

# Vliv hyperelastických vlastností podkladových desek pražců na chování a napjatost

Diplomová práce  
2006



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta technologická

Tímto bych chtěl poděkovat panu Ing. Antonínu Poláškově CSc. za odborné vedení, rady a konzultace při tvorbě mé diplomové práce; společnosti ŽPSV a.s., Uherský Ostroh za poskytnutí vzorků; Institutu pro testování a certifikaci, a.s. ve Zlíně za přípravu zkušebních tělísek; Ing. Milanu Žaludkovi, Ph.D. za pomoc při uskutečnění zkoušek a zároveň děkuji svým rodičům za podporu ve studiu.

## RESUMÉ

Cílem diplomové práce bylo stanovit, jaký vliv mají hyperelastické vlastnosti podkladových desek mezi kolejnicí a pražcem na napjatost a chování těchto desek. V teoretické části je nejdříve krátce uvedený popis železniční dopravy a historie vývoje železničního svršku, jeho konstrukční řešení a jednotlivé části. Dále je uvedený obecný popis pryžových materiálů, ze kterého jsou vzorky podkladových desek vyrobeny. Pro získání hyperelastických vlastností pryžových desek bylo provedeno několik typů a druhů měření. Z výsledků měření byly odvozeny materiálové konstanty, které definují hyperelastické vlastnosti a chování podkladových desek. Tato měření jsou stručně popsána v teoretické části. Výpočet napjatosti podkladových desek byl provedený pomocí numerické metody konečných prvků (MKP), která je také popsána v teoretické části.

V experimentální části byly provedeny měření materiálových vlastností pryžových podkladových podložek. Na základě naměřených materiálových hodnot byly vytvořeny konečnoprvkové modely podložek pomocí MKP s různými materiálovými parametry a provedeny pevnostní strukturální analýzy. V závěru je uvedena diskuse výsledků pro jednotlivé typy podkladových podložek pro jejich použití v provozu.

The aim of my dissertation was to determine influence of hyperelastic properties of rail pads on their stress and behaviour. In the theoretical part of work there are briefly described the railway traffic and history of a progress of superstructure, various constructions of these superstructure and concrete units, what the superstructure is made of. Further, there are described rubber materials, what the rail pads are made of. There have been carried out some kinds of experiments to describe suitably the hyperelastic properties of the rail pads. Due to these experiments have been obtained the constants describing the hyperelastic properties and behaviours. These measurements are described in the theoretical section of this dissertation. Analysis of stress of the rail pads has been carried out by using the computation software Samcef based on numerical finite elements method (FEM), which has been described in the theoretical section, too.

In the experimental section there have been carried out measurements of material characteristics of the rubber rail pads. Finite element models have been created based on measured material values by using FEM with different material parameters. The strength structural analysis has been carried out. Finally, there is given discussion of results for individual kinds of rubber rail pads with respect to their application in service.

# OBSAH

ÚVOD.....	7
<b>1 TEORETICKÁ ČÁST.....</b>	<b>9</b>
<b>1.1 Železniční doprava .....</b>	<b>9</b>
1.1.1 Výhody a nevýhody železniční dopravy .....	9
1.1.2 Stručná historie železniční dopravy.....	10
1.1.3 Konstrukce železniční tratě .....	10
1.1.4 Železniční spodek.....	11
1.1.5 Železniční svršek .....	11
1.1.6 Železniční svršek na betonových pražcích .....	14
1.1.7 Bezpodkladnicové upevnění kolejnic pružnými svěrkami Skl 14 (VOSSLOH).....	15
1.1.8 Funkce a vlastnosti pryžové podložky.....	16
<b>1.2 Kaučuk – základní surovina pro výrobu podložek.....</b>	<b>17</b>
1.2.1 Stručná historie objevů spojená s kaučukem.....	17
1.2.2 Chemické vlastnosti kaučuku .....	18
1.2.3 Gumárenské směsi.....	19
1.2.4 Rozdělení pryže podle stupně vulkanizace.....	20
1.2.5 Technická pryž .....	21
<b>1.3 Elastické vlastnosti pryže.....</b>	<b>22</b>
1.3.1 Ideální elasticita.....	22
1.3.2 Kaučuková elasticita.....	22
1.3.3 Kinetická teorie kaučukové elasticity.....	23
<b>1.4 Hyperelastické vlastnosti pryže.....</b>	<b>25</b>
1.4.1 Hyperelastický (Greenův elastický) materiál .....	25
1.4.2 Izotropní hyperelastické materiály .....	25
1.4.3 Funkce deformační energie pro izotropní materiály.....	26
<b>1.5 Fyzikálně - mechanické vlastnosti pryže .....</b>	<b>29</b>
1.5.1 Tahové vlastnosti.....	29
1.5.2 Lineární závislost napětí - deformace.....	30
1.5.3 Nelineární závislost napětí - deformace .....	31
1.5.4 Mechanická hystereze .....	32
<b>1.6 Zkušebnictví.....</b>	<b>33</b>
1.6.1 Tahová zkouška .....	33
1.6.2 Odrazová pružnost.....	35
1.6.3 Tvrdost.....	37
<b>1.7 Metoda konečných prvků.....</b>	<b>40</b>
<b>2 STANOVENÍ CÍLŮ DIPLOMOVÉ PRÁCE .....</b>	<b>43</b>
<b>3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST.....</b>	<b>44</b>
<b>3.1 Příprava zkušebních těles .....</b>	<b>44</b>
3.1.1 Příprava zkušebních těles pro tahovou zkoušku.....	45
3.1.2 Zkušební tělesa pro měření odrazové pružnosti a tvrdosti .....	48
<b>3.2 Tahová zkouška .....</b>	<b>49</b>
3.2.1 Popis principu tahové zkoušky .....	49
3.2.2 Postup při měření tahové křivky.....	50
3.2.3 Výsledky měření tahové zkoušky.....	50
<b>3.3 Linearizace tahové křivky.....</b>	<b>56</b>
3.3.1 Mooney – Rivlinova rovnice .....	56
3.3.2 Postup a výsledky linearizace tahových křivek.....	57
3.3.3 Výsledky měření linearizace – moduly pružnosti v tahu a ve smyku .....	62
<b>3.4 Měření tvrdosti Shore A.....</b>	<b>62</b>
3.4.1 Postup a výsledky měření tvrdosti Shore A.....	63
<b>3.5 Měření odrazové pružnosti podle Schoba .....</b>	<b>64</b>

3.5.1	Postup a výsledky měření odrazové pružnosti podle Schoba .....	64
<b>3.6</b>	<b>Modelování a pevnostní výpočet pryžových podložek pomocí MKP .....</b>	<b>65</b>
3.6.1	Metoda konečných prvků .....	65
3.6.2	Návrh a modelování pryžové podložky .....	66
3.6.3	Okrajové podmínky a zátěžné stavy .....	71
<b>4</b>	<b>DISKUSE VÝSLEDKŮ .....</b>	<b>98</b>
<b>4.1</b>	<b>Materiálové charakteristiky pryžových podložek .....</b>	<b>98</b>
4.1.1	Výsledky měření tvrdosti Shore A .....	98
4.1.2	Výsledky měření odrazové pružnosti podle Schoba.....	99
4.1.3	Výsledky tahové zkoušky .....	100
<b>4.2</b>	<b>Výsledky pevnostního výpočtu .....</b>	<b>102</b>
	<b>ZÁVĚR.....</b>	<b>104</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY .....</b>	<b>106</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK .....</b>	<b>108</b>
	<b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>	<b>CHYBA! ZÁLOŽKA NENÍ DEFINOVÁNA.</b>
	<b>SEZNAM TABULEK .....</b>	<b>CHYBA! ZÁLOŽKA NENÍ DEFINOVÁNA.</b>

## ÚVOD

Tlumicí prvky se používají v mnoha konstrukčních aplikacích pro jejich dobré tlumicí vlastnosti. Zpravidla jsou konstrukčně řešeny jako tlumiče určené k pohlcování energie a tak předcházení možnostem výskytu rezonancí v mechanických systémech. Většina tlumících prvků používaných v systémech s tlumením je vyrobena z pryže a to díky jejím unikátním hyperelastickým vlastnostem. Tlumicí pryžové prvky se používají v konstrukcích železničních tratí. Jedním z typů traťových tlumicích prvků je pryžová podkladová podložka. Ta je umístěna mezi vlastní ocelovou kolejnicí a betonovým pražcem, ke kterému je kolejnice upevněna. (1, 2)

Cílem diplomové práce bylo stanovit hyperelastické vlastnosti těchto pryžových podložek. Potom nasimulovat chování podložek při zatížení pro získání rozložení tenzoru napětí a deformace pro určení možného výskytu špiček napětí. Ty mají vliv na únavu materiálu, vznik trhlin a následné šíření trhliny vlivem opakovaného cyklického zatížení. K dispozici bylo několik druhů a typů pryžových podkladových podložek. Úkolem bylo pro tyto podložky naměřit materiálové hodnoty a vhodně je aplikovat na mechanicko-matematický model podkladové podložky, popisující její chování při statickém zatížení. Na základě získaných výsledků se pokusit vyhodnotit chování jednotlivých typů podkladových podložek v reálném provozu. Měření a výpočet hyperelastických vlastností byly prováděny pomocí série různých zkoušek pro získání potřebných materiálových konstant, které charakterizují hyperelastické chování pryží. Mezi tyto metody patří především tahová zkouška pryže, ve které se sleduje závislost napětí v tahu a příslušné deformace zkoumaného vzorku. Dále mezi ně patří tvrdost pryže, kdy se do daného vzorku vtlačuje ocelová kulička v určitém časovém intervalu a stanovení odrazové pružnosti pryže, kdy se sleduje množství energie pohlcené pryží při nárazu kyvadla. Po provedení těchto zkoušek jsme obdrželi potřebné materiálové konstanty, které charakterizují hyperelastické vlastnosti vzorků pryže, ze které jsou podkladové podložky vyrobeny. (3, 4)

Na závěr byly provedeny výpočty pomocí metody konečných prvků v software Samcef. CAD model podložky byl vytvořený v preprocesoru software, materiálové konstanty byly uvažovány a zadány podle výsledků experimentálních měření, okrajové podmínky a zatížení podkladové podložky byly simulovány s důrazem na reálné chování v provozních podmínkách. Získané výsledky rozložení tenzoru napětí a deformace určily místa napěťových

špiček u podkladové podložky. Z těch je možné odhadnout ve kterém místě může docházet k únavě materiálu a následnému šíření trhlin. (5, 6, 7)

Výsledkem diplomové práce je vhodná charakterizace jednotlivých tvarových typů podkladových podložek, odvozená od naměřených materiálových hodnot a nelineárního statického výpočtu. Z porovnání výsledků jednotlivých tvarových typů podkladových podložek lze odhadnout, která z podložek je vhodnější pro aplikaci do provozu. Komplexní popis vlastností daných pryžových podložek může sloužit jako dobrý základ pro další řešení jejich chování a napjatosti při dynamickém zatěžování. (8, 9)

Teoretická část diplomové práce je zaměřena na stručný popis železniční dopravy u nás, dále krátce na historii vývoje železničního svršku, do kterého zapadá i konstrukce železnice včetně aplikace pryžových podložek. Dále je uvedený popis různých druhů pryží, včetně popisu zkušebních metod, stručný úvod do teorií zabývajících se popisem hyperelastického chování pryže a v závěru základní popis a rovnice metody konečných prvků (MKP). V experimentální části jsou provedena měření a experimenty, vytvořeny MKP modely a provedeny numerické nelineární statické analýzy v software Samcef. (1, 2, 10)



# 1 TEORETICKÁ ČÁST

## 1.1 Železniční doprava

Železniční doprava stále patří ve světě mezi velmi populární cestovní přepravu, ať už osob (osobní), tak i materiálu (nákladní) a nadále bude mít vzestupnou tendenci díky výstavbě vysokorychlostních tratí. Ne jinak je tomu i v České republice, kde se dokonce nachází jedna z nejhustějších železničních sítí v Evropě. (11)

### 1.1.1 Výhody a nevýhody železniční dopravy

Mezi hlavní výhody železniční dopravy patří schopnost přepravit velké množství lidí (která se projevuje hlavně v okolí velkoměst či přímo na jejich území) či nákladu (ucelené vlaky, přeprava kontejnerů) najednou; možnost vysoké cestovní rychlosti, což ovšem záleží i na trasování tratí - v ČR je bohužel většina tratí v původních trasách 100 i více let starých. Vše ovšem směřuje k modernizaci stávajících tratí na rychlost nejméně 200 km/hod. Cílem těchto snah je vytvořit základní evropskou síť vysokorychlostních a k nim doplňkových tratí, které by pomohly naplnit myšlenku sjednocené Evropy - volný pohyb osob, kapitálu a zboží po celém území EU. (12, 13)

Mezi další výhody železniční dopravy patří:

- Větší pohodlí oproti automobilu či autobusu (využití času stráveného na cestě, lůžkové vozy, WC)
- Šetrnost k životnímu prostředí (dieselová vozidla vytvoří méně zplodin na jednoho cestujícího či na jednu tunu nákladu než automobil)
- Bezpečnost - díky zabezpečovacím zařízením a přísným předpisům má lidský faktor jen malou šanci selhat, navíc každý cestující může sám zastavit vlak pomocí záchranných brzd
- Železniční síť je po celé zemi navzájem propojená a přípoje na sebe kromě velkého zpoždění čekají
- Krátké jízdní doby v rámci velkoměsta (týká se železnice a metra)
- Menší nároky na stavební plochu železnice na rozdíl např. od silnic. (12)

- Nízká energetická spotřeba, která je zapříčiněna nízkým třením a valivým odporem na styku soustavy kolo-kolejnice.

Železniční doprava má ale i své nevýhody, mezi které patří:

- Ekonomická situace Českých drah u nás, která potom vede ke zdražování jízdného
- Občasné zpoždění vlaků (i když vlakové přípoje na menší zpoždění čekají)
- Dále zde patří již zmiňovaná zastaralost železničních tras a železničních vagónů u nás, která by se však měla do budoucna zlepšit modernizací a přestavbou na vysokorychlostní trasy a modernizací železničních souprav. (12)

### 1.1.2 Stručná historie železniční dopravy

V tomto odstavci jsou heslovitě zmíněny nejdůležitější události v historii vývoje železniční dopravy a to především u nás. (14)

- 15. století – vozíky na kolejkách ze dřeva
- 1602 – první železniční trať tažena koňmi a určena na převoz uhlí v Anglii
- 1801 – první veřejná koňská železnice
- 1824-1832 - první veřejná koňská železnice u nás
- 1804 – postavena první parní lokomotiva v Anglii
- 1903 – první elektrifikovaná trať u nás
- 1928-1932 – parní lokomotivy nazývané „Krasin“ po ruském ledoborci
- 1931 – první motorová lokomotiva
- 1961 – elektrické střídavé lokomotivy
- 60. léta – nejhustší železniční provoz u nás
- 70. léta – konec parních lokomotiv
- 1988 – zavedeno nové značení lokomotiv platné až dodnes

### 1.1.3 Konstrukce železniční tratě

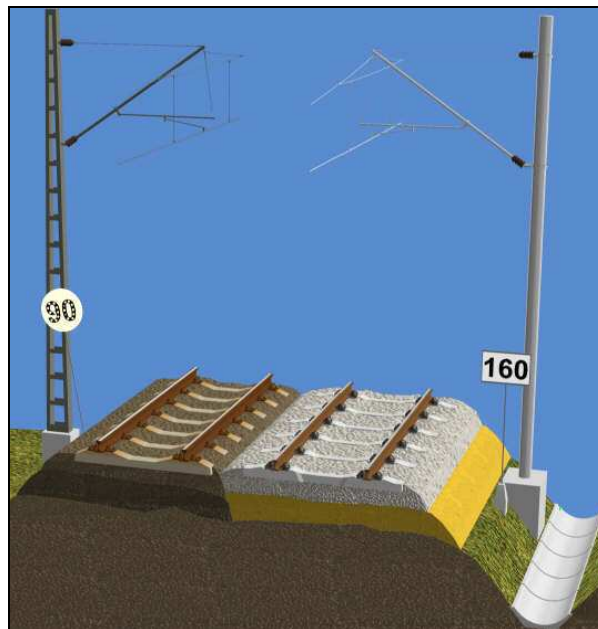
Železniční trať je místo na kterém dochází k vlastní přepravě železničních vozidel a dělí se na železniční spodek a železniční svršek. (13)

#### 1.1.4 Železniční spodek

Železniční spodek je tvořen vrstvou uválcované zeminy a geotextilií, která je přesypána jemným materiálem. Další vrstvu tvoří štěrk a nakonec svršek. U mostů na koridoru je vyžadováno tzv. "průběžné štěrkové lože", které bez přerušení pokračuje i na mostě a zvyšuje výrazným způsobem kvalitu jízdy, obzvláště při vyšších rychlostech. Samostatnou kapitolou je pak tzv., pevná jízdní dráha. Ta se zakládá na několika železobetonových deskách se zalitými spřaženými pražci. (1, 2)

#### 1.1.5 Železniční svršek

Železniční svršek představuje od doby vzniku železnice jednu z nejpodstatnější stavebních částí železniční tratě. Tvoří jízdní dráhu, která nese vozidlo. Základní součásti železničního svršku jsou kolejnice, vyhybky, upevňovadla, pražce a kolejové lože. V podmínkách železniční sítě České republiky prošly jednotlivé konstrukce železničního svršku dlouholetým vývojem a byly prověřeny provozní praxí. Velmi podstatný vliv na spolehlivou a bezproblémovou funkci železničního svršku a jeho jednotlivých součástí má nepochybně celá řada faktorů, jejichž působením je konstrukce vystavena. Za nejpodstatnější vlivy je třeba považovat především rychlost drážních vozidel a jejich působení na železničních svršek – velikost zatížení na nápravu a jízdní charakteristiky. (1,2)



Obr. 1. Průřez dvojkolejnou koridorovou tratí. (1)

## ***Kolejnice***

Je jednou ze základních částí železničního svršku. Přenáší kolovou sílu a absorbuje podélné síly (rozjezdová a brzdová). Při průjezdu vozidla obloukem přenáší příčnou sílu, tzv. vodící. Zajišťuje hladký pohyb železničního vozidla. Na elektrifikovaných tratích slouží jako vodič zpětného vedení. Tvoří kolejové obvody pro zabezpečovací zařízení.

