



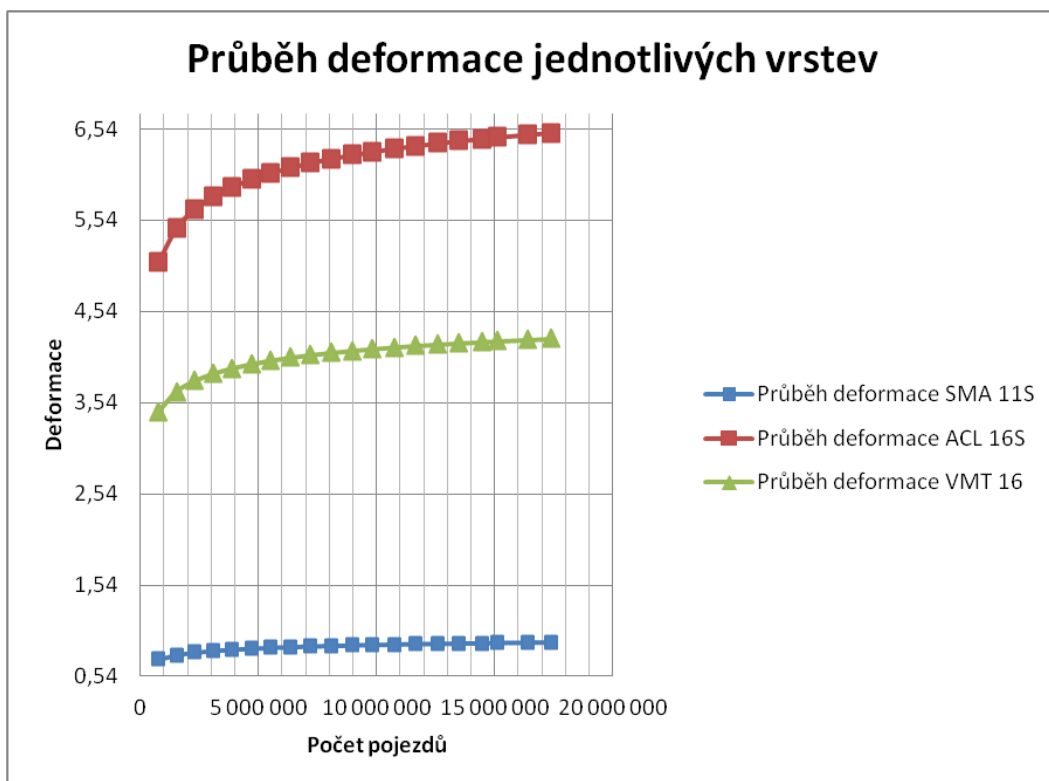
Graf 2: Trvalé deformace dle TP 3/2009 - návrhová hodnota

## Příloha 2

Metodika dle programu CalMe - Výsledky

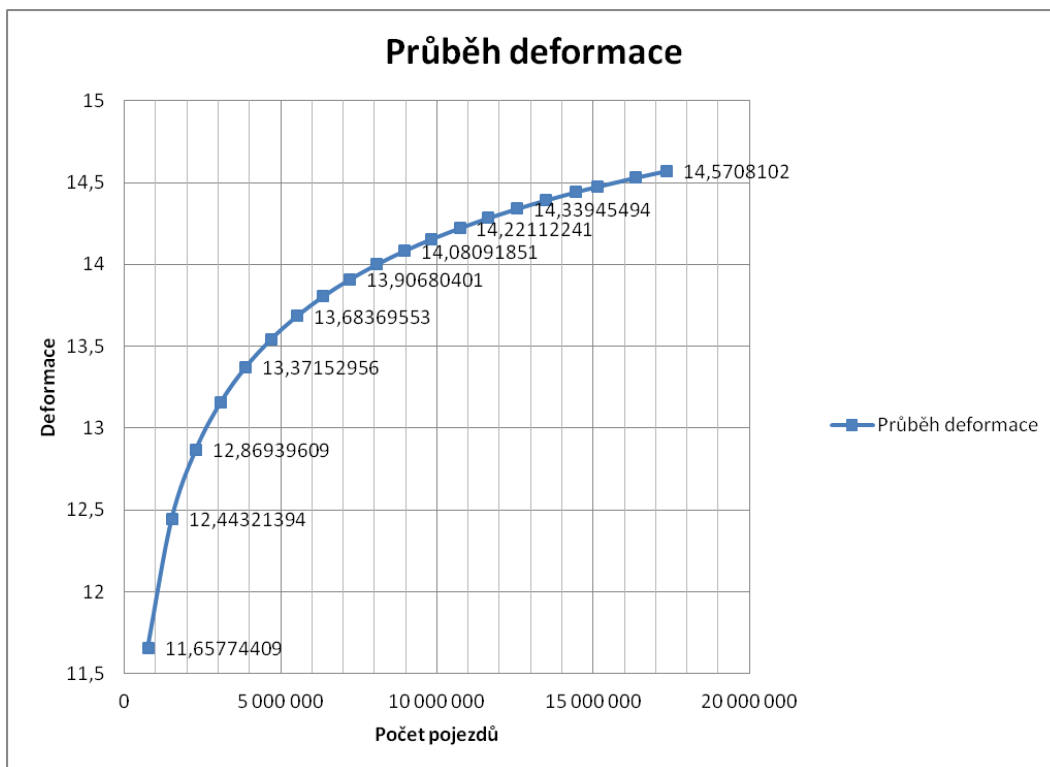


Graf 3: Konstrukce č. 2 - úsek č. 1, 27 °C - Průběh deformace [mm]

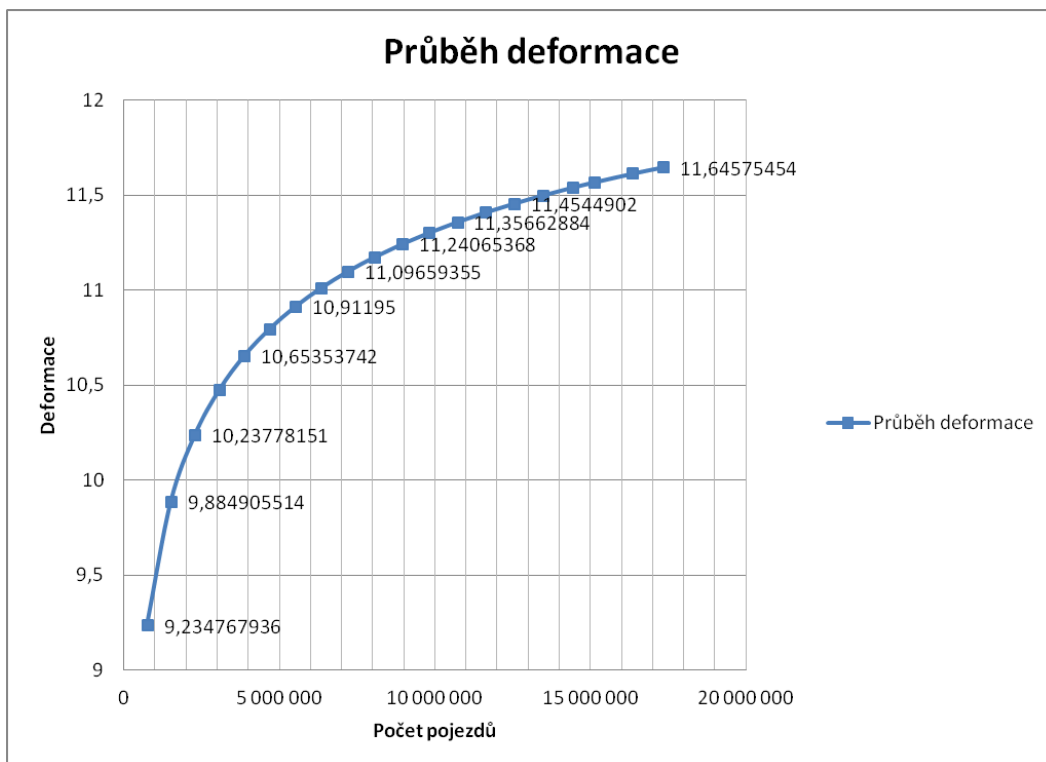


Graf 4: Konstrukce č. 2 - úsek č. 1, 11 °C - Průběh deformace [mm]

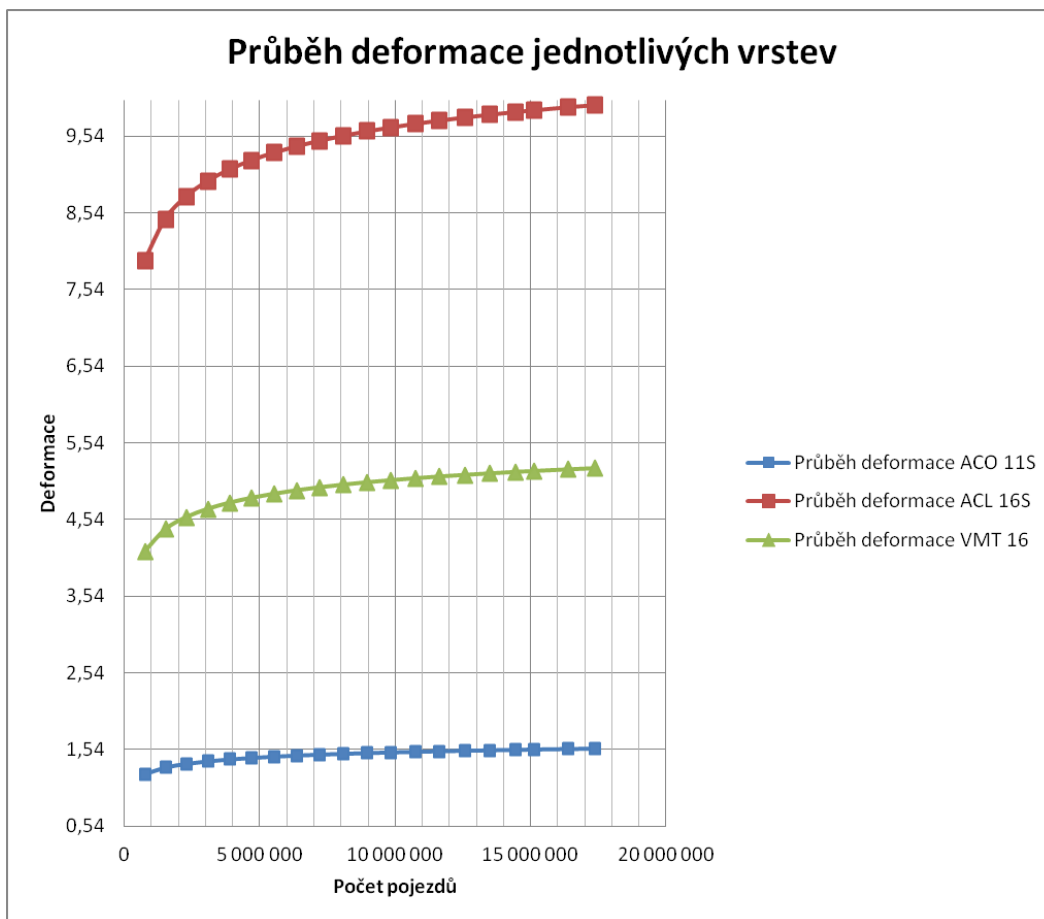




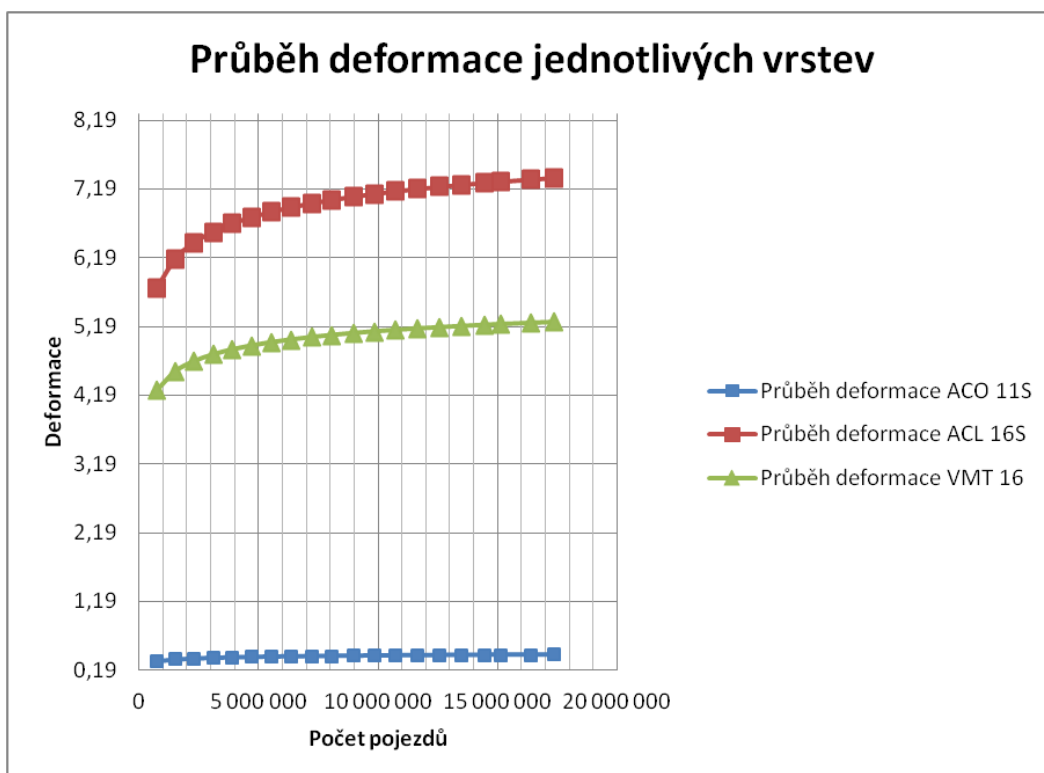
Graf 5: Konstrukce č. 2 - úsek č. 1, 27 °C - Průběh celkové deformace [mm]



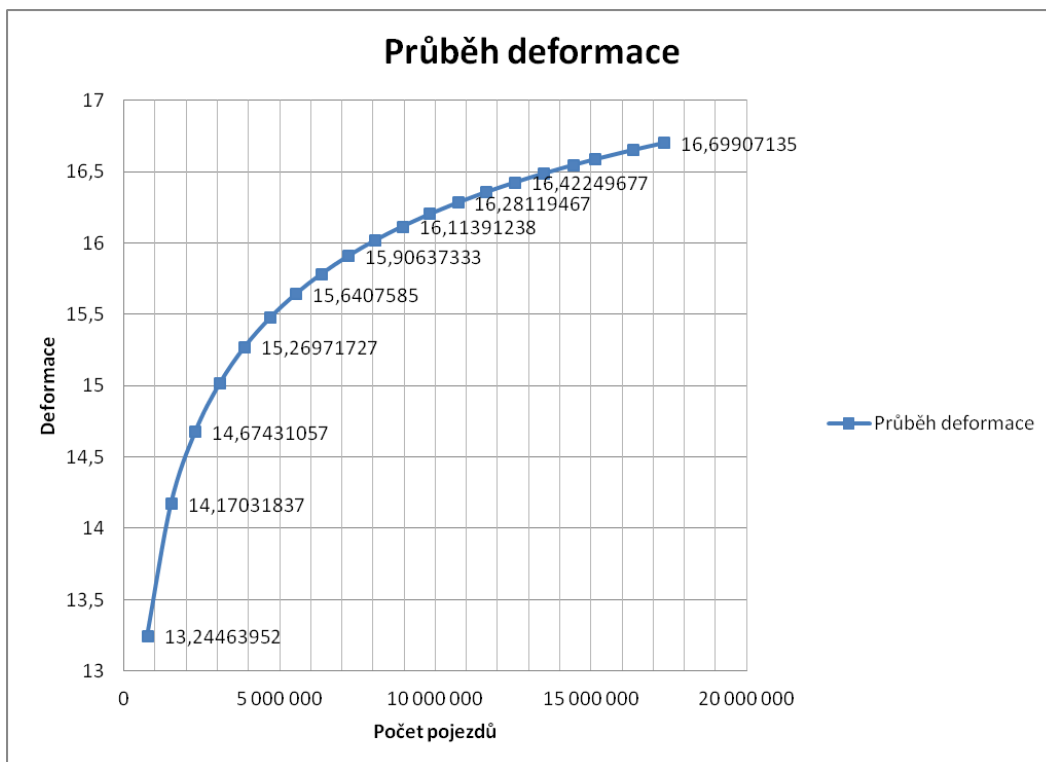
Graf 6: Konstrukce č. 2 - úsek č. 1, 11 °C - Průběh celkové deformace [mm]