Typy kolejnic dle četnosti používání: (1,15)

- širokopatní - pro železniční svršek
- žlábková - pro tramvajové tratě
- bloková - pro tramvajové tratě, vetknuté ve speciálních panelech.
- jeřábová

Tvary kolejnice se liší svými rozměrovými parametry. Ty následující se týkají širokopatní kolejnice. Označení se skládá z písmene (popřípadě několika písmen), které zkracuje původ nebo použití a z čísla, udávající hmotnost 1 metru kolejnice v kg. (15)

- S 49 - na našich regionálních tratích nejčtenější; S - z něm. Schiene (kolejnice); výška 129 mm; šířka paty 125 mm; šířka hlavy 67 mm; tloušťka stojiny 14 mm
- R 65 - běžná na celostátních tratích; R - z rus. рельс (kolejnice); výška 180 mm; šířka paty 150 mm; šířka hlavy 72,8 mm; tloušťka stojiny 18 mm
- UIC 60 - na koridorech; nahrazuje R 65; UIC - z franc. Union Internationale des Chemins de Fer (Mezinárodní železniční unie); výška 172 mm; šířka paty 150 mm; šířka hlavy 72 mm; tloušťka stojiny 16,5 mm
- T - na regionálních tratích; dnes již dožívají; T - těžký; výška 150 mm; šířka paty 128 mm; šířka hlavy 65,5 mm; tloušťka stojiny 15 mm; 50 kg/m

Základní materiálem pro výrobu kolejnic je ocel. V současnosti Třinecké železářny vyrábějí kolejnicovou ocel. Její pevnost v tahu je 880 až 1030 MPa a tažnost A5 max. 10 %. Obsah uhlíku se pohybuje od 0,6 do 0,8 % (S 49 až 1,4 %). Kolejnice na více zatížených tratích jsou legovány manganem (až 1,3 %), křemíkem (do 0,5 %) a dalšími prvky. (15)

Hlavním parametrem, podle něhož se dnes rozlišují kolejnice, je hmotnost kolejnice na 1 metr její délky. Ta se může pohybovat od několika kilogramů na průmyslových úzkokolejkách až po mnoho desítek kilogramů na hlavních tratích. (15)

Mezi kolejnicemi se dříve ponechávaly dilatační spáry. Dnes se kolejnice svařují a problém teplotní roztažnosti se řeší jejich předpětím. (15)

### ***Vyhybka***

Dříve se užíval pro vyhybku termín vexl. Je to drážní zařízení v místě, kde se dráhy (např. koleje) rozcházejí nebo sbíhají. Umožňuje jízdu vozidla (případě vedení kladky) do příslušného směru. Kolejová výhybka je součástí železničního svršku nebo svršku tramvajové, lanové, důlní či jiné dráhy. (16)

### ***Železniční pražec***

Je součástí železničního svršku, na níž jsou upevněny kolejnice. Kolejnice jsou jím nesený a drženy v pevné vzdálenosti (rozchod kolejí). Pražce jsou nejčastěji vyráběny ze dřeva nebo železobetonu. V počátcích stavby železnic byly prováděny pokusy i s pražci kamennými a v některých případech se též používají pražce ocelové. (2, 17)

### ***Kamenný pražec***

S kamennými pražci byly prováděny pokusy jen v samém počátku výstavby koňských železnic počátkem 19. století. Přesněji řečeno - nejednalo se o pražce v dnešním slova smyslu, ale o do země zapuštěné kamenné kvádry, v nichž byly prohlubně držící kolejnice. Jako materiál byl zkoušen snadno opracovatelný pískovec, ale i jiné druhy kamenů. Jejich navrhovatelé si od nich slibovali vyšší životnost ve srovnání se dřevem. Tento typ pražců se ale neosvědčil, protože poměrně křehké kameny se vydrolovaly a praskaly. (17)

### ***Dřevěný pražec***

Dřevěné pražce byly využívány od začátku existence železnic a svou roli hrají i dnes. Jsou vyráběny z kvalitního a dobře impregnovaného bukového, dubového nebo borového dřeva. Jiné druhy dřeva se neosvědčily. Proti ostatním materiálům je dřevo podstatně pružnější, a tudíž není tolik poškozováno vibracemi. Navíc se dá snadno opracovávat. Proto se dodnes dávají dřevěné pražce na kolejové styky a staví se z nich výhybky (17)

### *Betonový pražec*

Díky relativně nízké ceně betonu a dlouhé životnosti se ve druhé polovině 20. století začaly hromadně nasazovat železobetonové pražce. V současné době se v ČR používají zejména tyto typy: (17)

- SB8 - podkladnicové upevnění, sklon úložné plochy 1:20
- B91S - bezpodkladnicové upevnění, sklon úložné plochy 1:40

### *Ocelový pražec*

Ocelové pražce nebyly příliš oblíbené, a to především kvůli své ceně, Vyznačují se také vyšší hlučností. Ve větší míře se uplatnily na průmyslových dráhách a v Německu. (17)

### *Kolejové lože*

Je základní součástí železničního svršku konvenční trati. Materiálem je z pravidla štěrk. Může být použito přírodní drcené kamenivo (pro nové tratě pouze toto), recyklované kamenivo nebo umělé kamenivo. Tloušťka kolejového lože pod ložnou (spodní) plochou betonového pražce je min. 350 mm a dřevěného pražce 300 mm. (2)

#### **1.1.6 Železniční svršek na betonových pražcích**

Z důvodů nedostatku dřevěných pražců jsou u ČD používány od roku 1955 pro novostavby a obnovy kolejí betonové pražce. Betonové příčné pražce použité v kolejích ČD je možno rozdělit podle druhu a tvaru do těchto skupin: (2)

1. Pražce ze železového betonu (PAB2a)
2. Kloubové pražce tříčlankové (SB2)
3. Dvoublokové pražce s ocelovou spojovací tyčí (RS)
4. Pražce s předpjatého betonu

Velmi důležitým konstrukčním prvkem železničního svršku je upevnění kolejnic k betonovým pražcům. V praxi se využívá řada typů upevnění z nichž je v této práci uvažováno bezpodkladnicové upevnění kolejnic pružnými svěrkami VOSSLOH (B91, S/1, B91, S/2) znázorněno na obr. 2.

### 1.1.7 Bezpodkladnicové upevnění kolejnic pružnými svěrkami Skl 14 (VOSSLOH)

Jelikož je řešení napjatosti pryžových podložek uvažováno pro bezpodkladnicové upevnění pomocí svěrek od firmy VOSSLOH, je dále uveden podrobný popis právě tohoto typu upevnění kolejnic. (2)

V rámci výzkumného úkolu navrhla Železniční průmyslová stavební výroba a.s. Uherský Ostroh ve spolupráci s Ústavem pro vývoj a racionalizaci v Brně konstrukci předem předpjatého betonového pražce B91 pro bezpodkladnicové pružné upevnění kolejnic systém W14. (2)

U bezpodkladnicového upevnění kolejnic UIC 60 pružnými svěrkami Skl 14 je kolejnice uložena na pružné podložce umístěné na úložné ploše pražce. Pata kolejnice je fixována ve správné poloze pomocí úhlových vodících vložek Wfp 14k, které přenášejí příčné síly z paty kolejnice přímo do betonu pražce. Kolejnice je přitlačována vnějšími pracovními rameny pružné svěrky Skl 14. Střední rameno pružné svěrky leží v lůžku úhlové vodící vložky nad patou kolejnice a zajišťuje ochranu před naklopením či přizvednutím kolejnice. (2)

Upnutí kolejnice k pražci se provádí dotažením vrtule R1, jejíž hlava působí prostřednictvím ploché podložky Uls 7 na pružnou svěrku Skl 14. Vrtule je upevněna v pražci pomocí plastové hmoždinky vyrobené z polyamidu plněného skelnými vlákny. Na obr. 2 je znázorněno upevnění systémem W14. (2)



Obr. 2. Bezpodkladnicové upevnění pružnými svěrkami VOSSLOH (1)

Hlavním důvodem pro instalaci pružných svěrek jsou jejich vlastnosti. Pružným upevněním se totiž dosáhne snížení příčných tlaků, plynulejší jízdy a nižšího opotřebení svršku. Nezanedbatelným faktorem je i cena, ta pořizovací je sice o dost vyšší (import z Anglie, Německa), ale už po 7 až 8 letech se díky sníženým nákladům na údržbu začnou

pružné svěrky "dostávat do plusu". Intervaly mezi dotahováním jsou totiž u svěrek Skl 14 i Skl 12 mnohem delší, než u klasických žebrovek. Absolutním hitem na mnoha místech světa jsou dnes bezšroubové svěrky Pandrol FastClip, u nichž není údržba dokonce vůbec žádná. (1)

### **1.1.8 Funkce a vlastnosti pryžové podložky**

Pryžová (železniční) podložka je jeden z hlavních prvků při montáži kolejnic. Jak už bylo uvedeno výše, pryžová podložka se vkládá mezi pražec a samotnou ocelovou kolejnici a to téměř u všech typů upevnění kolejnic. (1, 2)

Mezi hlavní funkce těchto podložek patří redukce únavového praskání konkrétních pražců, které je způsobeno úderem a vibracemi od projíždějícího vlaku. Podložky v tomto případě fungují dvojnásobně: jednak snižují šokové a nárazové zatížení tím, že se prohýbají a také redukuje (izolací a tlumením) rezonanční vibrace vybuzené na pražcích (nejnižší rezonanční frekvence je okolo 200 Hz). Proto jsou navrženy tak, aby měly menší tuhost a velkou deformaci což umožňuje dobrý kontakt s železnicí a zabraňuje vertikálním pohybům. (18, 19)

Pryžové podložky mají jednu unikátní vlastnost – reagují na zvyšující se zátěž nelineárním chováním. V případě podložek s množstvím drážek ve tvaru válců, pokud je podložka stlačena, zmenšuje se prostor mezi jednotlivými drážkami a tuhost podložky jako odpověď na další zatížení stoupá. Strana podložky, jež je více zatížena, se stlačuje více a stává se tužší než strana, která je zatížena méně. (19, 20)

Mezi další funkce podložek patří také snižování abraze mezi kolejnicí a pražcem a také mohou poskytovat elektrickou izolaci. Většina pryžových podložek je vyrobena ze směsi přírodního kaučuku o tvrdosti Shore A 65-75. Jednotlivé vlastnosti se mohou nepatrně lišit dle výrobce. (21)

Na světě je několik firem, které se zabývají výrobou pryžových podložek pro železniční dopravu. Mezi nejznámější výrobce patří britská firma PANDROL, která se věnuje výrobě i jiných železničních komponent. (21)



## 1.2 Kaučuk – základní surovina pro výrobu podložek

Prudký rozvoj techniky, jehož jsme všichni svědky, vyžaduje pro svůj nynější i budoucí potenciál množství materiálu. Průmysl se vzrůstajícími kapacitami požaduje neustále větší množství hmot a k jejich výrobě potřebných surovin. (22)

Kaučuk zaujímá mezi základními průmyslovými surovinami přední místo pro své mnohostranné použití. Svými vlastnostmi se zásadně odlišuje od ostatních převážně tuhých materiálů, jako železa, kovů, lehkých slitin, plastických hmot, dřeva, kůže, keramických hmot, betonu a jiných hmot. I když všechny tyto materiály mají odlišné vlastnosti, lze při změně konstrukce někdy jeden druhým nahradit, avšak za kaučuk, který dal základ celým průmyslovým odvětvím, především automobilovému průmyslu, nenajdeme náhradu. (22)

Kaučukových výrobků se dnes používá pro jejich výhodné vlastnosti ve velkém množství ve všech oborech. Vynikají dobrými elektroizolačními vlastnostmi, malou vodivostí, nepropouštějí plyny a speciální druhy odolávají mnoha chemickým vlivům. Nejcennější je však jejich elasticita, pro niž je kaučuk nenahraditelný při výrobě pneumatik, dopravních pásů, těsnění, pružných spojek apod. (23)

Nenahraditelnost kaučuku byla vždy zřejmá v dobách mezinárodního napětí a válečných konfliktů, kdy tanky, děla, letadla, pontové mosty, plynové masky pohlcovaly ohromná kvanta kaučuku. Tak se stal kaučuk strategickou surovinou. (22)

### 1.2.1 Stručná historie objevů spojená s kaučukem

- 11. století – první poznání přírodního kaučuku v Jižní Americe, kde domorodci dovedli používat kaučuk a odkud se Evropa o kaučuku poprvé dozvěděla.
- 15. století – setkání Kryštofa Kolumbuse v Jižní Americe s domorodci provozujícími hry s míči připravenými vysušením bílého mléka vytékajícího z naříznutých zvláštních stromů, kterým domorodci říkali „hvěvé“.
- 16. století – španělské poznatky o výrobcích z kaučuku jako jsou nepromokavé oděvy obuv proti vodě
- 1791 – První patent v oboru zpracování kaučuku, udělen S. Pealovi za impregnaci textilu roztokem kaučuku v terpentýnové silici.
- 1811 – První větší dílna na zpracování kaučuku.
- 1823 – Patent na výrobu nepromokavých látek připravených slepením dvou textílů kaučukovým roztokem pro Macintosh.

- 1844 – Patent pro Goodyeara za zjištění aktivační účinky peroxidů – zahřívání kaučukové směsi se sírou.
- 1845 – Poprvé se začíná používat pojem vulkanizace.
- 1846 – Patent pro Hancocka za výrobu lisovaných výrobků ve formách.

## 1.2.2 Chemické vlastnosti kaučuku

Kaučuky (eleastomery) jsou polymery s mimořádně vysokou elastickou (zcela vratnou) deformací v rozmezí 100 – 1000 % - jsou označovány jako vysokoelastické a relativně měkké s modulem pružnosti okolo 1 MPa za normálních teplot. Jsou proto vysoce ohebné a odolné vůči oděru. Tyto vlastnosti se ještě zesílí slabým nasítováním. Za kaučuky můžeme považovat ty polymery, které splňují následující čtyři podmínky: (10, 24)

1. Mají délku řetězce  $p > 1000$  (kde  $p$  je polymerační stupeň) umožňující dostatečné „zapletení“ makromolekul zabraňující viskóznímu toku.
2. Mají amorfní strukturu v nedeformovaném stavu v důsledku snížené symetrie a zmenšení mezimolekulárních sil, což způsobuje velkou pohyblivost segmentů.
3. Mají teplotu skelného přechodu  $T_g < -40$  °C.
4. Musí mít možnost řídkého nasítování, které zabraňuje plastické deformaci při zatížení a tím umožňuje přechod od částečně plastické k čistě vysokoelastické deformaci.

Kaučuky po sesítování dávají materiály s vysokou elasticitou při pokojové teplotě. K dosažení požadovaných vlastností musíme nejprve připravit kaučukovou směs. Pro přípravu kaučukových směsí je k dispozici řada různých kaučuků a více než 23 tisíc chemikálií a přísad. (25)

Sítováním (vulkanizací) přechází termoplastická kaučuková směs v elastický vulkanizát. Vulkanizáty se vyznačují vysokou elasticitou, vysokou houževnatostí a vysokou odolností proti oděru. Kombinace s vlákny nebo s kovy dále rozšiřuje aplikační možnosti vulkanizátu. (25)

Kaučuky jsou nejdůležitější složkou gumárenských směsí. V rámci každého typu kaučuku často existuje řada druhů s poněkud odlišnými vlastnostmi. Některé vlastnosti můžeme ovlivnit použitím přísad. Přísady ovlivňují řadu vlastností současně. Důležitou vlastnost vulkanizátů představuje odolnost proti tepelnému stárnutí. Jako horní teplota použití se obvykle u kaučuku uvádí teplota, při které si vulkanizát zachová minimálně 50 % počáteční tažnosti a pevnosti v tahu po 1008 hodinách (6 týdnech) expozice. (25)

Základní dělení kaučuků je na přírodní a syntetický.

### ***Základní typy kaučuku***

BR – butadienový kaučuk

CR – chloroprenový kaučuk

EPDM – terpolymer ethylen – propylen – dien

IIR – butylkaučuk

IR – isoprenový kaučuk

NR – přírodní kaučuk

TPE – všeobecné označení pro termoplastické elastomery

Q - všeobecné označení pro silikonové kaučuky

### **1.2.3 Gumárenské směsi**

Jako gumárenskou směs označujeme směs kaučuku s přísadami. V gumárenských směsích se koncentrace označuje *dsk* (díly na sto dílů kaučuku) nebo *phr* (z angl., parts per hundred rubber). Základ gumárenské směsi tvoří 100 dílů kaučuku. Typická směs pro většinu nenasyčených sírou síťovaných kaučuků obsahuje na 100 dsk kaučuku: (26)

- 0-4 dsk síry
- 5 dsk ZnO
- 2 dsk starinu (stearan zinečnatý)
- 0,5-3 dsk urychlovačů
- 1-3 dsk antioxidantů
- 0-150 dsk plniv
- 0-150 dsk změkčovadel

Vulkanizační činidla jsou látky schopné zajistit v nepřilíš dlouhém čase sesíťování kaučukových molekul. Kaučuky s dvojnými vazbami je možno síťovat jak sírou, tak i peroxidy. (26)

## *Plniva*

Přítomnost plniv má významný vliv na vlastnosti vulkanizátu. Např. modul elasticity se oproti neplněným vulkanizátům obvykle zvýší cca desetinásobně. U většiny vulkanizátů zlepšují plniva také odolnost proti oděru. (10)

### **1.2.4 Rozdělení pryže podle stupně vulkanizace**

Reakcí se sírou, obvykle za zvýšených teplot, přechází kaučuk ze stavu převážně plastického do stavu převážně elastického a vytváří pryž. Tento pochod se nazývá vulkanizace a je doprovázen změnami původních vlastností kaučuků nebo kaučukové směsi, ať jsou to vlastnosti chemické, tepelné, fyzikální, mechanické nebo elektrické. (27)

Na velikost těchto změn má mimo jiné vliv především hmotnostní množství síry vázané na 100 hmotnostních dílů kaučuků, tzv. součinitel (koeficient) vulkanizace. (27)

Z mechanických vlastností je u přírodního kaučuku velmi charakteristickou vlastností pevnost. Závislost vykazuje dvě maxima. Spodní maximum představuje vulkanizát s 2 až 4 % vázané síry. Další zvyšování obsahu síry vyvolává „převulkanizovaný stav“, spojený se značným poklesem pevnosti, jež dosahuje nejnižší hranici asi při 8 až 10 % síry. S postupným zvětšováním obsahu síry pevnost vulkanizátu opět stoupá, asi při 20 až 24 % vázané síry, dosahuje prvního maxima, a jakmile koeficient vulkanizace vzroste na hodnotu kolem 50 %, vytváří křivka pevnosti druhé maximum, jehož hodnota zhruba trojnásobně převyšuje hodnotu prvního maxima ve spodní části křivky (27)

Podobné změny, vyvolané obsahem vázané síry, nastávají i u ostatních mechanických vlastností, což spolu s dalšími změnami umožňuje rozřadit vulkanizáty do tří skupin: (27)

#### **1. Měkká pryž**

Zahrnuje většinu výrobků gumárenského průmyslu, např. pneumatiky, dopravní pásy a řemeny, hadice, pryžovou obuv a podstatnou část vlastní technické pryže. Vulkanizační koeficient se pohybuje u těchto výrobků převážně mezi 2 až 3 % vázané síry. Vlastnosti vulkanizátů se mění podle složení směsi. Maximální pevnost dosahuje 25 až 30 MPa, tažnost v průměru 400 až 600%, tvrdost lze měnit v rozmezí 20 až 95 Sh. Elastické vlastnosti jsou vysoké, rovněž odolnost proti oděru a odolnost proti dynamickému namáhání. Výrobky se vyznačují dobrou odolností proti stárnutí.

## 2. Polotvrdá pryž

Zahrnuje oblast vulkanizátů s vulkanizačním koeficientem od 4 až 6 do 25 % vázané síry. Vulkanizáty běžných typů kaučuků mají špatné mechanické vlastnosti včetně odolnosti proti stárnutí. Odolnost proti dynamickému namáhání je nízká. Postupný vzrůst tvrdosti, spojený s úbytkem tažnosti a elasticity, jim dodává kožovitého charakteru.

## 3. Tvrdá pryž

Získává se vulkanizací kaučuku za přítomnosti ještě většího obsahu síry, takže vulkanizační koeficient se pohybuje nad 25 % vázané síry, přičemž jeho mezní obsah síry je dán druhem použitého kaučuku. Vulkanizáty se vyznačují rohovitou konzistencí a k přesnějšímu stanovení jejich tvrdosti je již třeba přístrojů používaných v metalurgii (stupnice tvrdosti podle Brinella). Mohou se různým způsobem opracovávat. Pevnost v tahu mají podstatně větší než měkká pryž, tažnost však minimální. V důsledku vysokého obsahu vázané síry dochází k nasycení dvojných vazeb kaučukového uhlovodíku, což je provázeno velmi dobrou odolností proti stárnutí a podstatně zvýšenou odolností proti kyselinám, zásadám a ostatním chemikáliím. Jejich charakteristickým znakem jsou výborné elektroizolační vlastnosti.

### 1.2.5 Technická pryž

Výroba technické pryže se liší od mnoha odvětví gumárenského průmyslu. Protože má velmi bohatý sortiment výrobků, používá se nejrozmanitějších materiálů, způsobů opracování i technologických postupů. Podle účelu použití lze technickou pryž rozdělit na tyto skupiny: (28)

1. Vybavení pro pohyblivá zařízení – hnací řemeny, dopravní pásy, elevátorové pásy, pásy pro dopravu osob, housenkové pásy aj.
2. Vybavení pro dopravní zařízení pracující pod tlakem nebo pod vakuem – tlakové a podtlakové hadice.
3. Pružné výrobky vystavené dynamickému namáhání – pryžové závěsy, pružná uložení, ložiska, pryžové tlumiče a nárazníky, těsnění pohybujících se součástí, ucpávky, manžety, ventily, membrány, pryžové povlaky válců.
4. Pryžová těsnění pro statické namáhání – těsnící kroužky, šňůry a desky

5. Elektroizolační materiál a výrobky – akumulátorové skříně, součásti pro slaboproudá a vysokofrekvenční zařízení, tvrdá pryž na drobné výrobky, polotuhé izolační trubky, izolační pásy.
6. Pryžové ochranné obklady chemického zařízení.
7. Prostředky pro vzduchoplavbu a plavbu po vodě.
8. Zboží denní spotřeby, jako míče, hračky, sportovní nářadí, zdravotní a hygienické prostředky, spodkový materiál a spodkové dílce obuvi, pogumované tkaniny na nepromokavé pláště, lepidla atd.