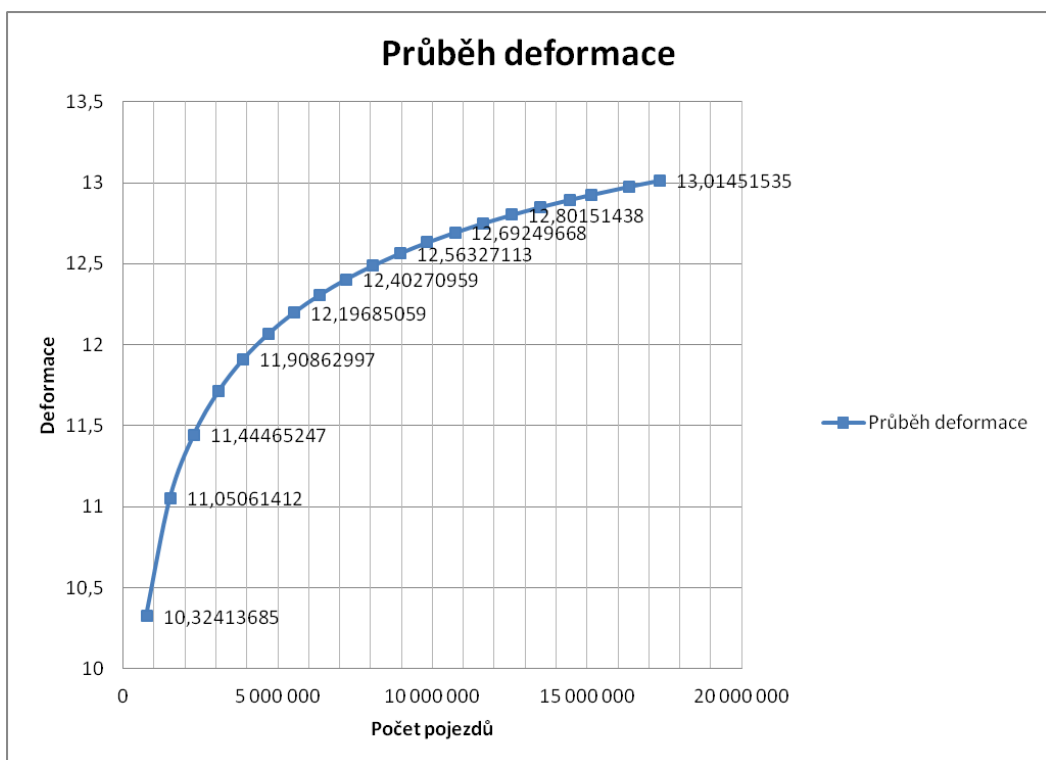
Graf 7: Konstrukce č. 3 - úsek č. 1, 27 °C - Průběh deformace [mm]



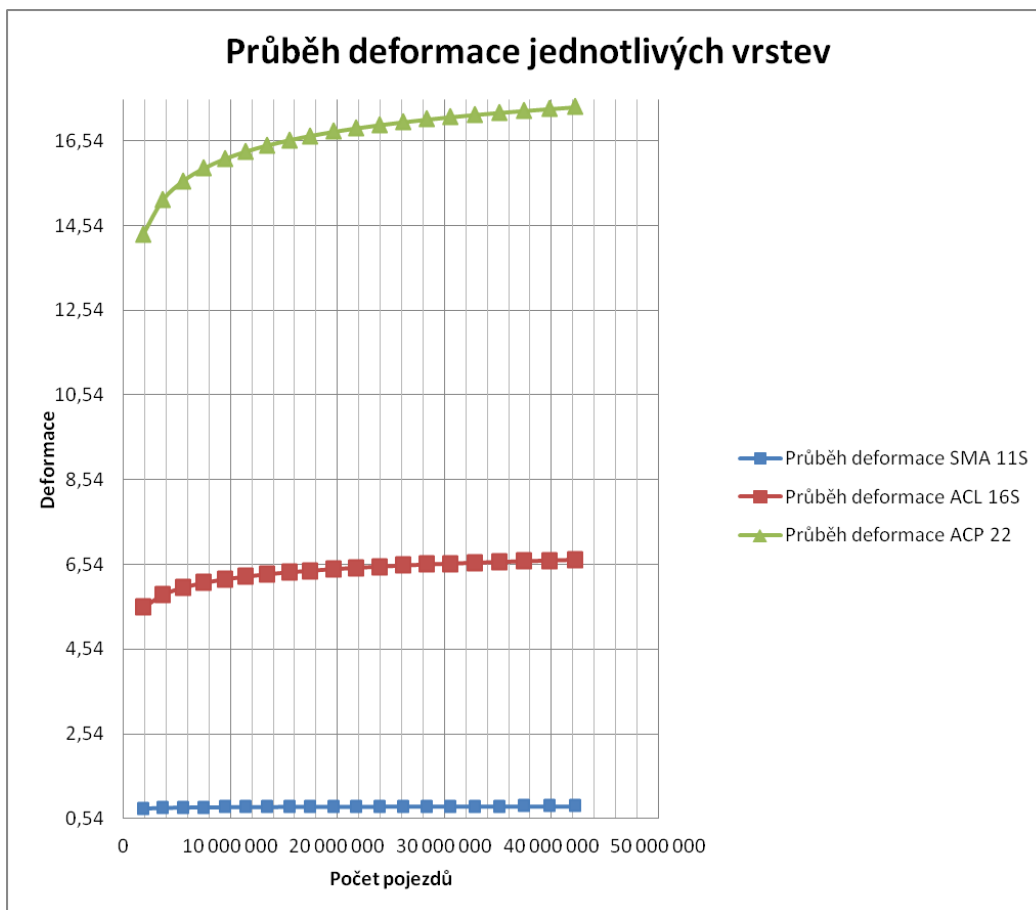
Graf 8: Konstrukce č. 3 - úsek č. 1, 11 °C - Průběh deformace [mm]



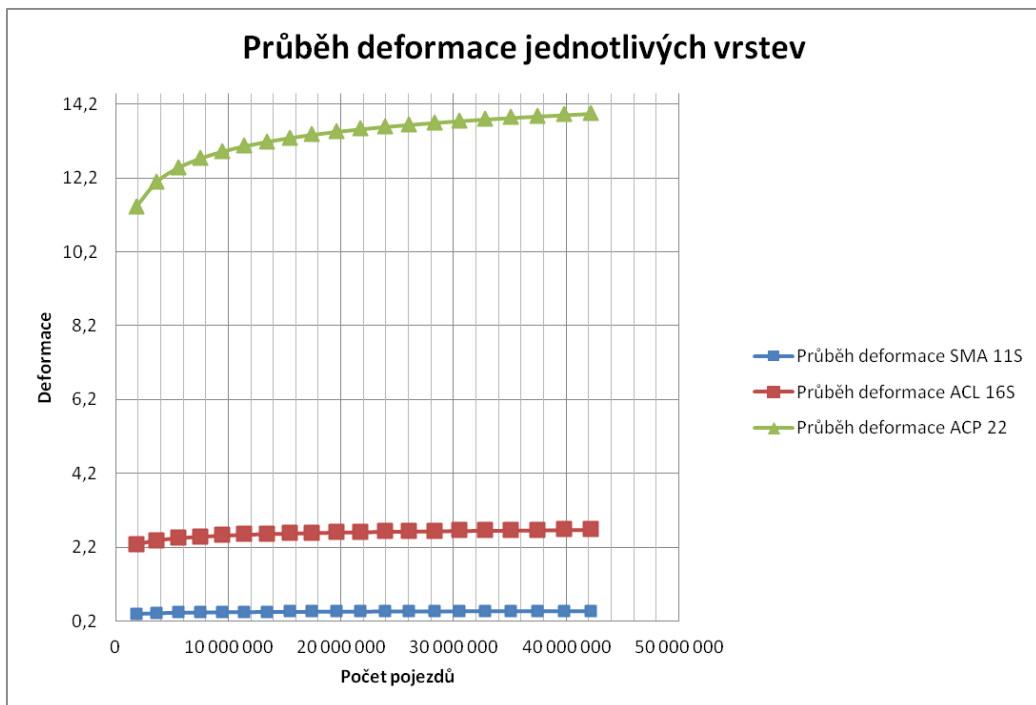
Graf 9: Konstrukce č. 3 - úsek č. 1, 27 °C - Průběh celkové deformace [mm]



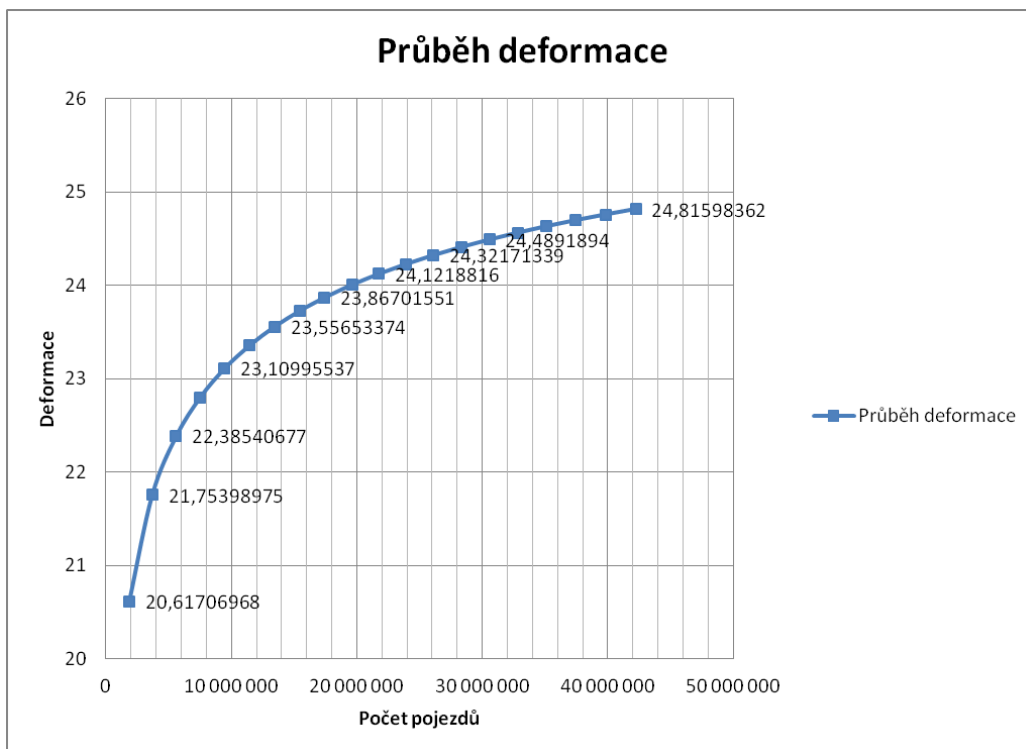
Graf 10: Konstrukce č. 3 - úsek č. 1, 11 °C - Průběh celkové deformace [mm]



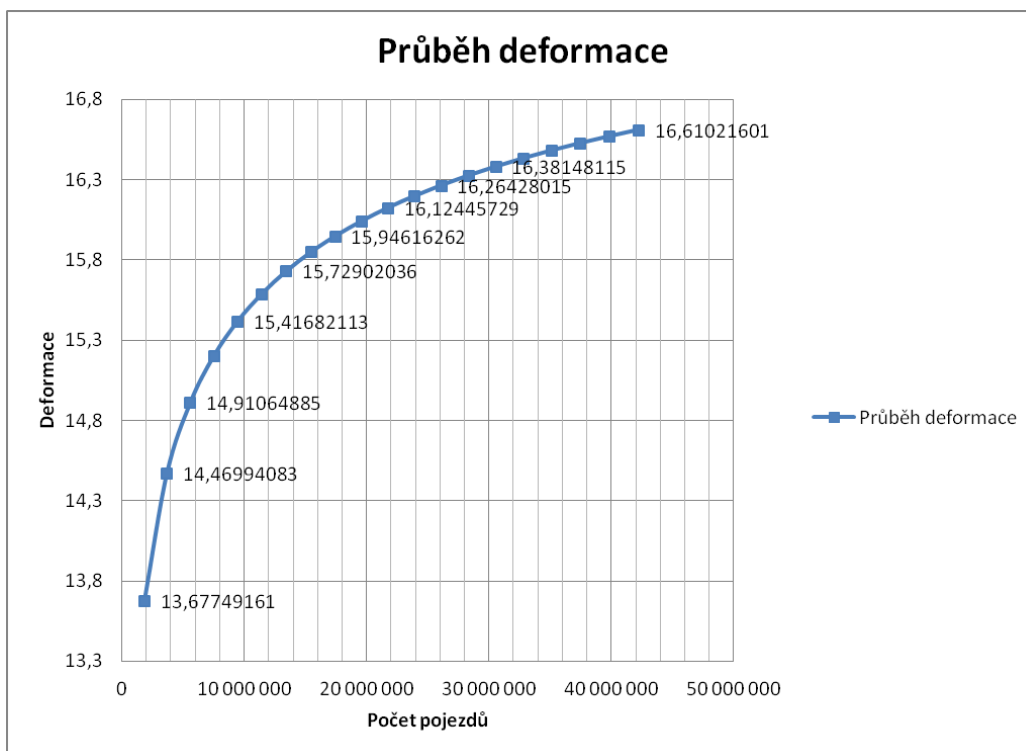
Graf 11: Konstrukce č. 1 - úsek č. 2, 27 °C - Průběh deformace [mm]



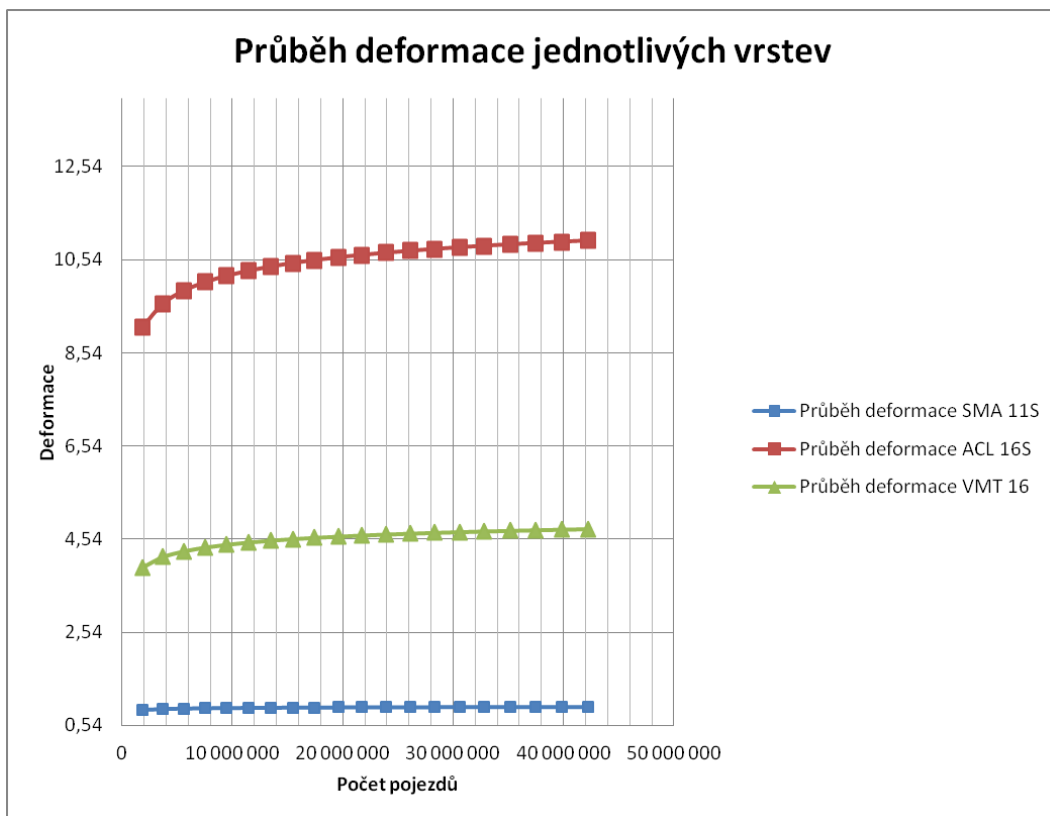
Graf 12: Konstrukce č. 1 - úsek č. 2, 15 °C - Průběh deformace [mm]



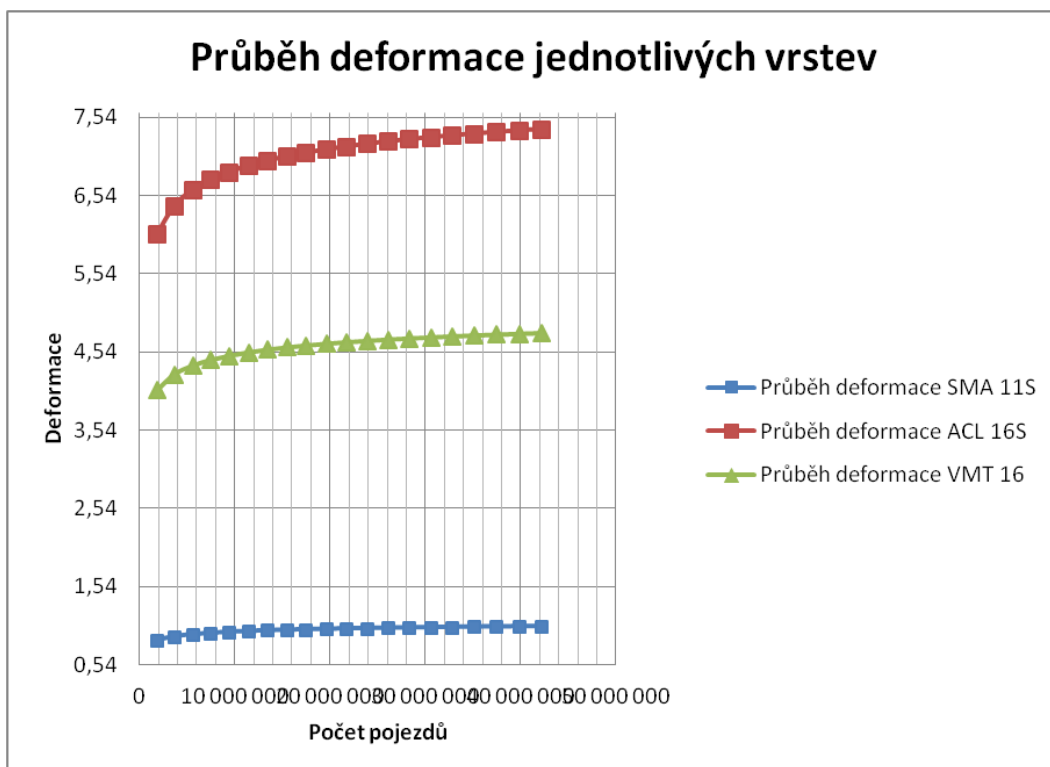
Graf 13: Konstrukce č. 1 - úsek č. 2, 27 °C - Průběh celkové deformace [mm]