## 1.3 Elastické vlastnosti pryže

### 1.3.1 Ideální elasticita

Krystalické látky a kovy se pod účinkem vnější síly deformují prakticky okamžitě a mezi silou a jí odpovídající deformací existuje přímá úměrnost. Takové deformační chování se označuje jako ideálně elastické a vztah mezi silou a deformací formuluje Hookův zákon. Látky blížící se ideálu se deformují téměř atermicky. Youngův modul pružnosti  $E$  je téměř teplotně nezávislý s rostoucí teplotou mírně klesá (diamant, kovy, anorg. skla). Mají malou deformaci (desetiny %). (4, 29)

Jsou to látky s částicemi pevně uloženými v rovnovážných polohách (pohyb částic omezen jen na kmity kolem rovnovážné polohy). Mají mnohem větší modul  $E$ , mnohem větší objemový modul  $K$ , poissonovu konstantu  $\nu = 0,25-0,33$  než u polymerů. (29)

### 1.3.2 Kaučuková elasticita

Elasticita pryže se odlišuje od ideální elasticity kovů a krystalů v těchto nejvýznačnějších rysech: (29)

1. Dosažitelné deformace jsou veliké, mnohonásobně vyšší než u ideálně elastických látek. Tažnost (protažení při přetržení) dosahuje několika set procent původní délky.
2. Závislost napětí na deformaci je lineární jen v oblasti malých deformací. Hookův zákon platí při smykové deformaci přibližně, při protahování jen v oblasti prvních několika procent. Tvar závislosti napětí na protažení má zpravidla charakteristický esovitý průběh

3. Pryž se deformuje již účinkem malých sil. Poměr napětí a deformace v oblasti malých deformací (modul pružnosti) je asi desettisíckrát menší než u ideálně elastických látek a má řádovou hodnotu 1 MPa.
4. Deformace pryže je časově závislá. Elastické deformační změny tu probíhají s určitým zpožděním, protože jsou bržděny vnitřními viskózními odpory uvnitř kaučukové hmoty. Deformační chování pryže má obecně elastické i viskózní projevy současně. Takové chování se označuje jako viskoelastické. Dnes je už plně dokázáno, že viskoelastická pryže určuje nejen zvláštnosti jejího chování deformačního, ale že podmiňuje i některé zvláštnosti a komplikovanost jejího chování destruktivního (pevnosti, tažnosti, strukturní pevnosti, odolnosti proti odírání apod.).
5. Hlavní důsledky viskoelastického chování charakteru deformace pryže jsou:
  - Relaxace napětí při konstantní deformaci. Protáhne-li se vzorek pryže rychle na určité protažení (nebo se deformuje jakýmkoli jiným způsobem, např. ve smyku, tlaku, torzi, ohybu aj.), které se pak udržuje v průběhu času na konstantní hodnotě, pak napětí potřebné k udržování tohoto konstantního protažení v průběhu času klesá, uvolňuje se neboli relaxuje a blíží se nějaké rovnovážné hodnotě.
  - Růst deformace s časem při konstantním napětí – creep (tečení). Při vložení konstantního napětí na pryžový vzorek se dosti rychle ustaví jistá deformace, ale ta v dalším časovém průběhu vzrůstá. Tento děj se označuje jako creep. Po odtížení se vzorek pryže dosti rychle vrátí směrem k původnímu tvaru; tomuto pochodu se často říká zotavení. Zotavení není však úplné, zbývá tu jistá zbytková deformace, která se postupně během doby, kdy se vzorek nechá odležet, zmenšuje.
  - Hystereze - při závislosti napětí na protažení stanovená při konstantní rychlosti protahování a při bezprostředně následujícím zmenšování protažení opět touž rychlostí není průběh křivek totožný. Plocha mezi křivkou *a* a osou protažení udává deformační práci vynaloženou při protahování, plocha pod křivkou *b* značí energii získanou zpátky při zpětném pochodu, retrakci. Část energie vložené na deformaci se ve hmotě ztratí a přemění na teplo. Mírou hysterezních ztrát je plocha mezi křivkami *a* a *b* (hysterezní smyčka).

### 1.3.3 Kinetická teorie kaučukové elasticity

Kinetická teorie kaučukové elasticity vychází při odvození vztahu mezi napětím a prodloužením - na rozdíl od Mooney-Rivlinovy rovnice uvedené dále - z molekulární

představy. Strukturu vulkanizátu se zjednodušuje na ideální trojrozměrnou síť. V ideální síti jsou všechny řetězy stejně dlouhé, z každého uzlového bodu sítě (příčné vazby) vycházejí čtyři řetězy a každý řetěz sítě je na obou stranách zakotven v uzlovém bodě. (23, 29)

Kinetická teorie pak tento model zpracovává metodami statistické mechaniky; předpokládá, že řetězy sítě se za klidu nacházejí ve statisticky nejpravděpodobnější konformaci a že při deformaci se dodaná energie spotřebuje na změnu jejich tvaru ve směru působící síly. Po odtížení se řetězce v důsledku tepelného (kinetického) pohybu cestou vnitřních rotací vracejí do původního tvaru a síť zaujme původní tvar. Výsledné rovnice jsou jednoduché. Při smykové deformaci má být napětí přímo úměrné deformaci:

$$\frac{F}{A_0} = G_{teor} \cdot \gamma \quad (1)$$

což v praxi dosti dobře platí. Závislost vypočítaná pro jednosměrné protažení je zakřivena směrem k ose protažení

$$\frac{F}{A_0} = G_{teor} (\alpha - \alpha^{-2}). \quad (2)$$

Tuhost ideální sítě je tedy podle kinetické teorie určena jedinou konstantou, modulem  $G_{teor}$ . Tato teorie dále vypočítává, že rovnovážný smykový modul  $G_{teor}$  je úměrný absolutní teplotě a počtu řetězců sítě v objemové jednotce.

Jak už bylo řečeno, skutečné neplněné vulkanizáty se v praxi řídí podle Mooney - Rivlinovy rovnice a ta je složitější než výsledek kinetické teorie. Ze srovnání obou rovnic dále vyplývá, že první člen Mooney-Rivlinovy rovnice, člen s konstantou  $C_1$ , má tutěž závislost na deformačním poměru  $\alpha$ , jakou předvídá kinetická teorie. Proto se obvykle předpokládá, že první člen uvedené rovnice představuje vlastní rovnovážný kinetický podíl měřeného napětí a že člen obsahující konstantu  $C_2$  je mírou odchylek od kinetické teorie elasticity. Za takového předpokladu pak platí:

$$2C_1 = \nu RT \quad (3)$$

v je v tomto případě síťová hustota skutečného vulkanizátu a rovnice představuje její definiční rovnici. Síťová hustota vypočítaná z rovnice na základě experimentálně nalezené hodnoty  $C_1$  při koncentraci těch řetězců sítě, které se při deformaci vulkanizátu projevují jako elasticky účinné, je tedy jakousi efektivní hodnotou stupně zesíťování u skutečných vulkanizátů, jejichž struktura se samozřejmě od idealizované představy může značně lišit. (23,29)

Síťová hustota, jak se tohoto pojmu dnes v gumárenství používá, není tedy vlastně nic jiného než jistá část napětí změřeného u neplněných vulkanizátů (popř. jistá část smykového



nebo tahového modulu pružnosti), převedená do molekulárních rozměrů podělením hodnotou  $RT$ . (23, 29)

Mooney-Rivlinova rovnice pak umožňuje rozdělit měřené napětí na dvě části, na člen odpovídající síťové hustotě a na člen obsahující konstantu  $C_2$ , který je způsoben odchylkami od teorie. Příčiny těchto odchylek nejsou ještě objasněny; zda se, že se na nich podílejí pomalé přesuny některých fyzikálních vazeb. Bylo zjištěno, že odchylky od kinetické teorie se zmenšují u vulkanizátů, které byly po vulkanizaci zbobtnány nízkomolekulárním rozpouštědlem. (29)

## 1.4 Hyperelastické vlastnosti pryže

### 1.4.1 Hyperelastický (Greenův elastický) materiál

Materiály, které mají schopnost dosahovat velkých vratných deformací se nazývají hyperelastické. Hystereze je v ideálních hyperelastických materiálech malá a zanedbatelná. Hyperelastický model materiálu je založen na existenci potenciálové funkce, též nazývané funkce deformační energie, která roste s deformací a jejím argumentem je deformační gradient (36)

$$W = W(F) \geq 0 \quad (4)$$

Mechanické vlastnosti takových materiálů jsou definovány derivací funkce deformační energie  $W$ ; platí pro ně výraz

$$P = \frac{\partial W(F)}{\partial F} \quad (5)$$

### 1.4.2 Izotropní hyperelastické materiály

Předpokládejme, že materiál má ve všech směrech stejné vlastnosti (izotropní materiál). (36)

#### *Konstitutivní vztah vyjádřený v závislosti na invariantech*

Funkci deformační energie lze vyjádřit jako funkci invariantů pravého či levého Cauchyho tenzoru deformace

$$W = W(I_1(C), I_2(C), I_3(C)) = W(I_1(B), I_2(B), I_3(B)) = W(I_1, I_2, I_3), \quad (6)$$

kde  $C$  a  $B$  jsou Cauchyho tenzory deformace a  $I_1, I_2$  a  $I_3$  jsou definovány pomocí hlavních protažení

$$\begin{aligned}
I_1 &= \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2 \\
I_2 &= \lambda_1^2 \lambda_2^2 + \lambda_2^2 \lambda_3^2 + \lambda_3^2 \lambda_1^2 \\
\text{a } I_3 &= \lambda_1^2 \lambda_2^2 \lambda_3^2
\end{aligned} \tag{7}$$

Druhý Piola-Kirchhoffův  $S$  tenzor napětí vyjádřený pomocí invariantů, pro izotropní hyperelastický materiál je dán výrazem

$$S = 2 \frac{\partial W(C)}{\partial C} = 2 \left[ \left( \frac{\partial W}{\partial I_1} + I_1 \frac{\partial W}{\partial I_2} \right) I - \frac{\partial W}{\partial I_2} C + I_3 \frac{\partial W}{\partial I_3} C^{-1} \right] \tag{8}$$

kde  $I$  je jednotkový tenzor a druhý Piola-Kirchhoffův tenzor napětí  $S$  je definován:

$$S = J F^{-1} \sigma F^{-T} \tag{9}$$

Někdy je výhodnější využít přímo Cauchyho tenzoru napětí  $\sigma$ , který je dán výrazem

$$\sigma = 2J^{-1} \frac{\partial W(B)}{\partial B} B = 2J^{-1} \left[ \left( I_2 \frac{\partial W}{\partial I_2} + I_3 \frac{\partial W}{\partial I_3} \right) I - \frac{\partial W}{\partial I_1} B - I_3 \frac{\partial W}{\partial I_2} B^{-1} \right] \tag{10}$$

kde  $J$  je Jakobián a je to determinant matice složené z parciálních derivací prostorových souřadnic.

### ***Funkce deformační energie vyjádřená v závislosti na hlavních protaženích***

Jako alternativu funkce deformační energie izotropního elastického materiálu definovanou pomocí invariantů lze funkci deformační energie vyjádřit pomocí hlavních protažení  $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$  a  $\lambda_3$  (36)

$$W = W(C) = W(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3) \tag{11}$$

potom druhý Piola-Kirchhoffův tenzor napětí  $S$  lze vyjádřit

$$S = 2 \frac{\partial W(C)}{\partial C} = \sum_{i=1}^3 \frac{\partial W \partial \lambda_i^2}{\partial \lambda_i^3 \partial C} = \sum_{i=1}^3 \frac{1}{\lambda_i} \frac{\partial W}{\partial \lambda_i} {}^0 N^{(i)} {}^0 N^{(i)T} \tag{12}$$

kde  ${}^0 N^{(i)}$  je vektor hlavních směrů pravého Cauchy tenzoru deformace  $C$  odpovídající hlavnímu protažení  $\lambda_i$ .

### **1.4.3 Funkce deformační energie pro izotropní materiály**

#### ***Mooney model***

Mooney-Rivlinův materiálový model byl publikován již v roce 1940. Popisuje lineární

vztah mezi napětím a deformací ve smyku, (36)

$$W = \frac{G_M}{4} \sum_{i=1}^3 \left( \lambda_i - \frac{1}{\lambda_i} \right)^2 + \frac{H_M}{4} \sum_{i=1}^3 \left( \lambda_i^2 - \frac{1}{\lambda_i^2} \right) \quad (13)$$

kde  $G_M$  je nazýván modul tuhosti a  $H_M$  je konstanta vyjadřující symetrii funkce deformační energie k převráceným hodnotám deformace  $\frac{1}{\lambda_1}, \frac{1}{\lambda_2}, \frac{1}{\lambda_3}$ .

### ***Mooney-Rivlinův model***

Rivlin v roce 1948 rozšířil Mooneyovu funkci deformační energie do tvaru

$$W = \frac{1}{2} \mu_{MR} (I_1 - 3) + f(I_2 - 3) \quad (14)$$

kde  $\mu_{MR} = 2C_1$  vyjadřuje smykový modul a  $f$  je nespécifikovaná funkce druhého invariantu pravého Cauchyho tenzoru deformace, pro kterou platí  $f(0) = 0$ .

Bylo ukázáno, že výraz (13) lze vyjádřit jako nekonečnou řadu funkcí invariantů  $I_1$  a  $I_2$

$$W = \sum_{m,n=0}^{\infty} C_{mn} (I_1 - 3)^m (I_2 - 3)^n \quad (15)$$

kde  $C_{00} = 0$ .

Mooney-Rivlinovu funkci s dvěma parametry lze tedy psát

$$W = C_1 (\lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2 - 3) + C_2 \left( \frac{1}{\lambda_1^2} + \frac{1}{\lambda_2^2} + \frac{1}{\lambda_3^2} - 3 \right) = C_1 (I_1 - 3) + C_2 (I_2 - 3) \quad (16)$$

kde  $I_1$  a  $I_2$  jsou první respektive druhý invariant pravého Cauchyho tenzoru deformace a  $C_1, C_2$  jsou dva parametry pružnosti

$$C_1 = \frac{G_M + H_M}{4}, \quad C_2 = \frac{G_M - H_M}{4} \quad (17)$$

### ***Neo-Hookeovský model***

Funkce deformační energie má tvar

$$W = \frac{1}{2} \mu_{NH} (I_1 - 3) \quad (18)$$

kde  $\mu_{NH}$  je modul pružnosti ve smyku (parametr používaný pro nestlačitelné materiály) a  $I_1$  první invariant.

Tento jednoduchý tvar funkce deformační energie poskytuje první přiblížení vlastností pryžových materiálů, jehož předností je jednoduchost matematického zpracování. Poskytuje také dobrou shodu s experimentálními daty až do hodnoty 45 % deformace v tahu. (36)

### ***Vargův model***

Funkci deformační energie vyjadřuje vztah

$$W = \mu_v (\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 - 3) \quad (19)$$

kde  $\lambda_1, \lambda_2$  a  $\lambda_3$  jsou hlavní protažení a  $\mu_v$  je modul pružnosti ve smyku.

### ***Yeohův model***

Yeohův model je vhodný pro materiál, v němž se modul pružnosti ve smyku výrazně mění s deformací. Z počátku má klesající tendenci, avšak při velkých deformacích se tendence mění na stoupající. Funkce deformační energie je vyjádřena ve tvaru

$$W = c_1(I_1 - 3) + c_2(I_1 - 3)^2 + c_3(I_1 - 3)^3 \quad (20)$$

kde pro konstanty platí  $c_2 < 0$ ,  $c_1 > 0$  a  $c_3 > 0$ .

### ***Ogdenův model pro izotropní materiál***

Je vhodný pro popis nestlačitelného materiálu (s Jakobiánem deformace  $J = 1$ ). Deformační energie je vyjádřena pomocí hlavních protažení  $(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3)$  ve tvaru

$$W = W(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3) = \sum_{p=1}^N \frac{\mu_p}{\alpha_p} (\lambda_1^{\alpha_p} + \lambda_2^{\alpha_p} + \lambda_3^{\alpha_p} - 3) \quad (21)$$

kde  $N$  je počet členů,  $\mu_p$  smykové moduly a  $\alpha_p$  jsou experimentální parametry.

Poznamenejme, že:

pro  $N = 2$ ,  $\alpha_1 = 1$ ,  $\alpha_2 = -2$  se jedná o Mooney-Rivlinův model

pro  $N = 1$ ,  $\alpha_1 = 2$  se jedná o Neo-Hookeovský model

pro  $N = 1$ ,  $\alpha_1 = 1$  se jedná o Vargův model.

## 1.5 Fyzikálně - mechanické vlastnosti pryže

### 1.5.1 Tahové vlastnosti

Tahová zkouška je jednou s prvních zkoušek, podle které se hodnotí pevnost materiálu. Na zkušební těleso působí stále se zvětšující síla, až dojde po určité deformaci k přetržení – destrukci materiálu. Pevnost v tahu je vyjádřena silou, vztaženou na jednotkový průřez - tedy napětím potřebným k přetržení hmoty. Zavedením dokonalých systémů snímání napětí a deformace a jejich grafickým záznamem jsou získávány pracovní diagramy, kde celá tahová křivka poskytuje širší a přesnější informaci o deformačním chování materiálu za různých podmínek zkoušení. (3, 4)

Deformaci tahem můžeme znázornit na hranolu v pravoúhlých souřadnicích, jehož původní průřez  $A_0$  je dán součinem šířky a výšky:

$$A_0 = b_0 \cdot h_0 \quad (22)$$

Působí-li na plochu  $A_0$  při jednosměrném tahu síla  $F$ , vzniká v tělese tahové napětí

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \quad (23)$$

hranol se začne deformovat a s tím i měnit původní rozměry. Při dosažení meze pevnosti materiálu dochází k přetržení tělesa. (4)

S prodloužením tělesa se mění jeho původní délka  $l_0$  na délku  $l$  a tuto délkovou změnu definujeme jako poměrné (relativní) prodloužení:

$$\varepsilon = \frac{l - l_0}{l_0} = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (24)$$

Zmenšení průřezu obdobně vyjadřujeme poměrným zkrácením základny nebo výšky hranolu:

$$\varepsilon_b = \frac{\Delta b}{b_0} \quad (25)$$

Vztah mezi poměrným zkrácením a poměrným prodloužením je tzv., poissonův poměr:

$$\nu = \frac{\varepsilon_b}{\varepsilon} \quad (26)$$

který charakterizuje do určité míry změnu objemu zkoušeného materiálu vzhledem k jeho protažení. Změna objemu je dána vztahem:

$$\frac{\Delta V}{V_0} \approx (1 - 2\nu) \frac{\Delta l}{l_0} \quad (27)$$

kde  $\nu$  může dosáhnout v případě, že se objem nemění největší hodnoty 0,5. Většinou se průřez zmenšuje méně než by odpovídalo protažení, objem vzrůstá a hodnoty jsou pak menší než 0,5. Elastomery - např., přírodní kaučuk - neměnní až do šestinásobného protažení objem - je nestlačitelný, má  $\nu = 0,500$ . (4)

Z hlediska deformačního chování nás především zajímá změna délky zkoušeného tělesa během namáhání až do jeho přetržení. Zavádí se pojem protažení. Poměrná deformace se vyjadřuje zlomkem  $(\Delta l/l_0)$ , protažení se označuje

$$\varepsilon_l = \frac{l - l_0}{l_0} \cdot 100 = \frac{\Delta l}{l_0} \cdot 100 \quad (28)$$

podobně jako mezní hodnota deformace - protažení při přetržení - krátce označována jako tažnost. Je důležitou fyzikální veličinou z hlediska konstrukčních vlastností polymerů:

$$\varepsilon_t = \frac{l_t - l_0}{l_0} \cdot 100 \quad (29)$$

kde  $l_t$  je délka tělíska při přetržení. (4)

### 1.5.2 Lineární závislost napětí - deformace

Budeme-li protahovat tzv. ideálně elastický materiál v oblasti malých deformací, zjistíme, že poměr mezi vzrůstajícím napětím a vzniklou příslušnou deformací je mezi jednotlivými dvojicemi konstantní. (4, 29)

Konstantou úměrnosti mezi napětím a deformací nazýváme modulem pružnosti  $E$  (Youngovým modulem) a vztah Hookovým zákonem:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (30)$$

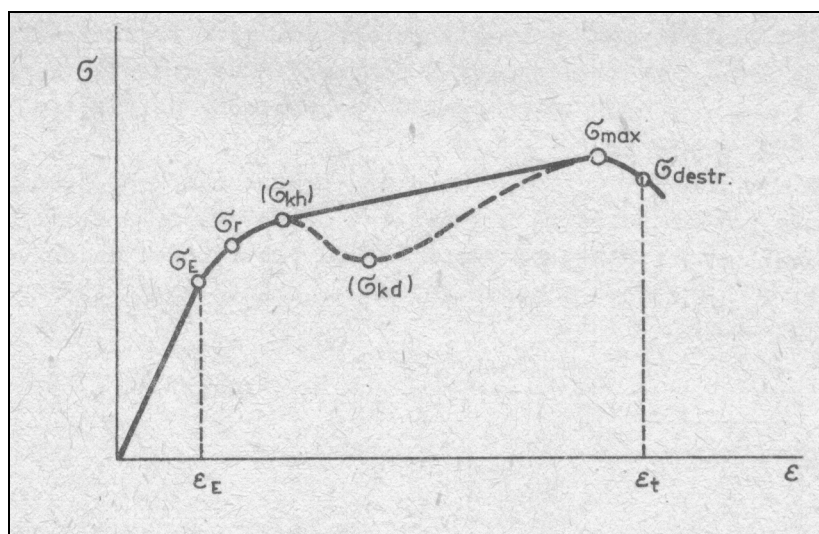
Modul  $E$  není u ideálně elastického tělesa závislý na velikosti použitého napětí nebo naopak na velikosti použité deformace. V grafu napětí - deformace je module  $E$  dán hodnotou směrnice jednotlivých přímk. Modul pružnosti se stanovuje z tahových křivek jen u takových materiálech, kde lze příslušný úsek napětí a deformace v lineární části křivky přesně odečíst. Modul pružnosti u běžných druhů pryží leží v rozmezí asi 1-5 MPa. (4)

### 1.5.3 Nelineární závislost napětí - deformace

Většina tuhých polymerů vykazuje již od samého počátku nelineární průběh závislosti zatížení na deformaci. Elastomery, hlavně vulkanizované kaučuky, se vyznačují z počátku nelineárním, esovitým, plynulým průběhem tahové křivky, u těchto materiálů je žádoucí charakterizovat jejich tuhost modulem. Používá se zde tzv. modul protažení neboli gumárenský modul  $M_x$  a je definován jako napětí vztažené na původní průřez vzorku, potřebné k protažení o určitou smluvní hodnotu, např. o 100 %, 300 %, 600 % apod. Hodnota protažení se uvádí příslušným číslem, např. M100, M300, M600 apod. (4, 10)