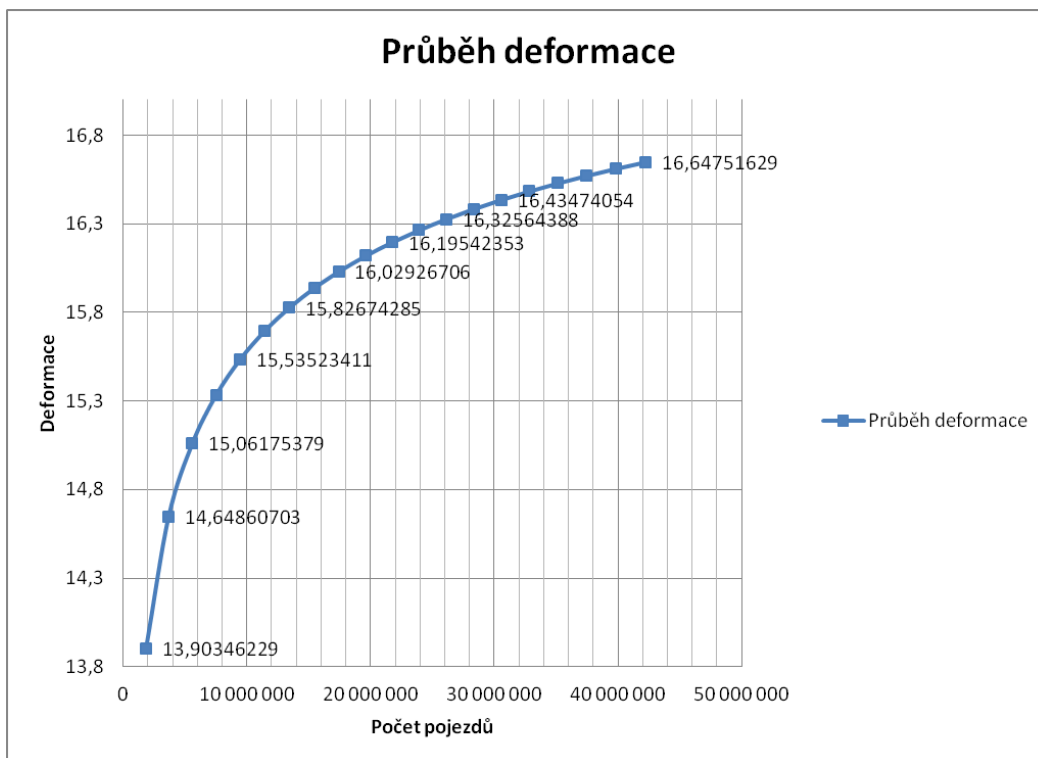
Graf 14: Konstrukce č. 1 - úsek č. 2, 11 °C - Průběh celkové deformace [mm]



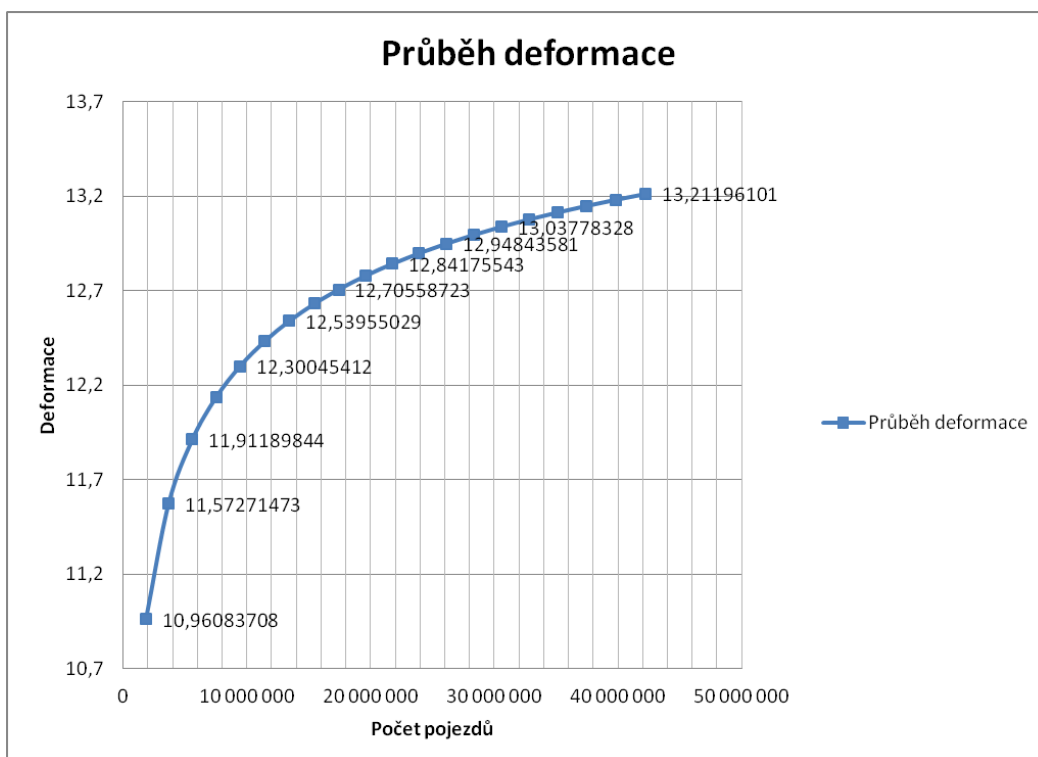
Graf 15: Konstrukce č. 2 - úsek č. 2, 27 °C - Průběh deformace [mm]



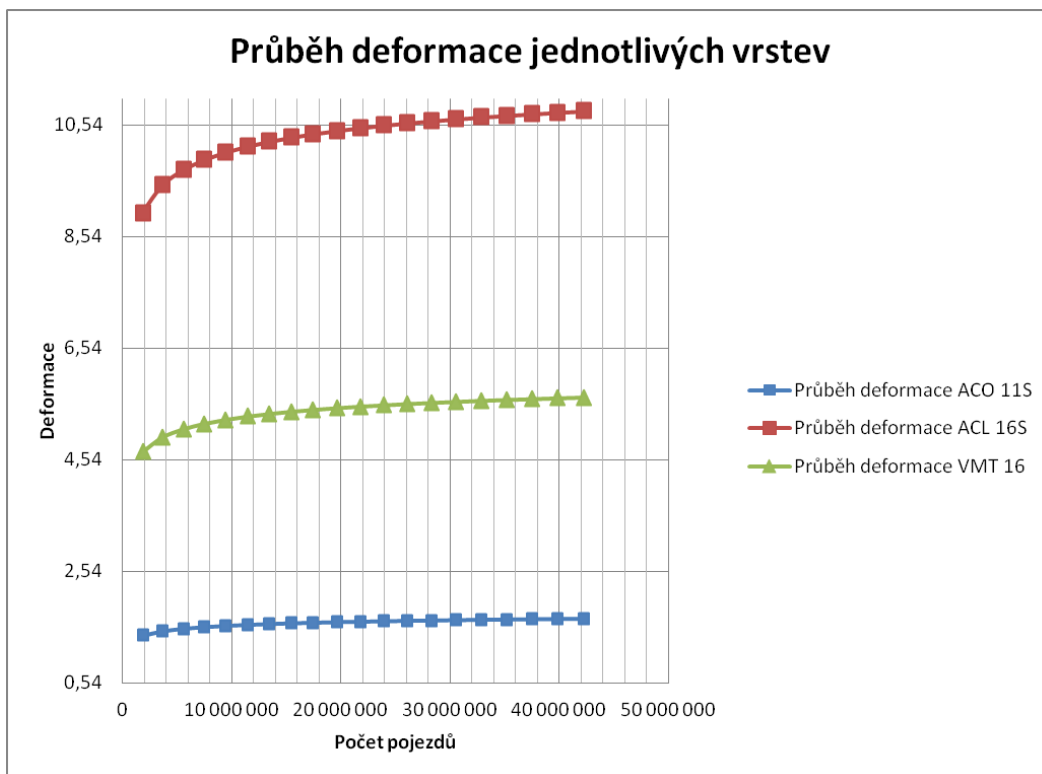
Graf 16: Konstrukce č. 2 - úsek č. 2, 11 °C - Průběh deformace [mm]



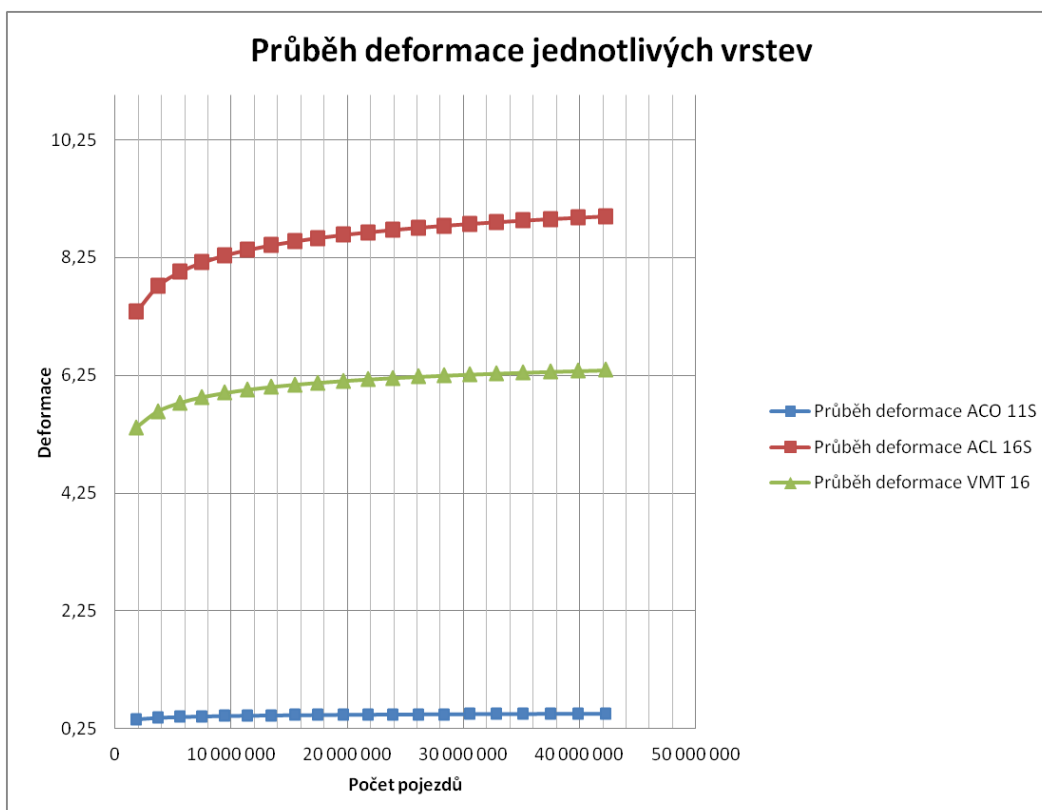
Graf 17: Konstrukce č. 2 - úsek č. 2, 27 °C - Průběh celkové deformace [mm]



Graf 18: Konstrukce č. 2 - úsek č. 2, 11 °C - Průběh celkové deformace [mm]

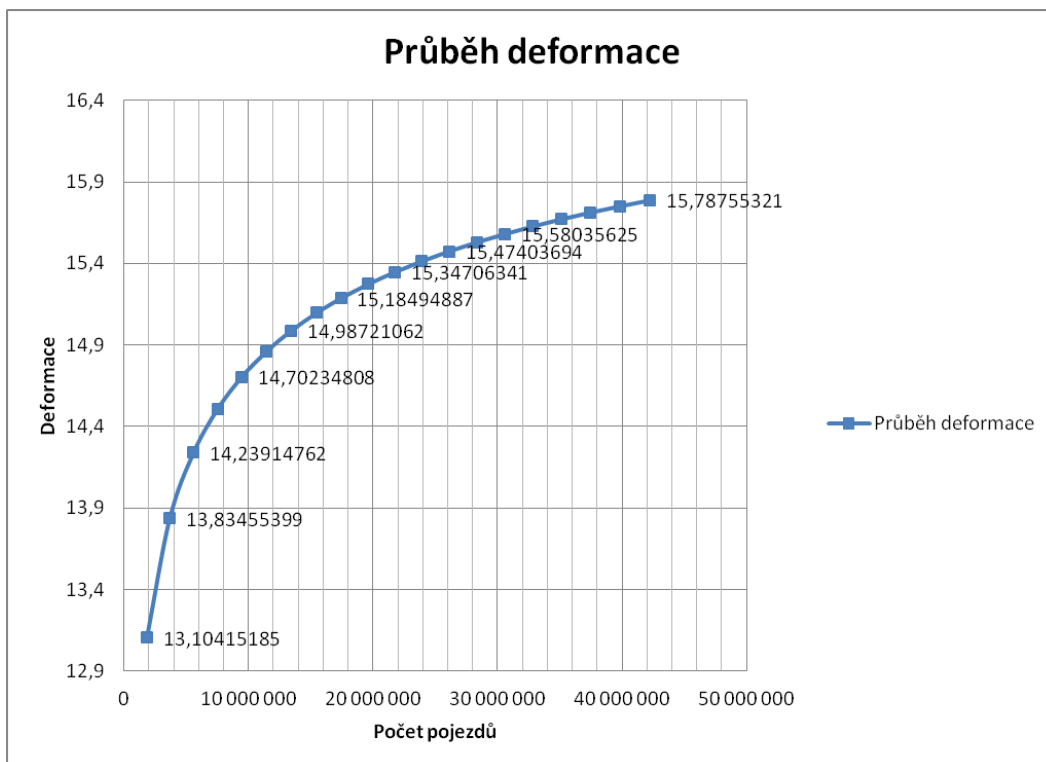


Graf 19: Konstrukce č. 3 - úsek č. 2, 27 °C - Průběh deformace [mm]

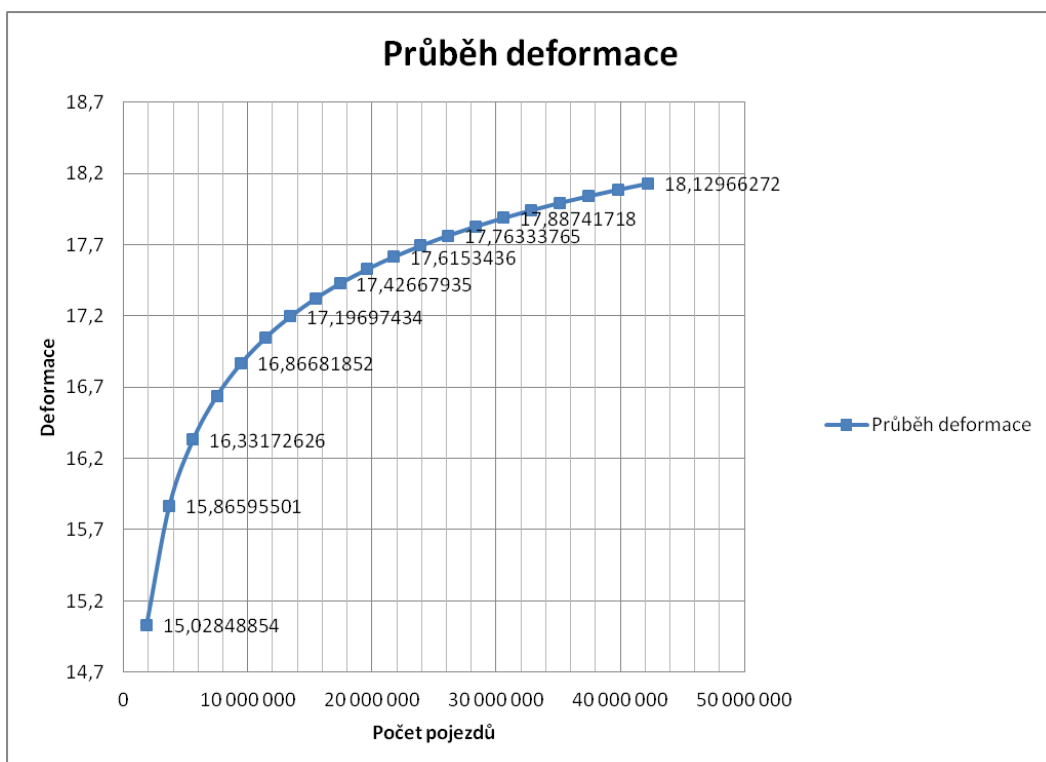


Graf 20: Konstrukce č. 3 - úsek č. 2, 11 °C - Průběh deformace [mm]