Obr. 3 charakterizuje obecnou tahovou křivku polymeru, na které se vyskytují všechny možné napěťové a deformační meze. Bod na křivce, kde končí hookovské chování je mez úměrnosti  $\sigma_E$  a vyjadřuje se smluvním napětím:

$$\sigma_E = \frac{F_E}{A_0} \quad (31)$$



Obr. 3. Obecná tahová křivka (4)

Zakřivení vznikající v dalším průběhu křivky zahrnuje již časově závislou elastickou a plastickou deformaci. Místo, do kterého je ještě tato deformace vratná je mez pružnosti  $\sigma_r$ :

$$\sigma_r = \frac{F_r}{A_0} \quad (32)$$

Z tohoto bodu se po odlehčení napětí vrací deformace do původního stavu. (4)

Zvětšuje-li se napětí nad mez úměrnosti, obvykle hodnota  $\Delta\sigma/\Delta\varepsilon$  klesá. Zatímco napětí stoupá pomalu, deformace se rychleji zvětšuje. Nastává zde převážně nevratná plastická

deformace, hodnota  $\Delta\sigma/\Delta\varepsilon$  je poprvé nulová. Tomuto přechodu říkáme mez kluzu  $\sigma_k$ . Projevili s na křivce za tímto bodem snížení napětí, je to horní mez kluzu  $\sigma_{hk}$ , zatímco na pokračující křivce místo minimálního napětí je dolní mez kluzu  $\sigma_{kd}$ . Za dolní mezi kluzu vzrůstá opět napětí do určité maximální hodnoty  $\sigma_{max}$ , kde se těleso buď přetrhne nebo nastává za touto mezí porušením soudržnosti další pokles napětí až k  $\sigma_{destruk}$ , kdy dojde k přetržení. (4)

Dojde-li k přetržení za mezí pružnosti, kdy ještě nedochází k tak velkému protažení materiálu, označujeme tento lom jako křehký. Předchází-li však velká deformace, jak je tomu u orientovatelných polymerů nebo kaučuků, dochází k tzv., tažnému lomu. Mez pevnosti v tahu, krátce nazývaná pevnost v tahu je definovaná jako napětí potřebné k přetržení, vztahované na původní průřez, nebo krátce jako smluvní napětí potřebné k přetržení. Pro výpočet se vždy dosazuje maximální hodnota  $F_{max}$ , i když k destrukci došlo později při nižším napětí:

$$\sigma = \frac{F_{max}}{A_0} \quad (33)$$

#### 1.5.4 Mechanická hystereze

Kaučuky a jejich vulkanizáty, schopné velkých vratných deformací, vykazují mechanickou hysterezi. Protahuje-li se vzorek na určitou předem zvolenou hodnotu deformace, pak při opětné klesající deformaci neklesá napětí po téže křivce, ale je v celém rozsahu nižší. Mezi oběma křivkami vzniká tzv. hysterezní smyčka, která je mírou ztrát deformační energie a její přeměny v teplo. Tyto hysterezní ztráty jsou v přímém vztahu k mechanickým ztrátám, které vznikají při sinusově probíhajících dynamických zkouškách, vyjádřeným např. tangentou ztrátového úhlu. (4, 29)

Plocha hysterezní křivky  $A_e$  udává práci potřebnou k provedení deformace. Velikost hystereze posuzujeme podle hysterezích ztrát, vyjádřeným poměrem plochy hysterezní smyčky  $A_h$  k celkové práci, vynaložené na provedení deformace. Tento poměr nazýváme poměrná statická hystereze a vyjadřuje se v %:

$$H_\varepsilon = \frac{A_h}{A_e} \cdot 100 \quad (34)$$



Poměr mezi vrácenou prací  $A_r$  a prací dodanou  $A_\varepsilon$  je tzv., tahová pružnost, což je vlastně statická resilience:

$$R_\varepsilon = \frac{A_r}{A_\varepsilon} \cdot 100 \quad (35)$$

Plocha tahové křivky odpovídá celkové deformační práci potřebné k protažení resp., v případě přetržení zkušebního tělesa k destrukci materiálu. Je dána vztahem:

$$A_\varepsilon = \int_0^{\varepsilon_{\max}} \sigma \cdot d\varepsilon \quad (36)$$

a vyjadřuje odpor materiálu proti přetržení, jeho houževnatost.

V příloze jsou uvedeny na obr. I až IV hysterezní smyčky a cyklické deformační křivky.

## 1.6 Zkušebnictví

### 1.6.1 Tahová zkouška

#### *Vliv rychlosti deformace*

Při tahových zkouškách je většina typů zkušebních přístrojů konstruovaná tak, že je jedna z čelistí spojena s mechanický posuvem a druhá s měřením síly. Ideální stav je takový, při němž čelist spojená s měřením síly je naprosto nepohyblivá, zatím co druhá se pohybuje konstantní rychlostí nezávislou na napětí. Rychlost posuvné čelisti je měnitelná v určitém požadovaném rozmezí, u polymerů se používá rozsah od 1-500 mm/min. (4, 23)

#### *Faktory ovlivňující tahové vlastnosti pryže*

##### *Pevnost v tahu*

Pevnost pryže bývá velmi často předepisovaná, ne však jako hodnota využívaná při použití, ale jako hodnota kontrolní, zaručující ještě s jinými vlastnostmi určitou kvalitu výrobku. Pevnost lze upravovat: (23)

- a) volbou elastomeru
- b) plnivem a dávkováním

c) vulkanizačním systémem

Dalším faktorem, který nejvíce ovlivňuje konečnou pevnost, je povaha a objem plnění, přičemž se ovšem uplatňuje i vliv eleastomeru. (23)

*Tažnost*

Tažnost měkké pryže se pohybuje ve velmi značném rozmezí a to od 150 do 900 %. Podobně jako pevnost je i tažnost ovlivňována základním použitým kaučukem. Kaučuky krystalizující mají, a to hlavně v neplněném nebo málo plněném stavu, tažnost podstatně větší než kaučuk butadienstyrenový, který při malé pevnosti nemůže mít ani větší tažnost. S plněním tažnost klesá. (23)

*Modul*

Na rozdíl od pevnosti a tažnosti není modul při nižších protaženích tak nápadně charakterizován eleastomerem. Se stoupajícím dávkováním síry stoupá i modul, ale stejně jako u tvrdosti lze se zřetelem na změny ostatních vlastností tohoto vlivu využít jen v malém rozmezí dávkování pro měkkou pryž. Největší vliv na hodnotu modulu pružnosti má opět plnění. (23)

*Dynamické vlastnosti*

Pryž není ideálně elastická hmota a část deformační energie se mění v teplo. Množství absorbované energie – hysterezní ztráty – lze v určitém rozmezí upravovat skladbou směsi. V praxi se požaduje pryž jak s malou hysterezí (pláště pneumatik, plné obruče, pružné dílce), tak pryž s velkou absorpcí energie (tlumiče vibrací a rázů). Pro posuzování pryže s malými hysterezními ztrátami – též pryž pro dynamické namáhání – je důležité, zda probíhá deformace za konstantního napětí, za konstantní deformace, záleží i na velikosti amplitudy, na frekvenci, děje-li se deformace za běžné nebo za zvýšené teploty. (4)

U převážné většiny případů je pro dosažení dobrých dynamických vlastností nejvhodnější stále přírodní kaučuk, ze syntetických kaučuků se mu blíží kaučuk izoprenový a cis-1,4-polybutadien. Dobrou elasticitu má také pryž připravena z polychloroprenu. Hysterezní vlastnosti pryže se se stoupající teplotou zlepšují, což je zvláště nápadné u bytylkaučuku. (23)

Významným činitelem je vulkanizační činitel a stupeň vulkanizace. Se stoupající síťovou hustotou se rezilience obecně zvyšuje, a to nejdříve rychle, později pomaleji. Kromě

dostatečné síťové hustoty je důležitá, hlavně při vyšších teplotách, povaha příčných vazeb. Pro udržení dobrých dynamických vlastností je důležitá stabilita sítě, tj. vytvoření sítě s malým obsahem síry v příčných vazbách. (27)

### 1.6.2 Odrazová pružnost

Zkouška odrazové pružnosti je jednou z nejrychlejších a jednoduchých metod k určení schopnosti materiálů, hlavně pryžových, absorbovat resp. ,vracet mechanickou energii při deformaci rázem. (3)

K měření se používá princip kyvadlového kladiva, které dopadá z určité výšky na zkoušený materiál. Podle poměru výšky odrazy k výšce před dopadem se vyhodnocuje odrazová pružnost (3)

$$R_s = \frac{h_r}{h_0} \cdot 100 \quad (37)$$

Odrazová pružnost je poměr energie dodané při rázu, vyjádřený v % a je mírou dynamických elastických vlastností hlavně kaučukových vulkanizátů. Zkušební zařízení je v podstatě dvojího druhu podle Schoba a podle Lüpkeho. (4)

Naměřené číselné hodnoty odrazové pružnosti závisí na typu přístroje. U metody Lüpky jsou zaručeny minimální vedlejší ztráty energie, naproti tomu u Schobova přístroje se energie ztrácí nejen v pryži, ale i v ložisku přístroje. Proto jsou hodnoty nalezené touto metodou vždy nižší než u metody Lüpky. (3)

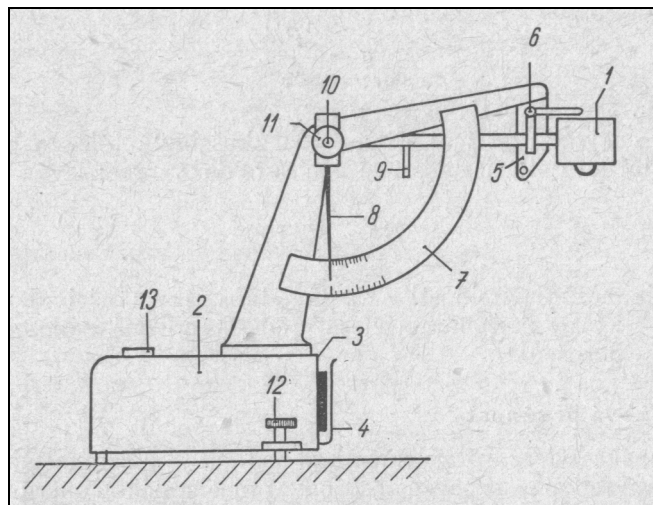
Zkušební těleso musí mít jistou minimální tloušťku (asi 13 mm), aby výsledek byl na ní nezávislý. Při nárazu kyvadla vzniká v pryži elastická vlna, která postupuje na druhou stranu zkušebního tělesa, odráží se zpět a při jeho malé tloušťce se vzhledem k interferenci dodatečně ztrácí ještě část energie právě se odrážejícího kyvadla. (3)

#### ***Odrazová pružnost podle Schoba***

Metoda slouží hlavně pro rychlou kontrolu v gumárenských závodech. Kladivo s nárazníkem ve tvaru ocelové kuličky o průměru 7,5 mm má potenciální energii 0,5 J a rychlost pádu z vyšší polohy asi 2 m/s. Po dopadu kyvadlo unáší zpět i ručičku, která zůstane stát ve výšce odrazu a slouží k odečtení naměřené hodnoty na stupnici přístroje. Dělení obloukové stupnice je již provedeno v % dopadové výšky, takže slouží k přímému odečtení hodnot odrazové pružnosti . (3, 33)

Zkušební tělíska se umísťují mezi přichytky na kovadlinu, která je umístěna pod osou kyvadla. Jsou to kotouče o průměru min. 36 mm a tloušťce nejméně 6 mm. Kotouče se na kovadlině vypodloží tak, aby zkoušený kotouč se ve volné poloze kyvadla dotýkal kuličky. (3,33)

Pryž bývá tixotropní, a proto se při zkoušení zkušební těleso nejdříve „rozpracuje“ tak, že se provedou první tři údery naslepo a teprve další dopad kyvadla odečítáme a zprůměrujeme. Zkouška se provádí většinou při 20 °C pro zvýšené nebo snížené teploty se používá metoda Lüpke. (3,33)



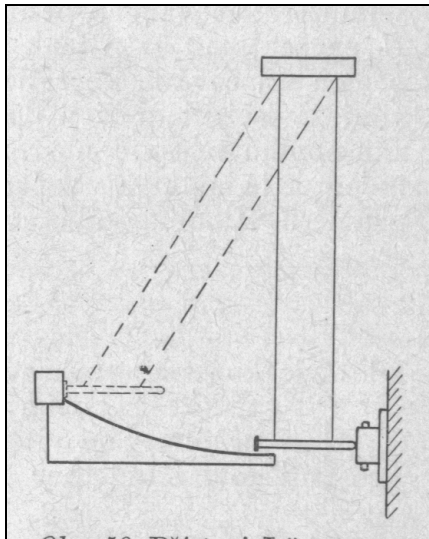
Obr. 4. Schobüv přístroj pro zkoušení odrazové pružnosti (3)

### ***Odrázová pružnost podle Lüpkeho***

Přístroj podle Lüpkeho se používá pro stanovení hodnot odrazové pružnosti pryže nejen při normální teplotě, ale zejména při vyšších a nízkých teplotách. (3)

Princip měření spočívá v tom, že kyvadlo ve tvaru tyče o hmotnosti 350 g se nechá dopadnout na zkušební těleso a odečte se výška, do které se odrazí vlivem pružnosti zkoušeného materiálu. Zkušební tělesa jsou kotouče o průměru 55 mm a tloušťce 13-16 mm. Používají se vnitřní tělesa po vyseknutí kroužků pro stanovení pevnosti v tahu, která se do požadované tloušťky slepují kaučukovým lepidlem. Pro vývojové práce se nechávají vzorky po vulkanizaci 3 dny uležet. Při zkouškách za zvýšených nebo snížených teplot se provádí temperance vzorku po dobu 45 minut zvlášť v termostatu a do 1 minuty se provede zkouška ve zkušební komůrce, vytempervané na stejnou teplotu. (3)

Při zkoušení se první tři nárazy nepočítají, teprve další dvě hodnoty se odečtou na stupnici a jejich střední hodnota je výsledkem zkoušky. Oblouková stupnice je rozdělena na 0-100 nerovnoměrných dílků, výškový rozdíl je 100 mm a dílky jsou průsečíky kružnice, vytvořené rozdělením výšky pádu. Stupnice udává odrazovou pružnost přímo v procentech. (3)



Obr. 5. Lüpkeho přístroj pro zkoušení odrazové pružnosti (3)

### 1.6.3 Tvrdost

Obecně je tvrdost fyzikální pojem pro odpor materiálu, kterým se brání proti vniknutí jiného, tvrdšího tělesa. Tedy vlastnosti spíše povrchu materiálu. Polymerní materiály jsou houževnaté, v případě pryže i pružné, jejich povrchy se více nebo méně deformují. Tvrdostní zkoušky se proto vyvinuly v měření odporu celého objemu proti vtlačování tvrdých těles definovaných tvarů. Při měření tvrdosti kovů, které jsou plastické, se vyhodnocuje tvrdost podle velikosti stopy, kterou čidlo na povrchu zanechalo. Vzhledem k viskoelastickému chování polymerů nelze u nich měřit stopu ale rovnovážnou hloubku vniknutí čidla při určité konstantní síle vtlačování. (3, 4)

Při odporu celého objemu je tvrdost vyjádřením tuhosti a u některých metod jsou dosahovány dobré korelace mezi tvrdostí a modulem pružnosti. Protože pryž má značně nižší modul a rozdílné deformační vlastnosti, jsou konstruovány zvlášť přístroje na stanovení tvrdosti pryže a jiné pro měření tuhých sklovitých polymerů. (4)

Podle tvaru čidla se ustálily následující metody měření tvrdosti:

1. kuličkou nebo tyčkou s kulovým zakončením

2. kuželem nebo jehlanem
3. komolým kuželem

Při posuzování určitých hodnot tvrdosti různými metodami je třeba si uvědomit, že hodnoty tvrdosti jsou naměřená a srovnatelná čísla pro zcela určité přístroje a smluvní postupy. (4)

### ***Tvrdost DVM***

Pro velmi měkké materiály, např. PVC-plastigely nebo velmi měkkou pryž, se používá měření tvrdosti podle DVM, Vznikla úpravou Martensova kuličkového tvrdoměru, který používal pro měření pryže konstantní zatížení 100 g na kuličku a průměru 5 mm. Dalším vývojem u firmy Schopper vznikl tvrdoměr s průměrem kuličky 100 mm a zatížením 1000 g. Číslo tvrdosti se odečítá přímo v setinách mm hloubky vtisku, která se zjišťuje pomocí výškového indikátoru. Hloubka vtisku se odečítá po 10 vteřinách a čím je pryž měkkší, tím větší číslo dostaneme. Hlavní součástí přístroje je citlivý výškový ukazatel se stupnicí dělenou od 0-2 mm po 0,01 mm dílcích. Zkušební tělesa mají mít hladký povrch s minimální tloušťkou 6 mm a měření se provádí minimálně 10 mm od okrajů zkušebního tělesa. Postupuje se tak, že se přitlačí kulička na povrch tělesa, kde působí předtížení 50 g dané vahou tyčinky a kuličky. Ukazatel musí být na nule. Páčkou se vzorek plně zatíží a po 10 vteřinách se odečte hodnota tvrdosti (3)

### ***Tvrdost IRHD (International Rubber Hardness Degree)***

Pro měření tvrdosti pryže se všeobecně ujala metoda Shore A s jednoduchou stupnicí tvrdosti 0-100, kde je čidlo ve tvaru komolého kužele. Přítlačná síla je vyvozována ocelovou pružinou, která se unavuje a považuje se v měřicí technice za nespolehlivý prvek. Při častém používání dochází také k obrušování hrany čidla a k jeho poškození při manipulaci. Výhoda tvaru čidla spočívá v tom, že vztah mezi hloubkou deformace  $h$  a  $\log E$  je lineární. (3)

Pro dostupnost ocelových kuliček přesného průměru, které se dají snadno vyměňovat, je používána pro pryž kuličkový tvrdoměr takové konstrukce, aby jeho tvrdostní škála se co nejméně lišila od tvrdosti Shore A. Byla zvolena kulička o průměru 2,50 mm (nebo 2,38 mm) a pro malé vzorky tloušťky menší než 4 mm kulička a o průměru 0,395 mm (mikrotvrdoměr Wallace). Hloubka vniku kuličky je měřena výškovým indikátorem požadované přesnosti na 0,01 mm. Zatížení je vyvozováno pomocí závaží. (3)

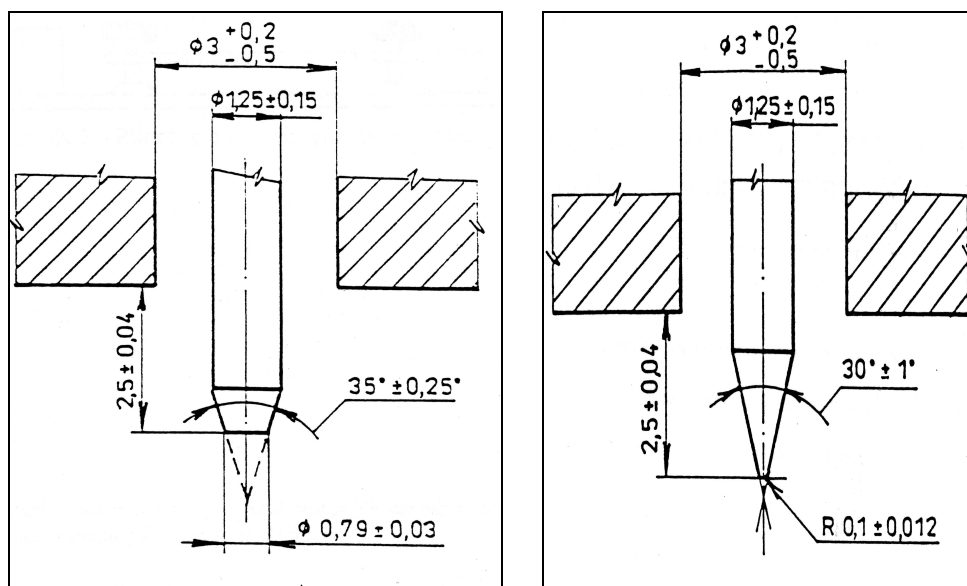
Měřicí rozsah je 28,5-100 IRHD. Postup při stanovení tvrdosti je ten, že se zkušební těleso na 5 vteřin zatíží tyčinkou s měřicí kuličkou, která váží 30 g a potom se nechá 30 vteřin působit celkové zatížení. (3)

### ***Tvrlost Shore***

Přístrojů na měření tvrdosti Shore je celá řada pro různé rozsahy a dnes se používají typy A, C a D. zkoušky jsou založeny na měření odporu proti vlačování ocelových hrotů různých tvarů. I když má Shore A stupnici 0-100 stanovuje se tvrdost pryže v rozsahu 30 až 85 jednotek Shore A. Pro měkčí vulkanizáty je lépe používat metodu DVM, pro tvrdší pak Shore D. (3, 34)

Typické pro tyto typy tvrdoměrů je zatěžování pomocí pružin, které je nutno před měřením kontrolovat a pomocí cejchovacího péra vynulovat. (3)

Při měření tvrdosti Shore A se postupuje tak, že se tvrdoměr přiloží na zkušební těleso (minimální tloušťky 6 mm, nejméně 12 mm od okrajem při více měřeních nejméně 5 mm od sebe) tak, aby patka pevně přisedla po celé ploše. Tvrlost se odečítá za 3 vteřiny od okamžiku dotyku, mění-li se hodnota na stupnici i dále, pak se odečte tvrdost za 15 vteřin. Výsledná hodnota tvrdosti je aritmetický průměr nejméně tří měření, povolená odchylka od průměru nesmí být větší než  $\pm 5\%$ . (3, 34)



Obr. 6. Zkušební hrot tvrdoměru typu A a D. (3)

### ***Faktory ovlivňující tvrdost pryže***

Hodnota tvrdosti pryže se velmi často předepisuje. Dosáhnout jí při zachování ostatních požadovaných vlastností není vždy snadné, stejně jako není snadné udržet ji vždy během provozu v požadovaných tolerancích, a to proto, že závisí do jisté míry i na podmínkách zpracování. (23)

Tvrdost pryže lze upravovat:

- a) typem plniva a plněním
- b) dávkováním síry
- c) urychlením
- d) změkčovadly

V malých mezích se mění tvrdost i způsobem vulkanizace. Největší vliv na hodnotu tvrdosti má plnivo a jeho dávkování. Plněním lze obtížně dosáhnout tvrdosti větších než  $85^{\circ}Sh$ . Zvětšováním dávek síry lze upravovat tvrdost ve značném rozsahu až do hodnot tvrdé pryže; protože se tím však mění některé jiné vlastnosti, např. strukturní pevnost, stárnutí, není možno se od dávkování obvyklého pro měkkou pryž (tj. 0,5-4 dsk síry) příliš odchýlit a tohoto způsobu se u měkké pryže ke změně tvrdosti ve větším rozsahu nepoužívá. Tvrdost značně závisí na stupni vulkanizace. (27)

Mezi tvrdostí pryže a napětím existuje určitá, i když omezená korelace. Pro pryže z přírodního kaučuku byla navržena závislost podle rovnice: (27)

$$E = 3G = 3,57 \exp 0,033H \quad (38)$$

kde  $H$  je tvrdost Shore.

## **1.7 Metoda konečných prvků**

Metoda konečných prvků (MKP) je numerická metoda, jejímž matematickým základem je diskretizace úlohy. Ta spočívá v rozdělení zkoumané spojité oblasti na konečný počet podoblastí, stručně nazývané konečnými prvky. Jednotlivé konečné prvky jsou spolu spojeny v uzlových bodech. V současné době je to nejrozšířenější a nejpoužívanější metoda pro řešení úloh mechaniky kontinua (5, 6).

Její nejrozšířenější variantou je deformační metoda používající tzv. Lagrangeovských konečných prvků. Tato varianta vychází z Lagrangeova variačního principu minima celkové



potenciální energie soustavy (těleso + jeho zatížení), resp. jeho vnějších a vnitřních sil. Matematicky je princip formulovaný rovnicí

$$\Pi = \Pi_i + \Pi_z = \min \quad (39)$$

kde

$\Pi$  = celková potenciální energie

$\Pi_i$  = deformační energie vnitřních sil tělesa

$\Pi_z$  = práce vnějších sil

Tento princip znamená, že ze všech kinematicky přípustných stavů pružného tělesa nastává takový stav, pro který nabývá potenciální energie systému minimální hodnotu (18).

Celkovou potenciální energii elementu pro spojitě třídídimenzionální těleso rozdělené do  $m$  elementů lze vyjádřit vztahem

$$\Pi = \sum_{e=1}^m \Pi^e - \{d\}^T \{f\} \quad (40)$$

kde

$$\Pi^e = \Lambda^e - W_0^e - W_p^e \quad (41)$$

V maticovém tvaru lze energetický funkcionál pro element  $e$  zapsat ve tvaru

$$\begin{aligned} \Pi^e = & \frac{1}{2} [d]^e \left( \int_V [B]^T [D][B] dV \right)^e \{d\}^e - \\ & - [d]^e \left( \int_V [B]^T [D] \{\epsilon_T\} dV + \int_V [N]^T \begin{Bmatrix} X^* \\ Y^* \\ Z^* \end{Bmatrix} dV + \int_{\Gamma} [N]^T \begin{Bmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \end{Bmatrix} d\Gamma \right)^e \end{aligned} \quad (42)$$

V rovnici první a druhý integrál představují potenciální energii přetvoření, třetí integrál představuje práci vykonanou objemovými silami a poslední integrál práci vykonanou rovnoměrným zatížením na povrchu oblasti  $\Gamma$ . Pro rovnováhu systému nabývá potenciální energie minima, tzn. že první variace energetického potenciálu

$$\partial \Pi(u, v, w) = \sum_{e=1}^m \partial \Pi^e(u, v, w) = 0 \quad (43)$$

Matematickými úpravami předcházejících rovnic se dostane tvar tzv. matice tuhosti elementu ve tvaru

$$[k]^e = \int_V [B]^T [D] [B] dV \quad (44)$$

kde  $[B]$  je transformační matice a matice  $[D]$  je maticí fyzikálních konstant. Po dalších provedených úpravách se dostane standardní tvar rovnice statické analýzy pro element v následujícím tvaru

$$[k]^e \{d\}^e = \{f\}^e \quad (45)$$

kde vektor zobecněných posuvů

$${}^T [d]^e = [u_1 \ v_1 \ w_1 \ \dots \dots \dots u_r \ v_r \ w_r] \quad (46)$$

a vektor zatížení v uzlech je

$${}^T \{f\}^e = [\{f\}^1 \ \{f\}^2 \ \dots \dots \dots \{f\}^r] \quad (47)$$

kde  $r$  je počet uzlů na elementu.

Rovnice celého systému pro diskretizované těleso s  $m$  uzly musí zahrnovat rovnice všech uzlů a má tvar

$$[K] \{d\} = \{f\} \quad (48)$$

kde

$[K]$  = matice tuhosti pro celý systém

$\{d\}$  = vektor uzlových posunutí pro celý systém

$\{f\}$  = vektor výsledných sil v uzlech

Výsledná rovnice pro výpočet tenzoru napětí v závislosti na posuvech a počátečních přetvořeních bez uvažování počátečních teplotních napětí se může zapsat jako

$$\{\sigma\} = [D] [B] \{d\} \quad (49)$$

V případě, že existují počáteční napětí je nutné je superponovat (5, 6, 7, 30, 31)

## 2 STANOVENÍ CÍLŮ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Hlavním cílem diplomové práce bylo naměřit a zjistit materiálové charakteristiky hyperelastického materiálu – konkrétně u pryžových podkladových podložek a vliv těchto vlastností na chování a napjatost podložek. Pryžové podložky byly dodány firmou ŽSTV a.s. Uherský Ostroh a používají se jako tlumící prvky na bezpokladnicové upevnění kolejnic, kde se umisťují mezi betonový pražec a samotnou ocelovou kolejnici.

Materiálové charakteristiky byly potom využity nejen k předběžné materiálové klasifikaci podkladových podložek, ale hlavně jako materiálové konstanty pro popis hyperelastického chování pryže. V softwaru Samcef využívajícího MKP byly jednotlivé podložky namodelovány a následně byl proveden pevnostní výpočet a výsledky pro obě podložky byly porovnány.

Schématická struktura postupu při vypracování diplomové práce:

- Teoretické seznámení s problematikou železniční dopravy, železničního svršku a jeho jednotlivých částí, seznámení s bezpokladnicovým upevněním kolejí.
- Teoretický popis kaučuku, kaučukové elasticity, teorií hyperelastických materiálů
- Základní seznámení s fyzikálně – mechanickým vlastnostmi pryže a zkušebnictvím ke stanovení vhodným materiálových parametrů.
- Obecný popis numerické metody konečných prvků.
- Experimentální měření – tahová zkouška, tvrdost a odrazová pružnost.
- Vyhodnocení výsledků z mechanických zkoušek.
- Namodelování pryžových podložek a následný pevnostní výpočet v softwaru Samcef.
- Vyhodnocení a srovnání výsledků obou pryžových podložek.

### 3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Experimentální část diplomové práce se zabývá popisem měření, které byly provedeny k získání základních materiálových charakteristik a konstant pro definování a popis materiálů, z nichž jsou vyrobeny pryžové podkladové podložky.

Mezi tyto měření patří zkouška tvrdosti, měření odrazové pružnosti a především tahová zkouška a její následná linearizace. Naměřené materiálové charakteristiky a konstanty byly aplikovány pro zadání materiálových hodnot u pevnostních analýz pomocí MKP. Dále je v této sekci popsána příprava zkušebních těles pro jednotlivé zkoušky, postup průběhu zkoušek, uvedeny výsledky měření v tabulkách a závislosti naměřených výsledků v grafickém provedení. Po získání potřebných materiálových konstant byly vytvořeny konečnoprvkové modely pro oba typy zkoumaných pryžových podložek. Byly zadány okrajové podmínky a zatížení tak, aby co nejlépe vystihovaly skutečný stav při provozním zatížení. V software Samcef byly potom provedeny nelineární statické výpočty. Srovnávacím kritériem pro oba typy podkladových podložek bylo rozložení tenzoru napětí a deformace se zaměřením na špičky napětí v makroobjemu podložek.

Na závěr je provedena diskuse výsledků pro jednotlivé typy podkladových podložek a na základě získaných výsledků měření a výpočtů možnosti jejich použití v provozní praxi.

#### 3.1 Příprava zkušebních těles

Tvar a velikosti zkušebních těles a rovněž metodika zkoušek je určena a definována příslušnými normami ČSN, EN, ISO, DIN atd. Zkušební tělesa z pryže je možné připravit dvojím způsobem:

1. Přímo ze zkoušených materiálů při jejich vulkanizaci, lisování, vstřikování či vytvrzování v příslušných formách s tvarem zkušební tělesa nebo vzorku, z kterého se dále vysekne zkušební těleso
2. Z hotových výrobků nebo polotovarů vysekáváním, vyřezáváním nebo obráběním

V našem případě se jedná o dva typy pryžových podložek, ze kterých byly připraveny zkušební vzorky podle norem pro testování pryžových materiálů z hotového výrobku.(4)

### 3.1.1 Příprava zkušebních těles pro tahovou zkoušku

Jelikož tahová zkouška představuje v diplomové práci nejdůležitější zkoušku, je popis přípravy zkušebních těles u této zkoušky nejpodrobnější.

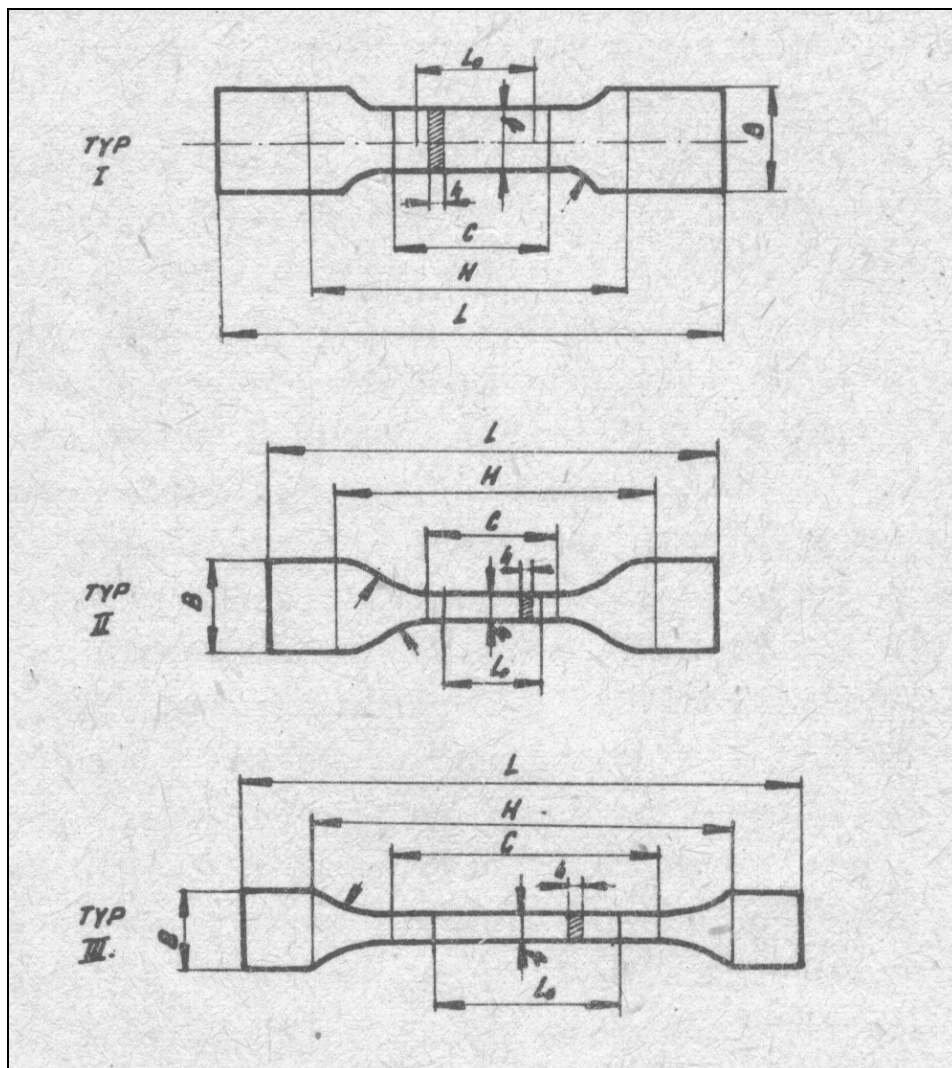
Pro tahové zkoušky se používá dvou typů zkušebních těles; ve tvaru oboustranné lopatky - tzv., osmičky - a ve tvaru kroužků. Osmičky se používají u všech typů polymerů, kroužky pouze u kaučukových vulkanizátů. Tvar osmiček je u polymerů různý podle jejich pevnosti a způsobu přípravy, protože se buď vstříkují do forem nebo se připravují obráběním. Jejich přesné rozměry udává příslušná materiálová norma. Jejich tvar je dán nutností pevného uchycení v čelisti a koncentrace osového napětí do zúžené části vorku. U pryže, která se silně deformuje, se přenáší napětí i do rozšířené části, ty se deformují a vznikají tak nepřesnosti v odečítání závislosti mezi napětím a deformací. Při velkých protaženích se zužují i upínací části a nastávají potíže s uchycením vzorků. Proto byly zavedeny kroužky, protože odpadá problém s upínáním. Kroužky se navlékají na kladky a také odečítání deformace je přesnější, i když jsou i zde určité nepřesnosti. Napětí je nerovnoměrně rozděleno průřezu, kde ve středu je největší a zmenšuje se směrem k povrchu. Obecně platí, že se zvětšujícím průřezem klesá pevnost v tahu. Uplatňuje se zde princip širší distribuce a pravděpodobnosti většího výskytu slabších míst, kde začíná lom. (4, 32)

K tahové zkoušce byly použity zkušební tělesa ve tvaru oboustranných lopatek, jelikož přístroj na měření zkušebních těles ve tvaru kroužku nebyl k dispozici.

Rozměry zkušebních těles pro tahovou zkoušku pro různé typy těles dle různých norem jsou uvedeny v tabulce č.I.

Tab. I. Rozměry zkušebních těles pro tahové zkoušky [mm].

Rozměry	ČSN 64 0605			ISO R 37 Typ 2	DIN 53504	BS Typ 30
	Typ I (ISO R 37)	Typ II	Typ III			
L	115	150	200	75	50	30
B	25	20	40	12,5	8,5	6
C	33	60	60	25	15	10
b	6	10	25	4	4	2
r	14	min. 60	35	8	10	2,2
R	25	-	-	12,5	0	2,2
l <sub>0</sub>	25	50	50	20	10	-
H	80	115	120	-	-	-
h	-	-	4	-	-	-



Obr. 7. Tvary zkušebních těles pro tahové zkoušky podle ČSN 64 0605 (4)

Nejpoužívanějším typem oboustranných lopatek pro kaučukové vzorky je normalizovaný tvar ISO R 37, typ 2, s délkou 75 mm, pracovní částí 25 mm, šířkou 4 mm, který jsem zvolil také já pro tahovou zkoušku. (32)

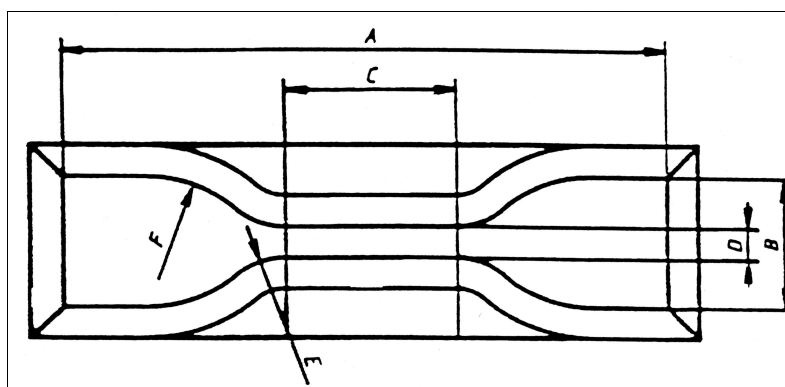
Vysekávání bylo u nás nejrozšířenějším postupem, i když je o něm známo, že tlak nože na pryž způsobuje její deformaci a výsledkem jsou nerovné plochy. Vzorky mají zakřivený, nepravoúhlý průřez, který se nedá přesně změřit. (32)

Proto se rozšířil způsob vyřezávání rotujícími noži, protože zaručuje pravoúhlý průřez. Zkušební osmičky se většinou vysekávají noži normalizovaných rozměrů, kde se předpokládá, že zkušební tělesa převezmou rozměry nože. Vznikají však i zde nerovné hrany a skutečný rozměr je závislý obecně na tvrdosti pryže. Měření průřezu se provádí tloušťkoměry s předepsaným rozměrem a tlakem patky. (32)

V tab. II jsou uvedeny rozměry vysekávacích nožů pro zkušební tělesa ve tvaru oboustranných lopatek.

Tab. II. Rozměry vysekávacích nožů zkušebních těles tvaru oboustranných lopatek.

Rozměry	Typ 1	Typ 2	Typ 3	Typ 4
<b>A - Celková délka</b>	115	75	50	35
<b>B - šířka lopatek</b>	$25,0 \pm 2,0$	$12,5 \pm 1,0$	$8,5 \pm 1,0$	$6,0 \pm 0,5$
<b>C - Délka zužené části</b>	$33,0 \pm 2,0$	$25,0 \pm 1,0$	$16,0 \pm 1,0$	$12,0 \pm 0,5$
<b>D - šířka zužené části</b>	$6,0 \pm 0,4$	$4,0 \pm 0,1$	$4,0 \pm 0,1$	$2,0 \pm 0,1$
<b>E - Přechodový poloměr vnější</b>	$14,0 \pm 1,0$	$8,0 \pm 0,5$	$7,5 \pm 0,5$	$3,0 \pm 0,1$
<b>F - Přechodový poloměr vnitřní</b>	$25,0 \pm 2,0$	$12,5 \pm 1,0$	$10,0 \pm 0,5$	$3,0 \pm 0,1$



Obr. 8. Vysekávací nůž pro zkušební tělesa ve tvaru oboustranných lopatek (32)

Pro měření byly použity zkušební tělesa ve tvaru oboustranných lopatek typu 2. Tyto tělesa byly připravena ve firmě ITC za pomoci vyřezávacího nože typu 2. Příprava těchto zkušebních těles byla komplikována faktem, že měly být připraveny přímo z hotového výrobku – v tomto případě z pryžových podložek. Jelikož měly podložky dosti komplikovanou morfologii povrchu (výskyt značného počtu drážkování a jiných nepravidelných tvaru na povrchu podložky), bylo nutné nejdříve z podložky vyříznout plát o tloušťce cca 2 mm, ze které byly potom teprve vyříznuty potřebné zkušební tělíska ve tvaru lopatek viz., obr 9.



Obr. 9. Zkušební tělísko ve tvaru oboustranné lopatky

### 3.1.2 Zkušební tělesa pro měření odrazové pružnosti a tvrdosti

Měření odrazové pružnosti bylo provedeno na přístroji Schob. Pro měření odrazové pružnosti podle Schoba se používají zkušební tělesa ve tvaru kotouče a průměru 36,6 až 44,6 mm a tloušťky 3,8 až 4,2 mm. Tělesa by měla být monolitní a není přípustné, aby byly na povrchu opatřeny označovacím papírovým štítkem nebo jinak znečištěny. Povrch zkušebního tělesa musí být hladký a rovný. (33, 34)

Tvrdot se měřila metodou Shore A. Zkušební tělesa pro tuto zkoušku by měla mít tloušťku 3,8 až 4,2 mm a měla by být bez zakulaceného a hrubého povrchu. (34)

Zkušební tělíska na měření odrazové pružnosti i tvrdosti měly v tomto případě průměr 40 mm a tloušťku 4 mm. Tělíska byly připraveny vyseknutím z plátu, který byl vyřezán z pryžové podložky. (33)



## 3.2 Tahová zkouška

Tahová zkouška společně se stanovením tvrdosti a odrazové pružnosti patří k základním a poměrně rychlým stanovením základních materiálových charakteristik pryžových materiálů, kterých se hojně využívá v gumárenském průmyslu pro charakterizaci nových výrobků či daných kaučukových materiálů a směsí. (4)

Z výsledku tahové zkoušky byly následnou linearizací tahové křivky získány potřebné materiálové charakteristiky pryže, ze které jsou podložky vyrobeny. Jedná se konkrétně o stanovení koeficientů Mooney - Rivlinovy rovnice, které byly poté použity jako vstupní hodnoty pro charakterizování materiálů v softwaru Samcef, což je program, pro pevnostní výpočet pomocí MKP.