Graf 21: Konstrukce č. 3 - úsek č. 2, 27 °C - Průběh celkové deformace [mm]



Graf 22: Konstrukce č. 3 - úsek č. 2, 11 °C - Průběh celkové deformace [mm]

## SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] ÚŘAD PRO TECHNICKOU NORMALIZACI, METROLOGII A STÁTNÍ ZKUŠEBNICTVÍ, PRAHA:  
*ČSN EN 12697-22+A1 Asfaltové směsi - Zkušební metody pro asf. směsi za horka*  
*Část 22: Zkouška poježdění kolem*
- [2] MINISTERSTVO DOPRAVY POŠT A TELEKOMUNIKACÍ SR  
*TP 3/2009 Navrhovanie netuhých a polotuhých vozoviek, November 2008*
- [3] LÍDL Václav a kol.: *Silnice a dálnice v České republice, Pragoprojekt Praha 2009, ISBN neuvedeno*
- [4] VALENTIN Jan: *Užitné vlastnosti a reologie asfaltových pojiv a směsí - charakteristiky, nové zkušební metody, vývojové trendy, Praha 2003, ISBN: neuvedeno*
- [5] JIRÁSEK Milan, ZEMAN Jan: *Přetváření a porušování materiálů, ČVUT Praha 2012 ISBN 978-80-01-05064-4*
- [6] JIRÁSEK Milan: *PPMA, podklady pro přednášky 2014*, [online], [cit. 2014], Dostupné z: [www.mech.fsv.cvut.cz](http://www.mech.fsv.cvut.cz)
- [7] Online článek Höpplerův viskozimetr, Pedagogická fakulta Masarykovi univerzity, [online], [cit. 2017-01-08], Dostupné z: [http://www.ped.muni.cz/wchem/sm/hc/hoppleruv\\_viskozimetr.htm](http://www.ped.muni.cz/wchem/sm/hc/hoppleruv_viskozimetr.htm)
- [8] JANÍK Jaroslav, *Viskozita tekutin a její měření, Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, Ostrava 2010*, [online], [cit. 2017-01-08], Dostupné z: <http://www.338.vsb.cz/PDF/TEXTviskozitaPDF.pdf>
- [9] HEMERKA Kazimír, ŠTĚPÁN Vladimír, VEVERKA Václav, ŠLACHTA Emil: *Příručka pro silniční laboratoře, Praha 1958, ISBN : neuvedeno*
- [10] DVOŘÁK Lukáš, *Vlastnosti tekutin, Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra hydromechaniky a hydraulických zařízení Ostrava 2010*, [online], [cit. 2017-01-08], Dostupné z: <http://www.338.vsb.cz/PDF/vlastnosti%20tekutin.pdf>
- [11] PAVEMENT INTERACTIVE, SHRP 2011, článek *Superpave Mix Design*, 2011, [online], [cit. 2017-01-08], Dostupné z: <http://www.pavementinteractive.org/article/superpave-mix-design/#>
- [12] ÚŘAD PRO TECHNICKOU NORMALIZACI, METROLOGII A STÁTNÍ ZKUŠEBNICTVÍ, PRAHA:  
*ČSN 73 6175 Měření a hodnocení nerovnosti povrchů vozovek*
- [13] MALIÁŠ Luděk a kol.: *TP 82 Katalog poruch netuhých vozovek, PavEx® Consulting, s.r.o., Ministerstvo dopravy odbor silniční infrastruktury, Praha 2010,*

- [online], [cit. 2017-01-08], Dostupné z: <http://pjpgk.cz/TP%2082.pdf>
- [14] ÚŘAD PRO TECHNICKOU NORMALIZACI, METROLOGII A STÁTNÍ ZKUŠEBNICTVÍ, PRAHA:  
*ČSN EN 13108-1 Asfaltové směsi - Specifikace pro materiály*  
*Část 1:Asfaltový beton*
- [15] KUDRNA Jan a kol.: *TP 87 Navrhování údržby a oprav netuhých vozovek*, Vysoké učení technické v Brně, fakulta stavební 2010, Ministerstvo dopravy ČR,  
[online], [cit. 2017-01-08], Dostupné z: <http://pjpgk.cz/TP%2087.pdf>
- [16] LYANG Robert: *Refine AASHTO T283 Resistance of Compacted Bituminous Mixture to Moisture Induced Damage for Superpave*, Ohio Department of Transportation Office of Research and Development and the U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration 2008, [online], [cit. 2017-01-08], Dostupné z: <http://ntl.bts.gov/lib/55000/55800/55840/FHWA-OH-2008-1.PDF>

## SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY - obrázky

- [101] Obr.14, [online], [cit. 2017-01-08], dostupné z  
[http://www.ped.muni.cz/wchem/sm/hc/hoppleruv\\_viskozimetr.htm](http://www.ped.muni.cz/wchem/sm/hc/hoppleruv_viskozimetr.htm)
- [102] Obr. 15, [online], [cit. 2017-01-08], dostupné z: <http://www.pragolab.cz/reologie-viskozita-a-extruzeviskozimetryhoppleruv-viskozimetr>
- [103] Obr.18, [online], [cit. 2017-01-08], dostupné z:  
<http://www.338.vsb.cz/PDF/TEXTviskozitaPDF.pdf>
- [104] Obr.20, [online], [cit. 2017-01-08], dostupné z:  
[http://www.studiosesaingegneria.it/SUPERPAVE/Test%20DSR%20\(6\)/Test%20DSR.htm](http://www.studiosesaingegneria.it/SUPERPAVE/Test%20DSR%20(6)/Test%20DSR.htm)
- [105] Obr.21, [online], [cit. 2017-01-08], dostupné z:  
[http://www.malvern.com/Assets/600x400\\_Kinexus\\_DSR\\_02.jpg](http://www.malvern.com/Assets/600x400_Kinexus_DSR_02.jpg)
- [106] Obr.22, [online], [cit. 2017-01-08], dostupné z: [http://www.pavementinteractive.org/wp-content/uploads/2011/04/Wsdot\\_dsr\\_samples.jpg](http://www.pavementinteractive.org/wp-content/uploads/2011/04/Wsdot_dsr_samples.jpg)
- [107] Obr.25, [online], [cit. 2017-01-08], dostupné z:  
[http://www.vurup.sk/sites/vurup.sk/archivedsite/www.vurup.sk/pc/vol43\\_2001/issue1/pdf/pet12.pdf](http://www.vurup.sk/sites/vurup.sk/archivedsite/www.vurup.sk/pc/vol43_2001/issue1/pdf/pet12.pdf)
- [108] Obr.26, [online], [cit. 2017-01-08], dostupné z: <http://www.pavementinteractive.org/wp-content/uploads/2011/04/Beam.jpg>
- [109] Obr.27, [online], [cit. 2017-01-08], dostupné z:  
[http://www.controlsgroup.com/backend/prodotti/img\\_upload/img\\_big/1110251749390\\_4.jpg](http://www.controlsgroup.com/backend/prodotti/img_upload/img_big/1110251749390_4.jpg)
- [110] Obr.24, [online], [cit. 2017-01-08], dostupné z:  
<http://materconstrucc.revistas.csic.es/index.php/materconstrucc/article/viewFile/1683/2049/3523>
- [111] Obr.30, [online], [cit. 2017-01-08], dostupné z:  
<http://www.roadex.org/elearning/lessons/permanent-deformation/managing-permanent-deformation/>
- [112] Obr.31, [online], [cit. 2017-01-08], dostupné z:  
<http://www.geomat.cz/chci-vyresit-problem/vyztuzeni-asfaltu/zamezeni-tvorby-vyjetych-koleji/>
- [113] Obr.32, [online], [cit. 2017-01-08], dostupné z:  
<http://www.pavementinteractive.org/wp-content/uploads/2008/05/Mvc-037s.jpg>
- [114] Obr.37, [online], [cit. 2017-01-08], dostupné z:  
<http://www.fhwa.dot.gov/publications/publicroads14marapr02.cfm>
- [115] Obr.38, [online], [cit. 2017-01-08], dostupné z:  
<http://www.controls-group.com/engasphaltbituminous-mixture-testing-equipmentpavelab-dwt-universal--aashtoen-double-wheel-tracker.php>

## SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1	Reologický článek - pružina	12
Obr. 2	Reologický článek - vazký tlumič	12
Obr. 3	Reologický model - Maxwellův model	13
Obr. 4	Závislost poddajnosti na čase	14
Obr. 5	Reologický model – Kelvinův model	16
Obr. 6	Funkce poddajnosti pro Kelvinův model	17
Obr. 7	Aproximace pomocí Maxwellova modelu [6]	18
Obr. 8	Aproximace pomocí Kelvinova modelu [6]	18
Obr. 9	Aproximace pomocí Kelvinova modelu a pružiny [6]	18
Obr. 10	Reologický model - Burgesův model	19
Obr. 11	Princip super pozice asfaltové směsi [4]	19
Obr. 12	Trvalé deformace v parkovacím pruhu	20
Obr. 13	Rychlost deformace viskózní látky	21
Obr. 14	Höpplerův viskozimetr - schéma [101]	22
Obr. 15	Höpplerův viskozimetr [102]	23
Obr. 16	Höpplerův reometr [10]	24
Obr. 17	Englerův viskozimetr [10]	25
Obr. 18	Schéma typů rotačních viskozimetrů [103]	26
Obr. 19	Odezva kapaliny [103]	26
Obr. 20	Schéma pracovního cyklu DSR [104]	27
Obr. 21; 22	DSR a vzorek pojiva [105; 106]	27
Obr. 23	Komplexní modul grafické znázornění	28
Obr. 24	Komplexní křivka Van der Poelův nomogram [110]	29
Obr. 25	Schéma zatížení při zkoušce BBR [107]	29
Obr. 26	Zatížení při zkoušce BBR [108]	30
Obr. 27	Princip hutnění v gyrátoru [109]	33
Obr. 28	Schéma zkušební okruhu Wes Track [4]	35
Obr. 29	Rozdíl mezi plastickou deformací stmelového souvrství, podloží a sekundárním dotvarováním podloží	37
Obr. 30	Plastická deformace podloží [111]	38
Obr. 31	Vyjeté koleje v řadícím pruhu [112]	38
Obr. 32	Vyjeté koleje v předpolí křižovatky [113]	40
Obr. 33	Vyjeté koleje a lokální hrboly v ul. Budějovická – Praha	41
Obr. 34	Trvalé deformace v parkovacím pruhu - litý asfalt	42
Obr. 35	Příčný profil povrchu vozovky vykazující hloubku vyjetých kolejí $R_R$ a $R_L$ [12], Str. 10 odstavec e)	43
Obr. 36	Příčný profil povrchu vozovky s uvedením teoretické hloubky vody $W_R$ a $W_L$ [12]	43
Obr. 37	Extra velké zkušební zařízení [114]	48
Obr. 38	Standardní zařízení pro zkoušku pojiždění kolem [115]	48
Obr. 39	Schéma návrhové nápravy dle TP 3/2009	59

## SEZNAM TABULEK

Tab. 1: Hodnocení hloubky vyjeté koleje dle ČSN 73 6175	44
Tab. 2: Hodnocení teoretické hloubky vody v koleji dle ČSN 73 6105	44
Tab. 3: Maximální poměrná hloubka koleje dle ČSN EN 13108-1	50
Tab. 4: Maximální poměrná hloubka koleje dle ČSN EN 13108-1	50
Tab. 5: Maximální poměrná hloubka koleje dle ČSN EN 13108-1	51
Tab. 6: Kritéria odolnosti proti trvalým deformacím dle ČSN EN 13108-1	51
Tab. 7: Hodnoty součinitelů $m$ a $n$	53
Tab. 8: Hodnoty $K_p$	53
Tab. 9: Výsledky sčítání dopravy - úsek č. 1	58
Tab. 10: Výsledky sčítání dopravy - úsek č. 2	58
Tab. 11: Návrhové parametry konstrukce č. 1	61
Tab. 12: Výsledky z programu OPMECO	61
Tab. 13: Součinitele vrstev	62
Tab. 14: Součinitele trvalých deformací vrstev	62
Tab. 15: Trvalé deformace vrstev vozovky	63
Tab. 16: Návrhové parametry konstrukce č. 1	64
Tab. 17: Výsledky z programu OPMECO	64
Tab. 18: Součinitele vrstev	65
Tab. 19: Součinitele trvalých deformací vrstev	65
Tab. 20: Trvalé deformace vrstev vozovky	65
Tab. 21: Návrhové parametry konstrukce č. 1 - standardní zatížení	66
Tab. 22: Návrhové parametry konstrukce č. 1 - nestandardní zatížení	66
Tab. 23, 24: Výsledky z programu OPMECO - standardní, nestandardní zatížení	67
Tab. 25: Součinitele vrstev	67
Tab. 26: Součinitele trvalých deformací vrstev	67
Tab. 27: Trvalé deformace vrstev vozovky - nestandardní zatížení	68
Tab. 28: Trvalé deformace vrstev vozovky - standardní zatížení	68
Tab. 29: Přehled výsledků posuzovaných vozovek	69
Tab. 30: Návrhové parametry	70
Tab. 31: Poměrné smykové přetvoření	71
Tab. 32: Celková trvalá deformace	71
Tab. 33: Vypočtené hodnoty hloubky kolejí v milimetrech	74
Tab. 34: Vypočtené hodnoty hloubky kolejí v milimetrech - porovnání kritéria	74
Tab. 35: Přehled vypočtených deformací - úsek č. 1	74
Tab. 36: Přehled vypočtených deformací - úsek č. 2	75

### **Přílohy:**

Tab. 1: Přehled dopravního zatížení	84
Tab. 2: Přehled vypočtených trvalých deformací v průběhu životnosti vozovky	85
Tab. 3: Přehled vypočtených trvalých deformací v průběhu životnosti vozovky - návrhová hodnota	85

## SEZNAM GRAFŮ

Graf 1: Průběh deformace jednotlivých vrstev konstrukce č.1 27 °C	72
Graf 2: Průběh deformace jednotlivých vrstev konstrukce č. 1 11 °C	72
Graf 3: Průběh deformace konstrukce č.1 27 °C	73
Graf 4: Průběh deformace konstrukce č. 1 11 °C	73
Graf 5: Průběh deformace konstrukcí - úsek 1	75
Graf 6: Průběh deformace konstrukcí - úsek 2	76

### Přílohy:

Graf 1: Trvalé deformace dle TP 3/2009	86
Graf 2: Trvalé deformace dle TP 3/2009 - návrhová hodnota	87
Graf 3: Konstrukce č. 2 - úsek č. 1, 27 °C - Průběh deformace	88
Graf 4: Konstrukce č. 2 - úsek č. 1, 11 °C - Průběh deformace	88
Graf 5: Konstrukce č. 2 - úsek č. 1, 27 °C - Průběh celkové deformace	89
Graf 6: Konstrukce č. 2 - úsek č. 1, 11 °C - Průběh celkové deformace	89
Graf 7: Konstrukce č. 3 - úsek č. 1, 27 °C - Průběh deformace	90
Graf 8: Konstrukce č. 3 - úsek č. 1, 11 °C - Průběh deformace	90
Graf 9: Konstrukce č. 3 - úsek č. 1, 27 °C - Průběh celkové deformace	91
Graf 10: Konstrukce č. 3 - úsek č. 1, 11 °C - Průběh celkové deformace	91
Graf 11: Konstrukce č. 1 - úsek č. 2, 27 °C - Průběh deformace	92
Graf 12: Konstrukce č. 1 - úsek č. 2, 15 °C - Průběh deformace	92
Graf 13: Konstrukce č. 1 - úsek č. 2, 27 °C - Průběh celkové deformace	93
Graf 14: Konstrukce č. 1 - úsek č. 2, 11 °C - Průběh celkové deformace	93
Graf 15: Konstrukce č. 2 - úsek č. 2, 27 °C - Průběh deformace	94
Graf 16: Konstrukce č. 2 - úsek č. 2, 11 °C - Průběh deformace	94
Graf 17: Konstrukce č. 2 - úsek č. 2, 27 °C - Průběh celkové deformace	95
Graf 18: Konstrukce č. 2 - úsek č. 2, 11 °C - Průběh celkové deformace	95
Graf 19: Konstrukce č. 3 - úsek č. 2, 27 °C - Průběh deformace	96
Graf 20: Konstrukce č. 3 - úsek č. 2, 11 °C - Průběh deformace	96
Graf 21: Konstrukce č. 3 - úsek č. 2, 27 °C - Průběh celkové deformace	97
Graf 22: Konstrukce č. 3 - úsek č. 2, 11 °C - Průběh celkové deformace	97

## Bibliografické údaje

Autor: **Karel Fazekas**  
Škola: **České vysoké učení technické v Praze, Fakulta stavební**  
Obor: **Konstrukce a dopravní stavby**  
Rok: **1/2017**  
Vedoucí: **Ing. Josef Žák, Ph.D.**  
Práce: **Diplomová**  
Název: **Degradační modely vozovky a stanovení odolnosti proti trvalým defomacím**  
Počet stran: **104**