### 3.2.1 Popis principu tahové zkoušky

Podstatou tahové zkoušky je to, že zkušební těleso, v tomto případě oboustranná lopatka, je uchycena do čelisti trhacího stroje, a těleso je poté rostoucí silou při konstantní rychlosti protahováno, většinou až do jeho přetržení. Trhací stroj je propojen s grafickým záznamem, který zaznamenává závislost působící síly na těleso na jeho protažení (deformaci). Jako výstup dostáváme závislost působící síly na protažení zkušební tělesa resp., závislost napětí v tahu na deformaci vzorku. (4, 32)

Tahová křivka pro pryž má svůj charakteristický esovitý průběh a liší se od ostatních polymerů svým nelineárním chováním při nízkých deformacích. (4)

Parametry, které poté můžeme z tahové křivky získat jsou následující:

- *Pevnost v tahu* - je definována jako maximální napětí v tahu, potřebné přetržení zkušební tělesa.
- *Tažnost* - je definována jako tahová deformace pracovní délky v okamžiku přetržení.
- *Modul* - je poměrné napětí, při kterém se dosáhne určitého předem zvoleného prodloužení pracovní části zkušební tělesa (např. M100, M200, M300, M500).

Všechny tyto tři parametry jsou v podstatě jen základním měřítkem, které obecně popisují materiálové charakteristiky pryže a dávají nám jen orientační pohled na daný materiál. V tomto případě byl však hlavní důvod pro provedení tahové zkoušky získání tahové křivky – čili grafické znázornění průběhu tahové zkoušky, jelikož tato závislost poté

posloužila pro provedení linearizace tahové křivky, pomocí níž byly potom získány nastavitelné parametry Mooney – Rivlinovy rovnice, konstanty  $C_1$  a  $C_2$ .

### **3.2.2 Postup při měření tahové křivky**

Prvním krokem u tahové zkoušky byla příprava zkušebních těles. V tomto případě se jednalo o tělesa ve tvaru oboustranných lopatek definovaných rozměrů. Měření bylo provedeno v laboratoři na Ústavu výrobního inženýrství UTB ve Zlíně na trhacím stroji ZWICK dle normy ISO 37 pro dva typy pryžových podložek. Pro každou podložku bylo připraveno 11 zkušebních tělísek.

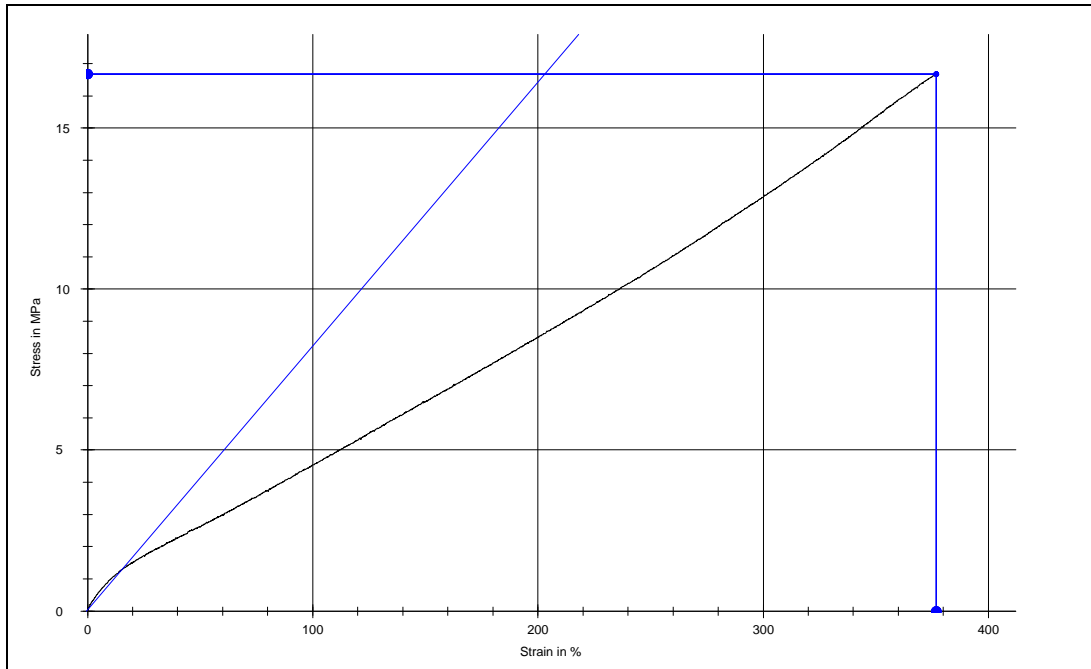
Trhací stroj byl propojen s počítačem, do kterého byly před začátkem měření vloženy potřebné údaje k charakterizaci zkušebních těles a měření tj., rozměry zkušebních těles, typ materiálu, atd. Výhoda propojení s počítačem byla v interaktivním ovládní pomocí programu, který byl v PC nainstalován. Program rovnou převáděl měření závislosti působící síly při posunutí čelistí na závislost napětí v tahu při deformaci vzorku.

Po nastavení veškerých důležitých parametrů do PC bylo provedeno měření na konkrétních vzorcích. Program zobrazil všechny naměřené hodnoty, statisticky vyhodnotil jednotlivá měření a graficky znázornil průběhy měření.

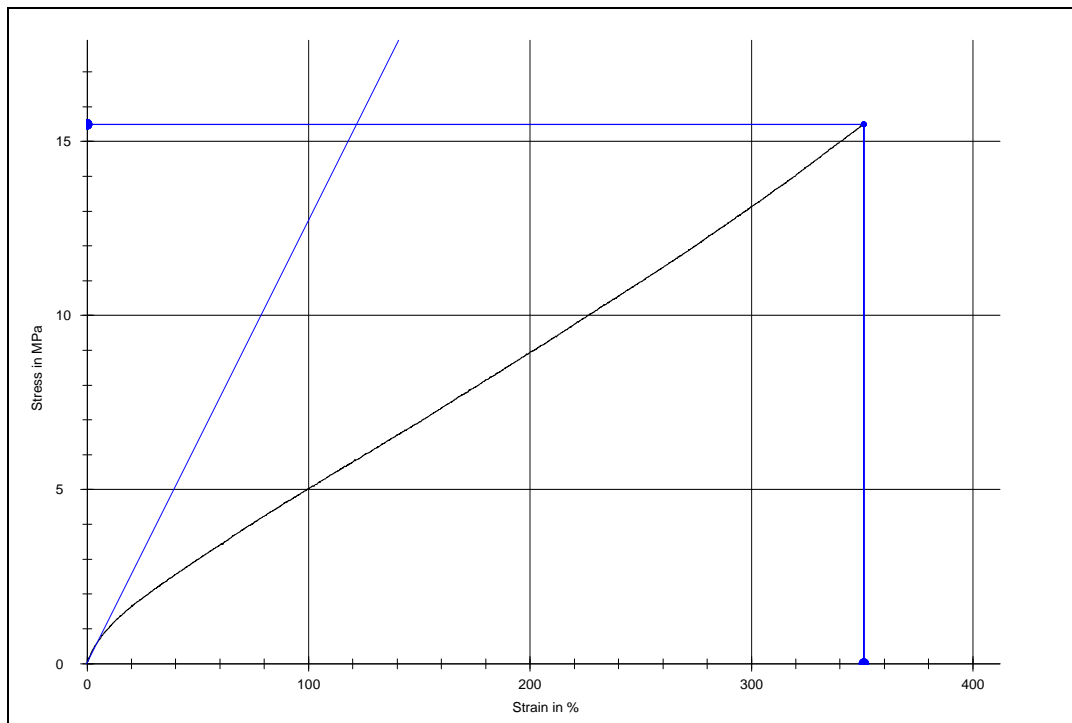
### **3.2.3 Výsledky měření tahové zkoušky**

Výsledkem měření tahové zkoušky byly grafické závislosti napětí na deformaci u zkušebních těles. Software pro trhací stroj také umožnil získat některé základní statistické výpočty z měření jako střední hodnota a směrodatná odchylka. Důležitými hodnotami jsou pevnosti a deformace při přetržení a moduly M100, M200, M300. Na následujících obrázcích jsou znázorněny grafy naměřených tahových křivek pro oba typy pryžových podložek. Z 11 vzorků pro oba typy podložek byly vybrány vždy 4 vzorky víceméně náhodně, i když s menším přihlédnutím na koeficient spolehlivosti u výsledné linearizace tahové křivky.

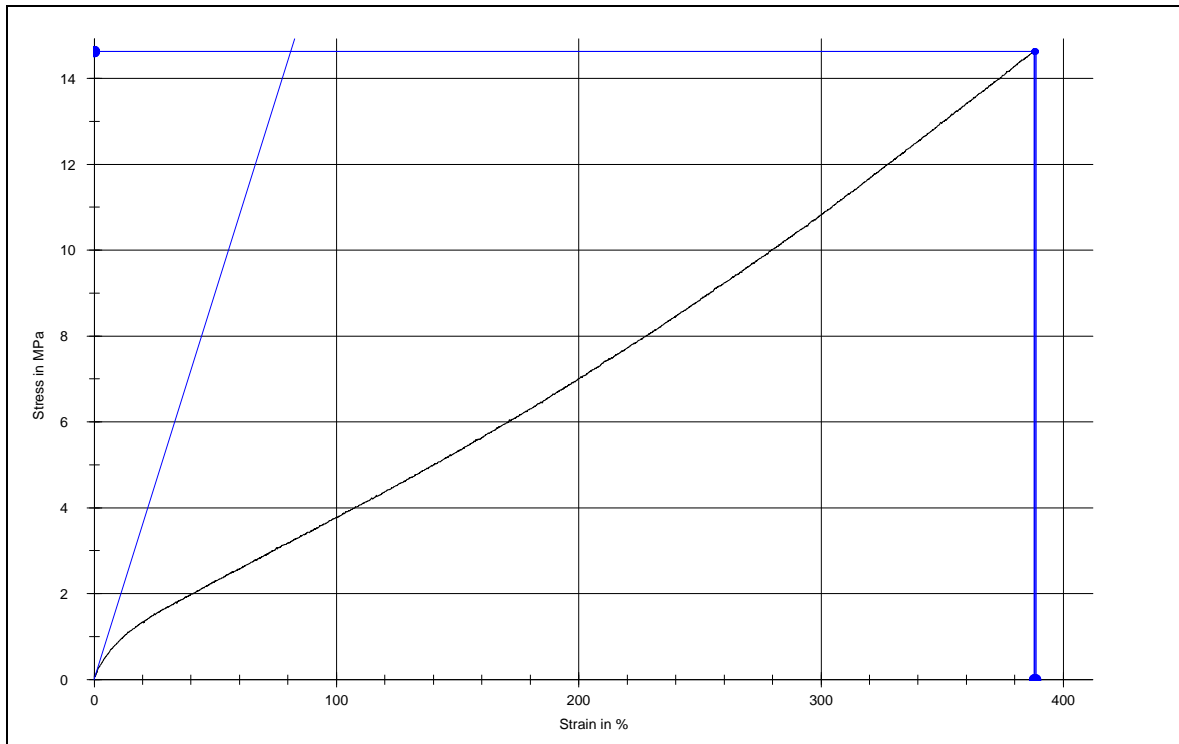
**Tahové křivky pro podložku č. 1**



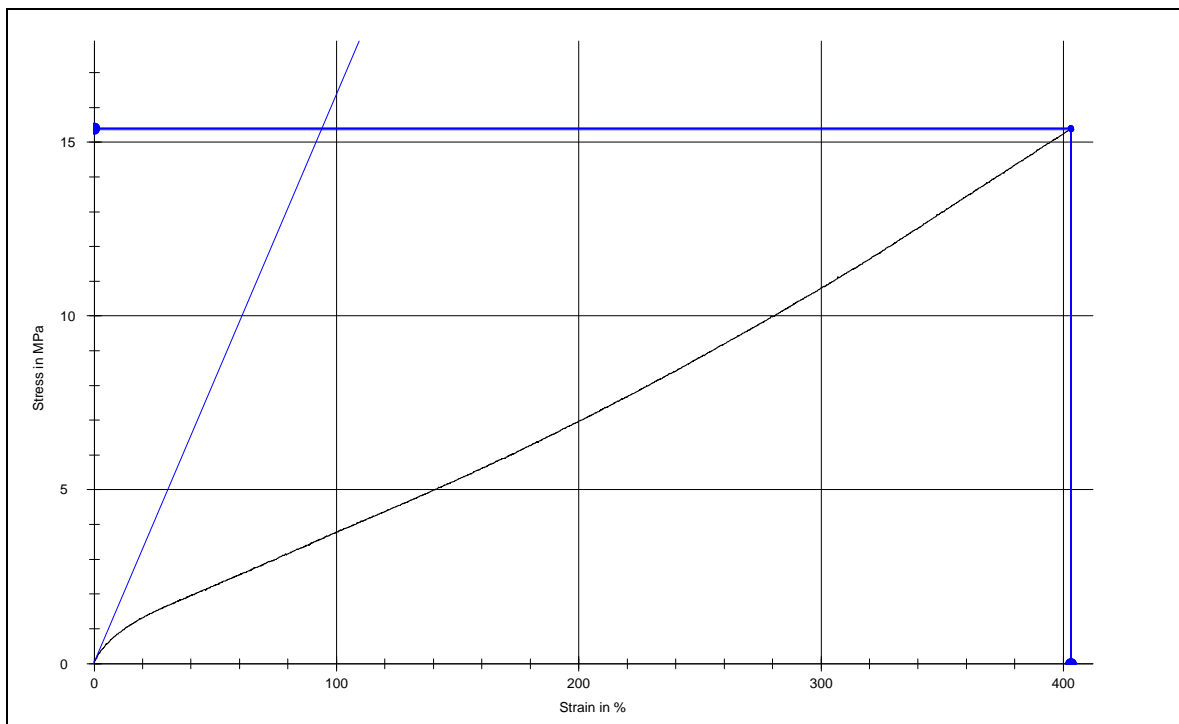
Obr. 10. Tahová křivka pro podložku č.1 - vzorek č. 1



Obr. 11. Tahová křivka pro podložku č.1 - vzorek č. 2

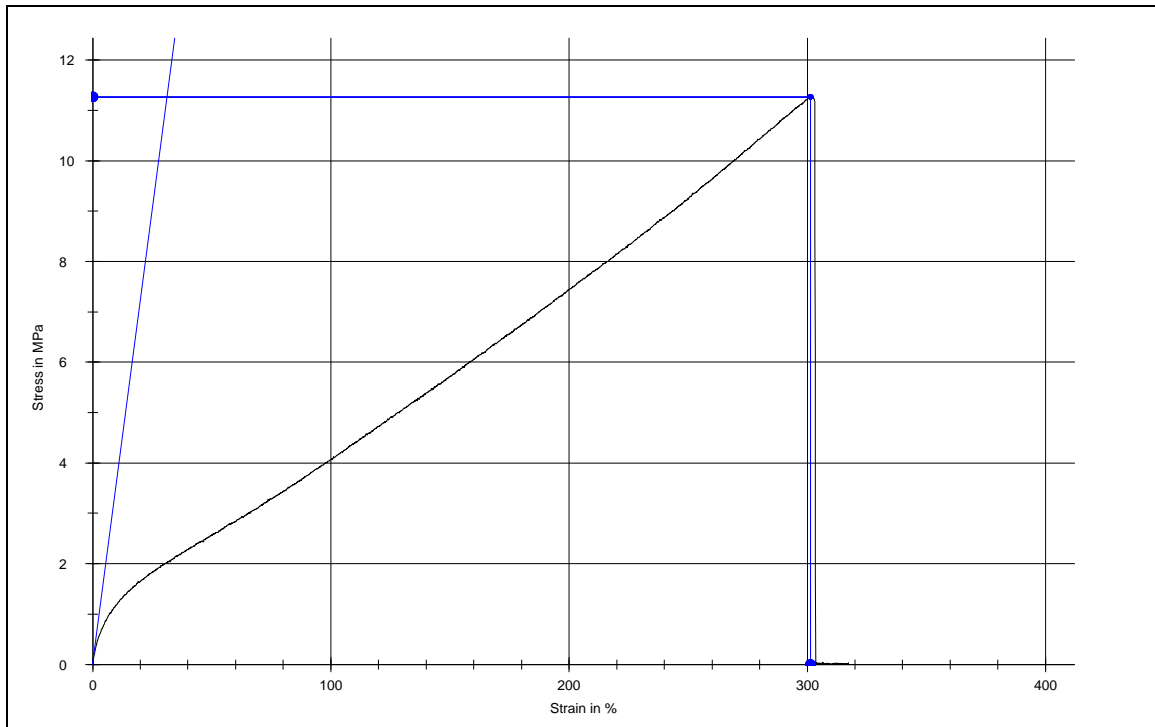


Obr. 12. Tahová křivka pro podložku č.1 - vzorek č. 3

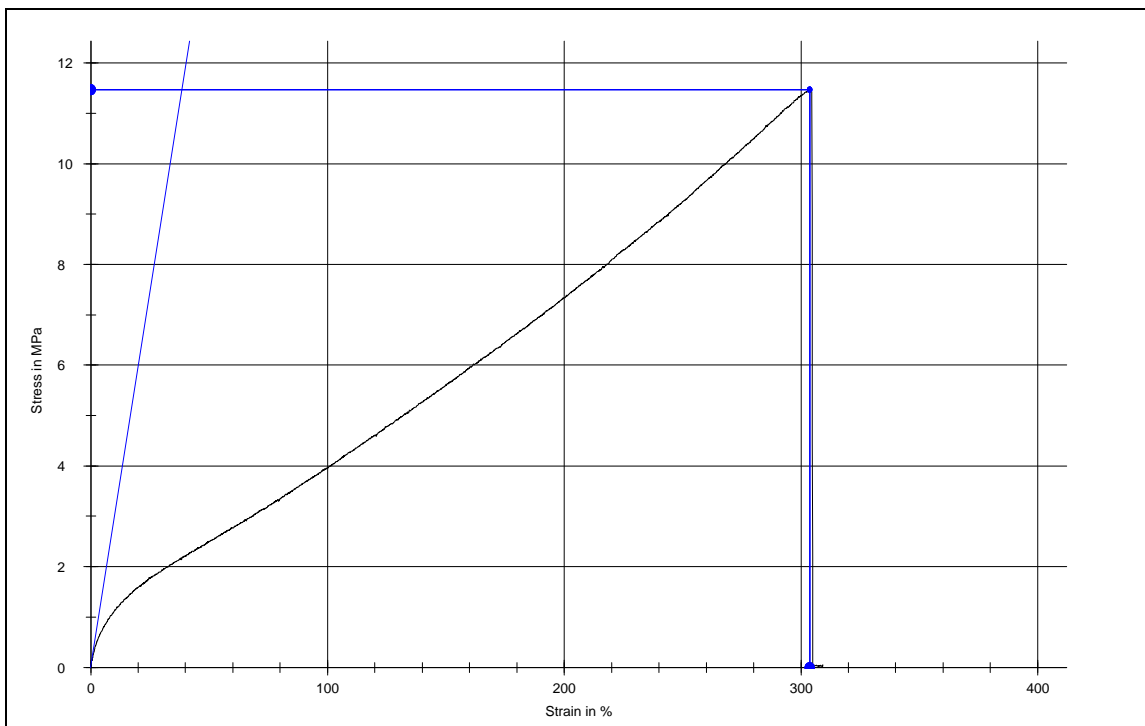


Obr. 13. Tahová křivka pro podložku č.1 - vzorek č. 4

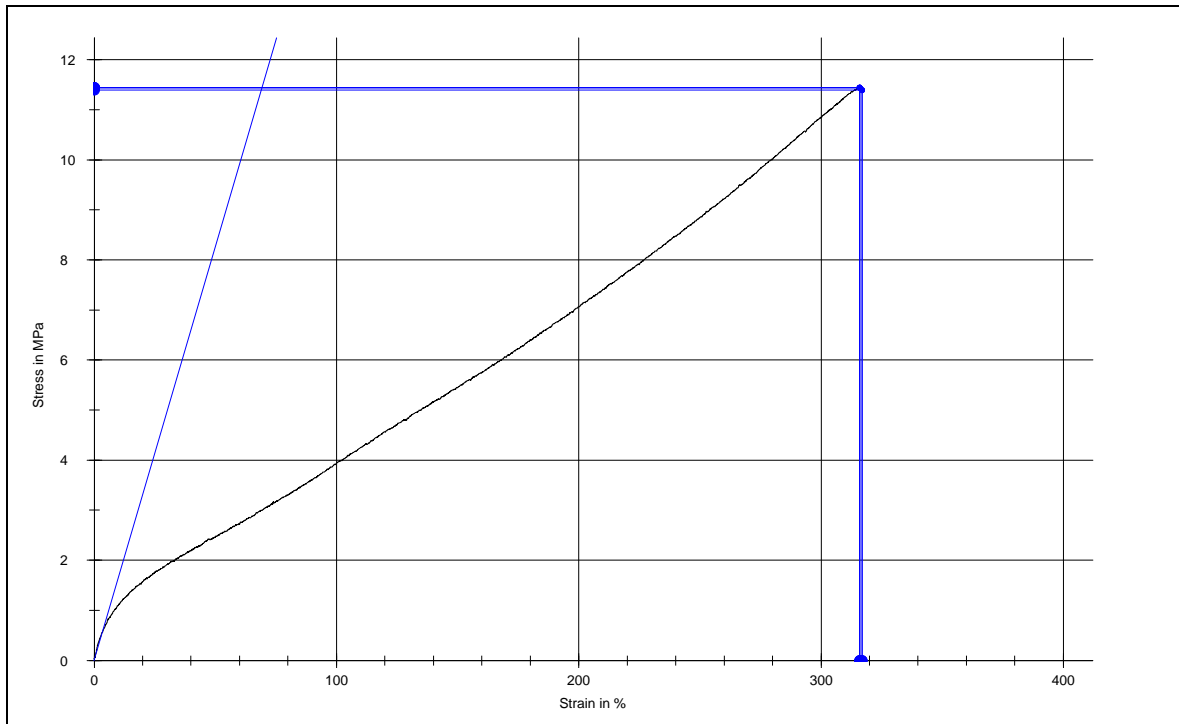
**Tahové křivky pro podložku č. 2**



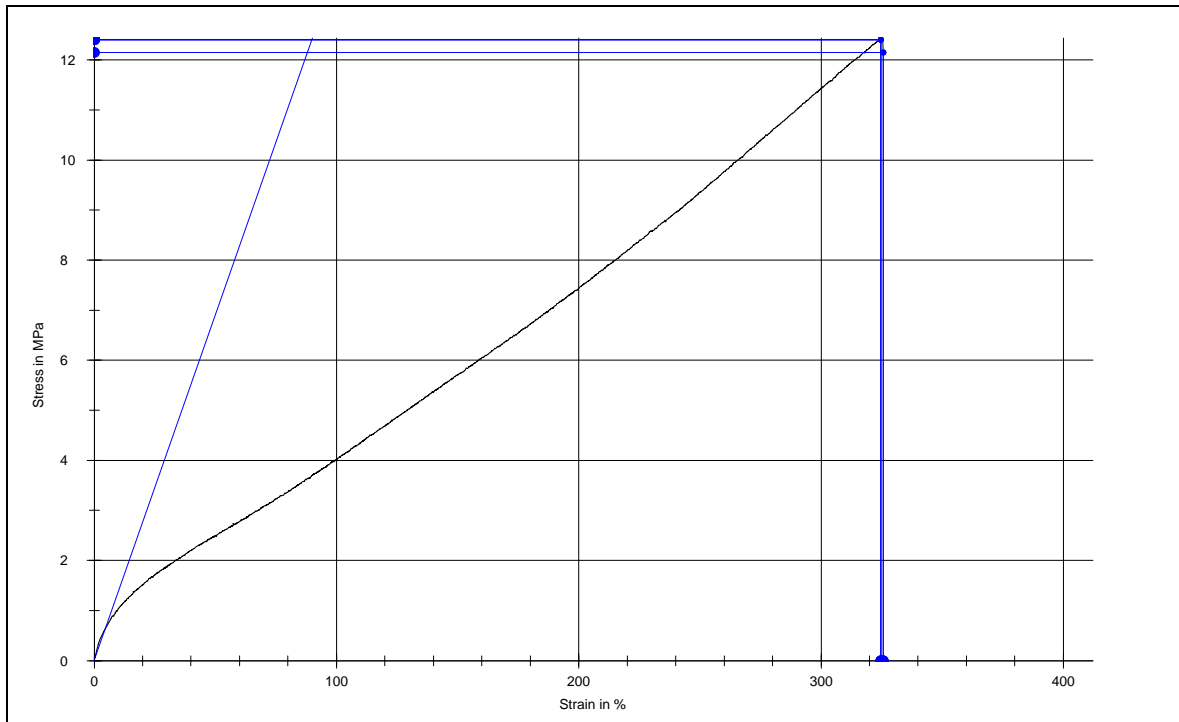
Obr. 14. Tahová křivka pro podložku č.2 - vzorek č. 1



Obr. 15. Tahová křivka pro podložku č.2 - vzorek č. 2



Obr. 16. Tahová křivka pro podložku č.2 - vzorek č. 3



Obr. 17. Tahová křivka pro podložku č.2 - vzorek č. 4

Tab. III. Naměřené hodnoty pevností v tahu, modulů a tažností z tahových křivek.

	Podložka č. 1				Podložka č. 2			
	Vzorek 1	Vzorek 2	Vzorek 3	Vzorek 4	Vzorek 1	Vzorek 2	Vzorek 3	Vzorek 4
<b>Pevnost v tahu [MPa]</b>	16,67	15,49	14,63	15,36	11,27	11,47	11,45	12,41
<b>Tažnost [%]</b>	376,96	350,79	388,7	403,32	301,35	303,81	316,95	325,65
<b>M100</b>	4,57	5,06	3,81	3,80	4,06	3,97	3,93	3,50
<b>M200</b>	8,54	8,90	7,11	7,00	7,39	7,31	7,15	7,87
<b>M300</b>	12,87	13,11	11,00	10,65	11,15	11,32	10,82	10,96

Tab. IV. Statistické výpočty pro podložku č. 1

	$a_0$	$b_0$	$R_m$	$R_b$	Nom. st	$\epsilon_m$	$\epsilon_b$
<b>n = 11</b>	[mm]	[mm]	[MPa]	[MPa]	[mm]	[%]	[%]
$\bar{x}$	1,859	4,712	15,3	15,21	171,78	381,73	382,02
<b>s</b>	0,0712	0,2401	1,12	1,14	6,51	14,47	14,53

Tab. V. Statistické výpočty pro podložku č. 2

	$A_0$	$B_0$	$R_m$	$R_b$	Nom. st	$\epsilon_m$	$\epsilon_b$
<b>n = 11</b>	[mm]	[mm]	[MPa]	[MPa]	[mm]	[%]	[%]
$\bar{x}$	1,839	4,72	10,98	11,78	23,94	302,02	320,08
<b>s</b>	0,0477 6	0,08345	1,03	0,32	7,32	12,73	28,28

kde  $a_0$  - tloušťka zkušební tělesa

$b_0$  - šířka pracovní části zkušební tělesa

$R_m$  - mez pevnosti

$R_b$  - napětí v tahu při přetržení

Nom. St – pracovní délka zkušební tělesa

$\epsilon_m$  - deformace na mezi pevnosti

$\epsilon_b$  - deformace při přetržení

### 3.3 Linearizace tahové křivky

Dalším krokem v experimentální části diplomové práce bylo zpracování tahové křivky a to její linearizace.

Cílem linearizace bylo převedení tahových křivek na lineární závislost, kde byly následnou lineární regresí získány konstanty Mooney – Rivlinovy rovnice  $C_1$  a  $C_2$ . Tyto konstanty charakterizují chování kaučukového materiálu při deformaci. Pomocí těchto konstant lze vypočítat moduly pružnosti v tahu a ve smyku.

#### 3.3.1 Mooney – Rivlinova rovnice

Z fenomenologické teorie platí pro deformační energii izotropních těles platí:

$$W = C_1(I_1 - 3) + C_2(I_2 - 3) \quad (50)$$

kde  $I_1, I_2$  jsou tzv. invarianty deformace a platí pro ně:

$$I_1 = \lambda_x^2 + \lambda_y^2 + \lambda_z^2 \quad (51)$$

$$I_2 = \frac{1}{\lambda_x^2} + \frac{1}{\lambda_y^2} + \frac{1}{\lambda_z^2} \quad (52)$$

a  $C_1, C_2$  jsou nastavitelné parametry, které se stanoví porovnáním experimentu a uvedenou funkcí. Faktor 3 v rovnici (50) zaručuje, že  $W$  nedeformovaného tělesa je nulové. Dosazením rovnic (51, 52) do rovnice (50) pak získáme:

$$W = C_1 \left( \lambda_x^2 + \frac{2}{\lambda_x} - 3 \right) + C_2 \left( \frac{1}{\lambda_x^2} + 2\lambda_x - 3 \right) \quad (53)$$

za předpokladu, že:

$$\lambda_y = \lambda_z = \frac{1}{\lambda_x^{1/2}}. \quad (54)$$

Derivací a následnou úpravou rovnice (52) pak získáme:

$$\frac{F}{A_0} = C_1(\alpha - \alpha^{-2}) + C_2(1 - \alpha^{-3}), \quad (55)$$

kteří se označuje jako Mooney – Rivlinova rovnice (MR). Rovnice MR je schopná popsat tahové křivky všech kaučukovitých sítí velmi dobře až k inflexnímu bodu. Parametry  $C_1, C_2$  se vyhodnotí z experimentálních údajů, jestliže se data zpracují ve smyslu linearizovaného tvaru rovnice (55):



$$\frac{F}{2A_0(\alpha - \alpha^{-2})} = C_1 + C_2 \frac{1}{\alpha} \quad (56)$$

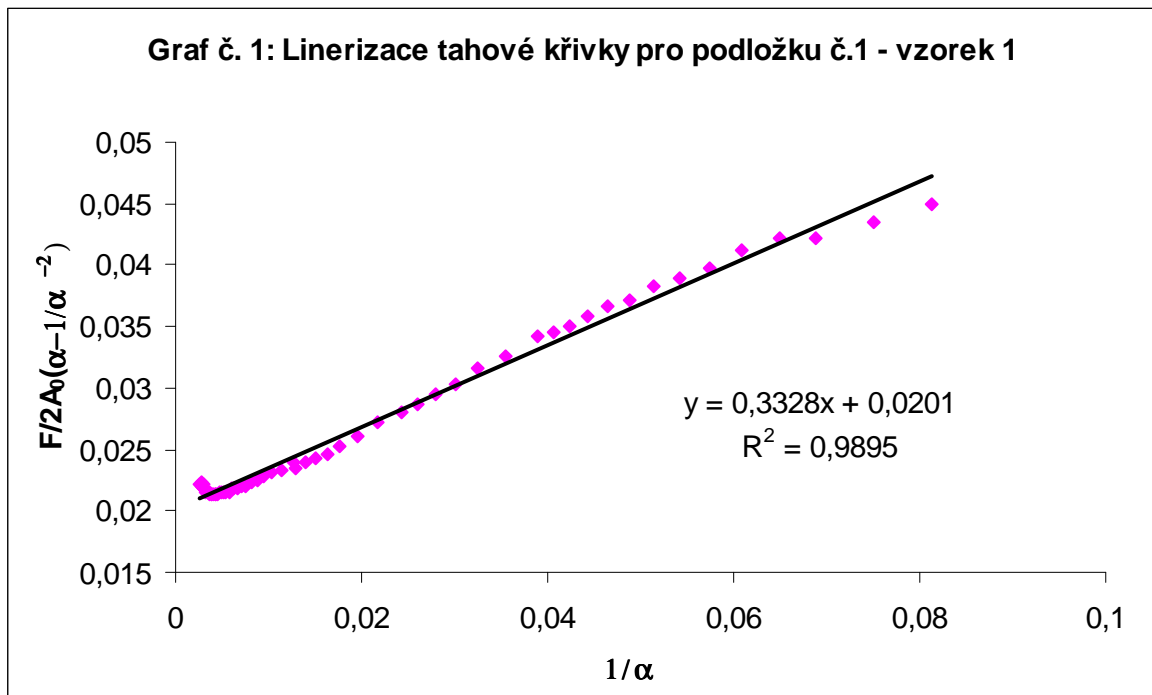
Hodnoty funkce na levé straně rovnice se vynesou proti  $1/\alpha$  a závislost se proloží přímkou, která vytíná na ose pořadnic úsek  $C_1$ , její směrnice je  $C_2$ . Nalezené hodnoty  $C_1$  vzrůstají u daného polymeru monotónně se stupněm zesíťování. Veličina  $C_2$  nejprve roste, avšak v oblasti běžných stupňů zesíťování se přiblíží limitní hodnotě. (29)

### 3.3.2 Postup a výsledky linearizace tahových křivek

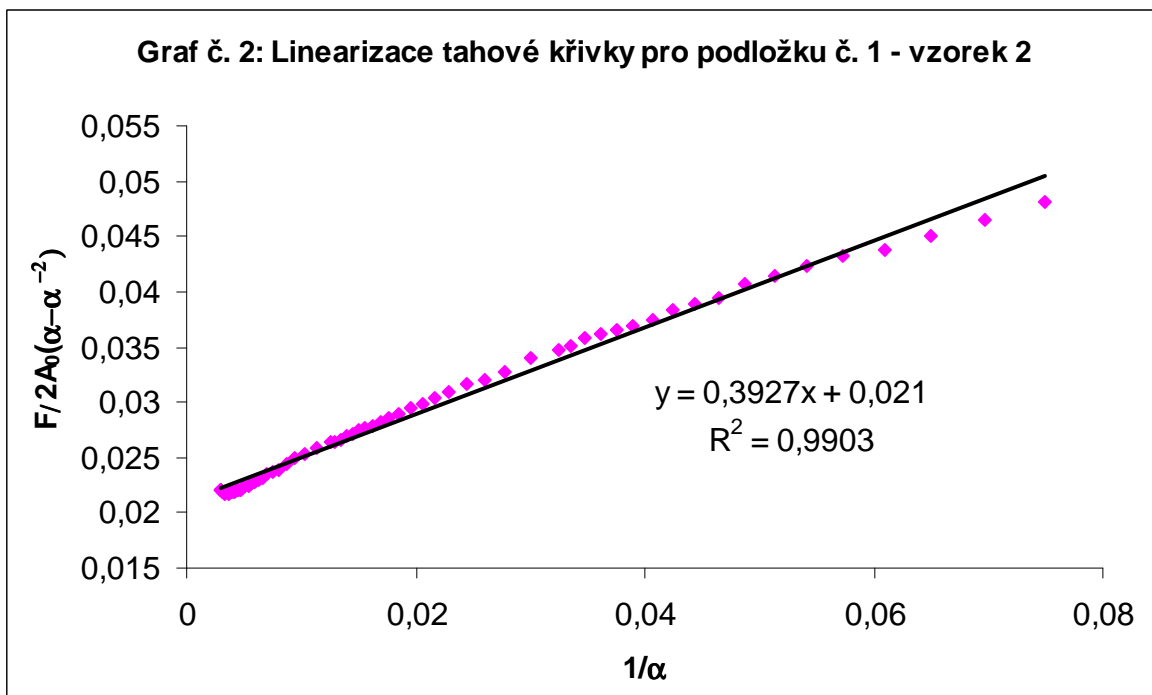
Získané grafické záznamy tahových křivek z tahové zkoušky byly převedeny do programu Microsoft Excel s následným provedením linearizace dle návodu uvedeného výše. Na vodorovnou osu  $x$  se vynesly hodnoty  $1/\alpha$  a na svislou osu  $y$  zase hodnoty  $F/2A_0(\alpha - \alpha^{-2})$  resp. hodnoty  $\sigma/2(\alpha - \alpha^{-2})$ , jelikož tahové křivky zaznamenávají závislost napětí na deformaci. Poté se závislost proložila přímkou a pomocí lineární regrese se získala rovnice dané přímky, ze které byla použita směrnice, která odpovídá hodnotě  $C_2$  a úsek na ose  $y$  zase konstantě  $C_1$ .

Na následujících obrázcích jsou znázorněny linearizované tahové křivky pro jednotlivé podložky a vzorky.

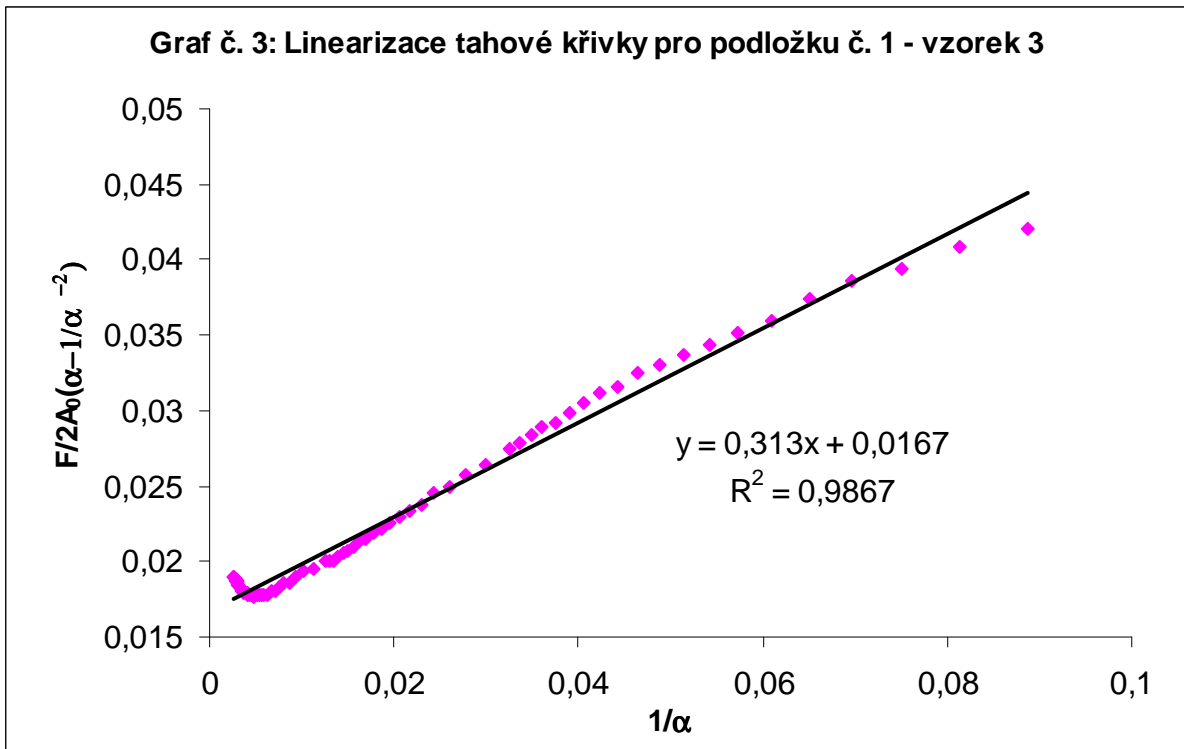
*Linearizace tahových křivek pro podložku č. 1*



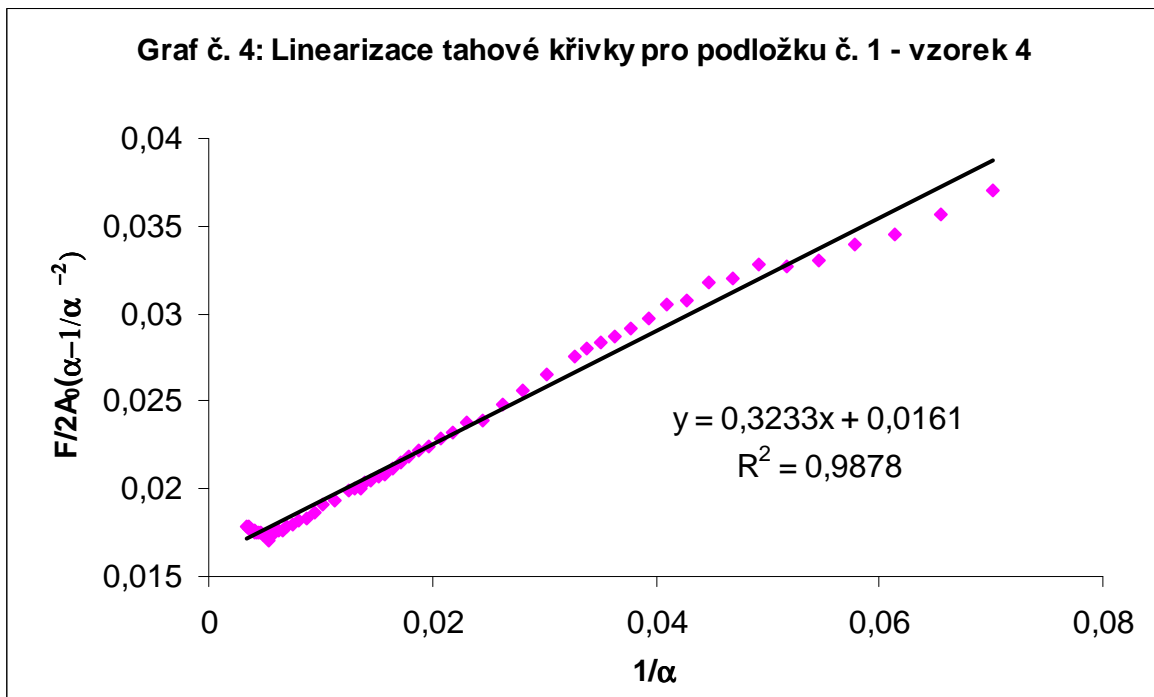
Obr. 18. Linearizace tahové křivky pro podložku č. 1 – vzorek č. 1



Obr. 19. Linearizace tahové křivky pro podložku č. 1 – vzorek č. 2

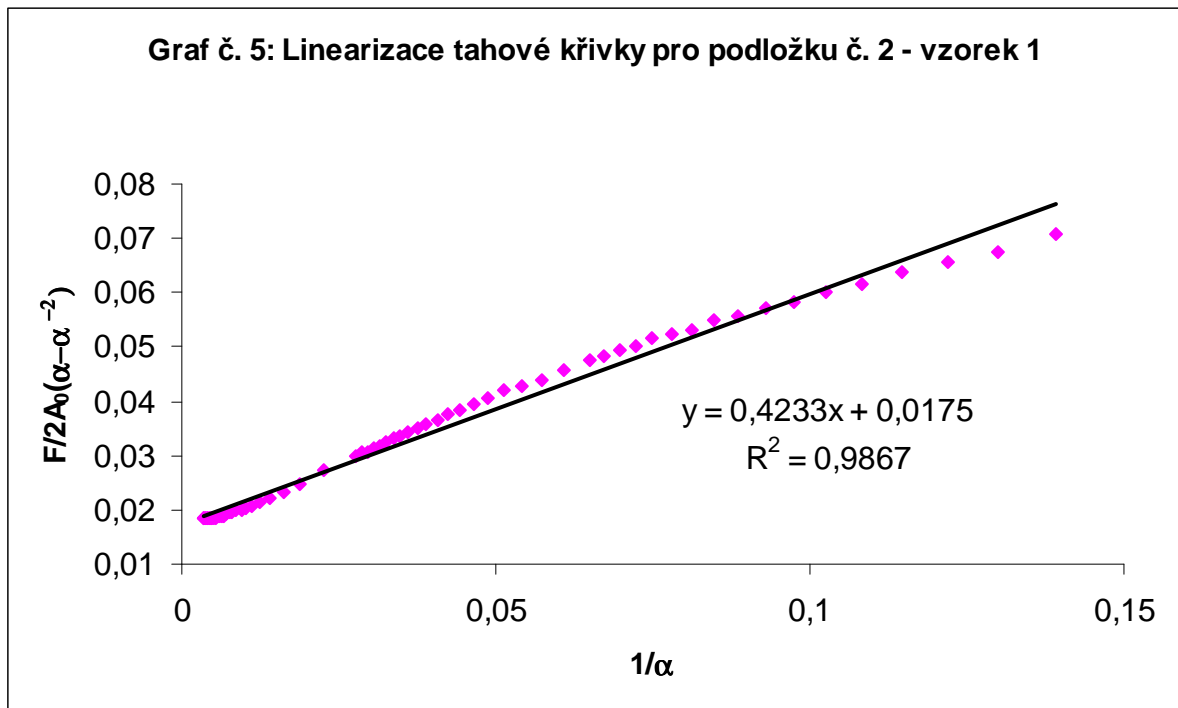


Obr. 20. Linearizace tahové křivky pro podložku č. 1 – vzorek č. 3

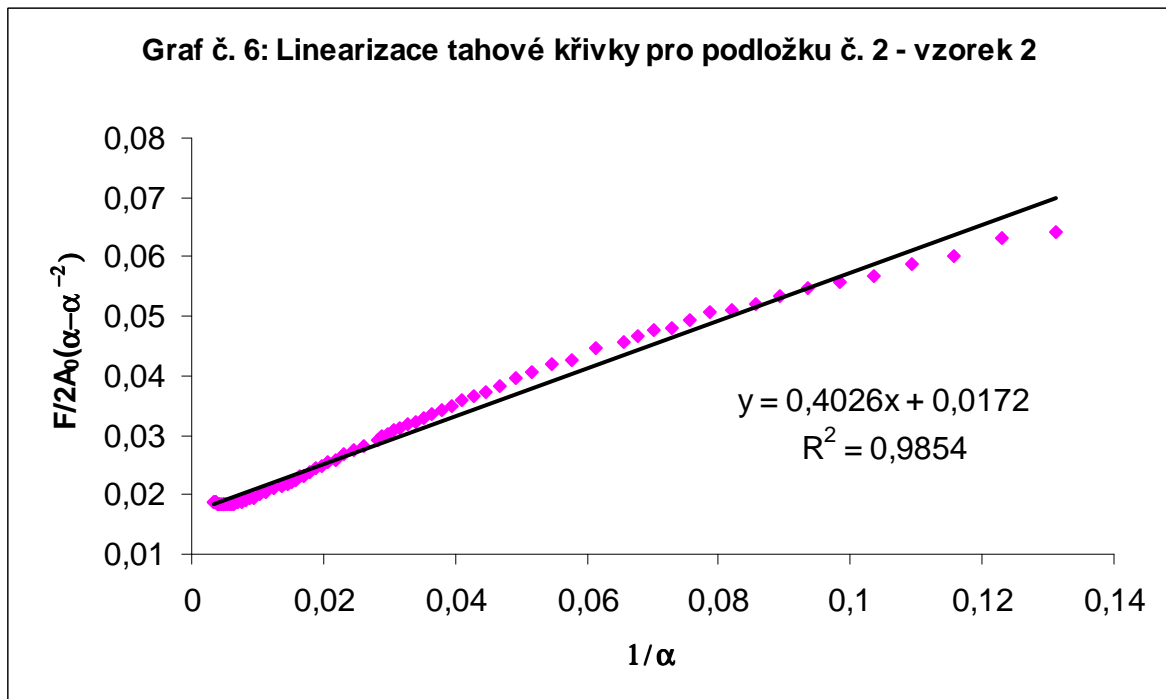


Obr. 21. Linearizace tahové křivky pro podložku č. 1 – vzorek č. 4

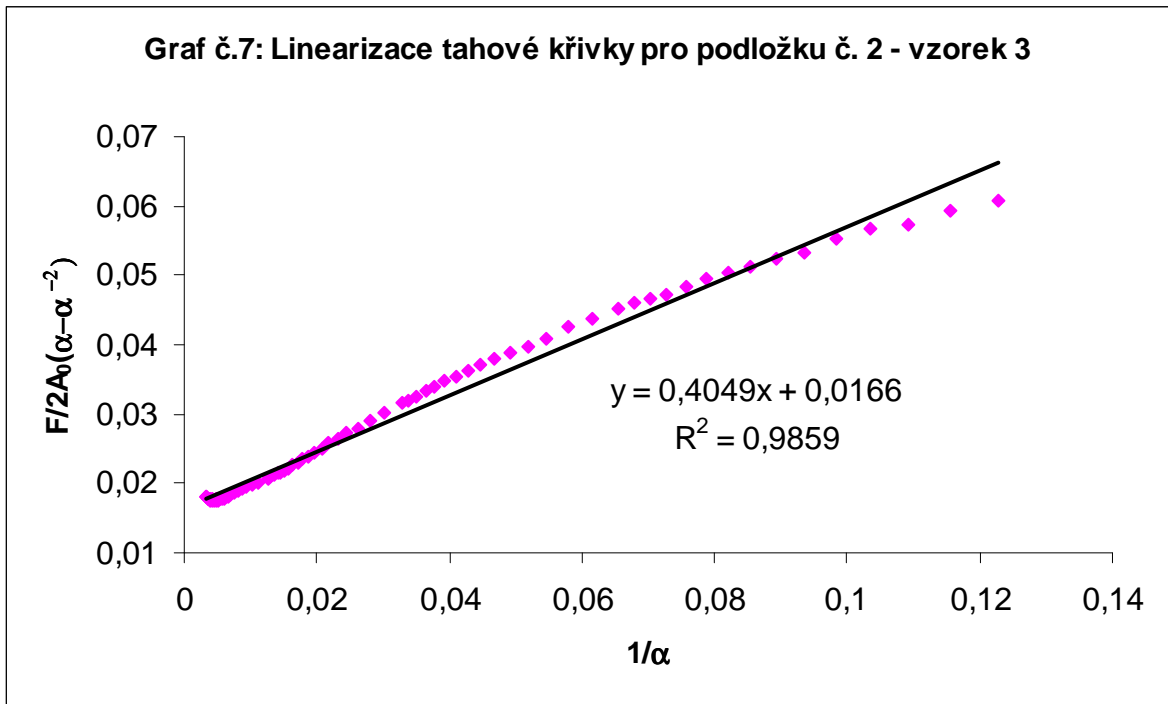
*Linearizace tahových křivek pro podložku č. 2*



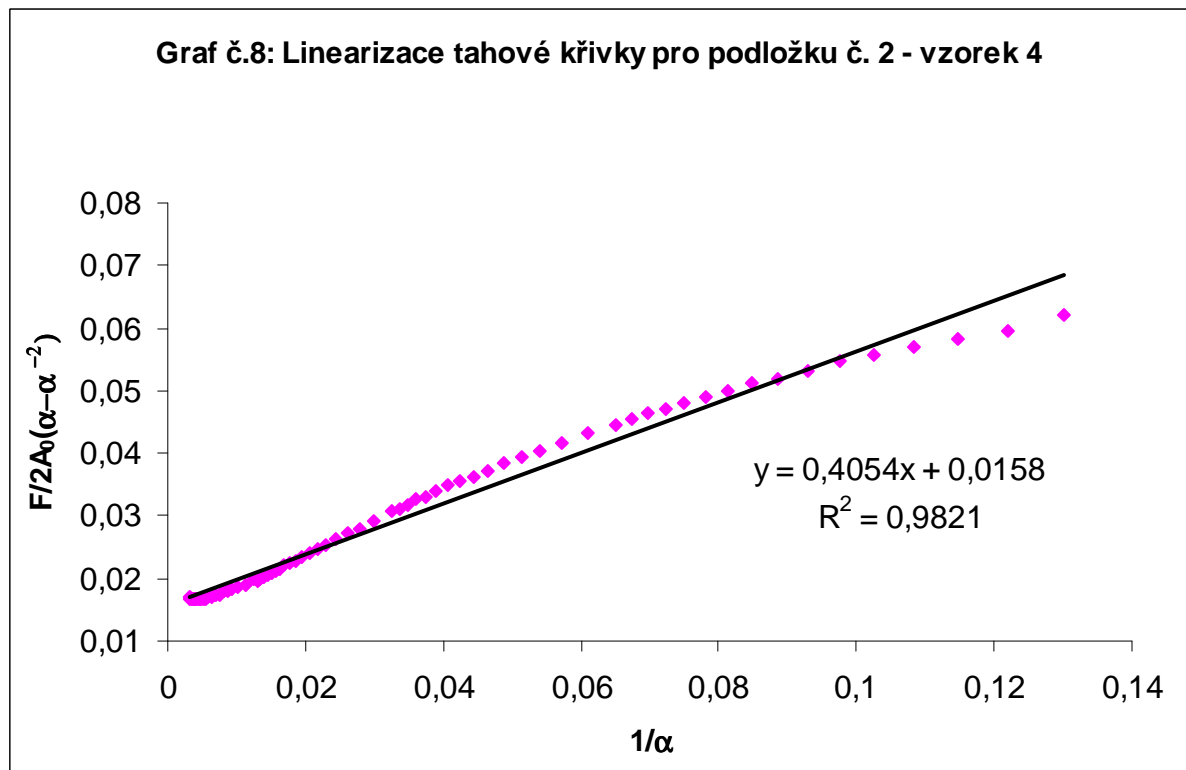
Obr. 22. Linearizace tahové křivky pro podložku č. 2 – vzorek č. 1.



Obr. 23. Linearizace tahové křivky pro podložku č. 2 – vzorek č. 2.



br. 24. Linearizace tahové křivky pro podložku č. 2 – vzorek č. 3.



Obr. 25. Linearizace tahové křivky pro podložku č. 2 – vzorek č. 4.

### 3.3.3 Výsledky měření linearizace – moduly pružnosti v tahu a ve smyku

V tab. VI. jsou uvedeny výsledky linearizace tahových křivek pro jednotlivé podložky a vzorky. Jsou to hodnoty konstant Mooney – Rivlinovy rovnice  $C_1$  a  $C_2$  a moduly pružnosti ve tahu a ve smyku. (3, 29)

Směrnice závislosti napětí na protažení při nulovém protažení udává Youngův modul pružnosti v tahu  $E$ . Z Mooney-Rivlinovy rovnice plyne vztah mezi modulem  $E$  a konstantami  $C_1$  a  $C_2$ :

$$E = \left[ \frac{d(F/A_0)}{d\alpha} \right]_{\alpha=1} = 6C_1 + 6C_2 \quad (57)$$

Neplněné vulkanizáty nemění při protahování objem, a proto je modul pružnosti v tahu trojnásobkem modulu pružnosti ve smyku:

$$E = 3G ; G = 2C_1 + 2C_2 \quad (58)$$

Tab. VI. Naměřené a vypočtené hodnoty Mooney – Rivlinových konstant a modulů

	Podložka č. 1				Podložka č. 2			
	Vzorek 1	Vzorek 2	Vzorek 3	Vzorek 4	Vzorek 1	Vzorek 2	Vzorek 3	Vzorek 4
$C_1$ [MPa]	0,0201	0,021	0,0167	0,0161	0,0175	0,0172	0,0166	0,0158
$C_2$ [MPa]	0,3328	0,3927	0,313	0,3233	0,4233	0,4026	0,4049	0,4054
$E$ [MPa]	2,117	2,482	1,978	2,036	2,645	2,519	2,529	2,527
$G$ [MPa]	0,706	0,827	0,659	0,679	0,882	0,840	0,843	0,842

### 3.4 Měření tvrdosti Shore A

Další zkouška, která charakterizuje materiálové vlastnosti je zkouška na měření tvrdosti. Existuje několik metod na měření tvrdosti pryže (tvrdost podle DVM, tvrdost IRHD, tvrdost Shore A, D), které se liší ve svých aplikacích. Nejvhodnější metodou pro měření měkké pryže je metoda Shore A, která byla použita také v tomto měření. (34)

Podstata zkoušky spočívá v měření odporu, který klade daný materiál v tomto případě pryž, proti vnuknutí jiného, tvrdšího tělesa. (34)

Při měření tvrdosti Shore A se postupuje tak, že se tvrdoměr přiloží na zkušební těleso (minimální tloušťky 6 mm, nejméně 12 mm od okrajem při více měřeních nejméně 5 mm od

sebe) tak, aby patka pevně přisedla po celé ploše. Tvrdost se odečítá za 3 vteřiny od okamžiku dotyku, mění-li se hodnota na stupnici i dále, pak se odečte tvrdost za 15 vteřin. Výsledná hodnota tvrdosti je aritmetický průměr nejméně tří měření, povolená odchylka od průměru nesmí být větší než  $\pm 5\%$ . (34)

Výsledné hodnoty tvrdosti dávají jen základní informace o materiálové charakteristice a nemůžou se brát jako směrodatné výsledky určující konkrétní kaučuk, jelikož je tvrdost např. dosti ovlivněna stupněm plnění.

### 3.4.1 Postup a výsledky měření tvrdosti Shore A

Měření tvrdosti se provedlo v laboratoři na Ústavu inženýrství polymerů na UTB ve Zlíně na přístroji pro měření tvrdosti Shore A, opět pro oba typy podložek a pro 6 vzorků od každého typu položky dle ČSN ISO 7619. Zkušební tělesa měla tvar čtverce a rozměrech 40 mm a tloušťce 4 mm.

Tab. VII. Naměřené hodnoty tvrdosti a vypočtená statistika pro oba typy podložek

Číslo měření	Vzorek č.1	Vzorek č.2
1	63	70
2	64	72
3	61,5	69
4	60,5	68
5	62	70,5
6	61,5	68
<b>Výběrový průměr <math>\bar{x}</math></b>	62,08	69,58
<b>Směrodatná odchylka <math>s</math></b>	1,133	1,426
<b>Minimální hodnota <math>x_{\min}</math></b>	60,5	68
<b>Maximální hodnota <math>x_{\max}</math></b>	64	72
<b>Medián <math>\tilde{x}_{50}</math></b>	61,75	69,5

kde  $\tilde{x}_{50}$  (50 %  $\alpha$ -kvantil) se nazývá medián a představuje nejtypičtější hodnotu ve statistickém souboru.

### 3.5 Měření odrazové pružnosti podle Schoba

Zkouška odrazové pružnosti je jednou z nejrychlejších a jednoduchých metod k určení schopnosti materiálů, hlavně pryžových, absorbovat resp., vracet mechanickou energii při deformaci rázem. (33)

K měření odrazové pružnosti se ustálily dvě metody – podle Schoba a podle Lüpkeho, které se liší pouze v tom, že měření podle Lüpkeho se používá při měření při různých teplotách. Pro měření v této práci byla zvolena metoda podle Schoba, jelikož je jednodušší a tomuto měření zcela vyhovuje. (33)

#### 3.5.1 Postup a výsledky měření odrazové pružnosti podle Schoba

Měření odrazové pružnosti bylo provedeno v laboratoři na Ústavu inženýrství polymerů na UTB ve Zlíně dle normy ČSN 62 1480 na přístroji Schob opět pro oba typy podložky pro 3 vzorky od každého typu podložky pro dvě měřítka stupnice. Před samotným měřením každého vzorku se nechalo kladivo 3krát dopadnout na vzorek a provedlo se tzv., slepé měření, kterým se redukuje chyby měření díky tixotropii pryže. Pro naměřené hodnoty byly provedeny statistické výpočty a výsledky jsou uvedeny v tab. VIII.

Tab. VIII. Naměřené a vypočtené hodnoty odrazové pružnosti pro oba typy podložek

	Č. měření	Podložka č.1	Podložka č.2
Odrazová pružnost [%] při H = 1	1	25	36
	2	24	35,5
	3	24,5	36
Výběrový průměr $\bar{R}$ [%]		24,5	35,833
Směrodatná odchylka $s$ [%]		0,408	0,236
Odrazová pružnost [%] při H = 0,5	1	49	72
	2	49	70,5
	3	48,5	72
Výběrový průměr $\bar{R}$ [%]		48,83	71,5
Směrodatná odchylka $s$ [%]		0,236	0,707

Pro odrazovou pružnost se vypočítal pomocí studentova rozdělení 95% interval spolehlivosti, ve kterém, se naměřené hodnoty pohybují podle vztahu:

$$R = \left( \bar{R} \pm t_k \frac{s}{\sqrt{n}} \right) \quad (59)$$



kde  $t_k$  je studentův činitel (studentův  $\alpha$ -kvantil) a platí pro něho  $t_k = f(\alpha, \nu)$ , kde  $\alpha$  je intervalový odhad ( $\alpha = 0,95$ ) a  $\nu = n-1$ , kde  $n$  je počet hodnot ve statistickém souboru ( $n = 3 \Rightarrow \nu = 2$ ). Hodnoty  $t_k$  jsou tabelovány a pro  $n = 3$  má hodnotu  $t_k = 4,303$ .

Tab. IX. Intervaly spolehlivosti hodnot odrazové pružnosti pro obě podložky

	<b>Podložka č. 1</b>	<b>Podložka č. 2</b>
<b>95% interval spolehlivosti</b>	$R = (48,8 \pm 0,6)$	$R = (71,5 \pm 1,8)$

### 3.6 Modelování a pevnostní výpočet pryžových podložek pomocí MKP

V této části je popis pevnostního výpočtu zadaných pryžových podložek. Pomocí tahové zkoušky byly získány potřebné konstanty Mooney – Rivlinovy rovnice, která celkem přesně charakterizuje deformační chování pryže. Tyto konstanty byly nezbytné k popisu kaučukovitého materiálu v softwaru Samcef.

V následujících odstavcích je postupně popsán postup modelování pryžových podložek od krátkého popisu softwaru Samcef, přes stanovení vhodných zátěžných stavů a okrajových podmínek až po výpočet a vyhodnocení výsledků.

#### 3.6.1 Metoda konečných prvků

MKP – angl. Finite Element Method (FEM) je metoda, která spočívá v tom, že spojité kontinuum nahradíme diskretním kontinuem, tj. rozdělíme těleso na určitý konečný počet elementů, které jsou mezi sebou spojeny v uzlech. Jednotlivé prvky mají stejné vlastnosti jako celková struktura. (5, 6, 7)

#### *Krátký popis software Samcef*

Software Samcef je program belgické firmy Samtech, který se využívá pro pevnostní výpočet pomocí MKP. Obsahuje v sobě 3-D modelář, proto je možno konkrétní modely sestrojít přímo v prostředí Samcef. (35)

Program je rozdělen na pre-processing, ve kterém se provádí CAD modelování tělesa, vytváření sítě konečných prvků, stanovení jednotek, definování materiálu, zátěžných stavů a okrajových podmínek. V processoru softwaru je provedena analýza v našem případě

nelineární. V postprocessoru programu simulujeme získané výsledky výpočtu tj. rozložení tenzoru napětí a deformací a deformační chování modelu. (35)

### 3.6.2 Návrh a modelování pryžové podložky

Před samotným modelováním byly změřeny rozměry konkrétních podložek. Na následujících obrázcích č.26 a č.27 jsou znázorněny tvary obou podložek. (35)

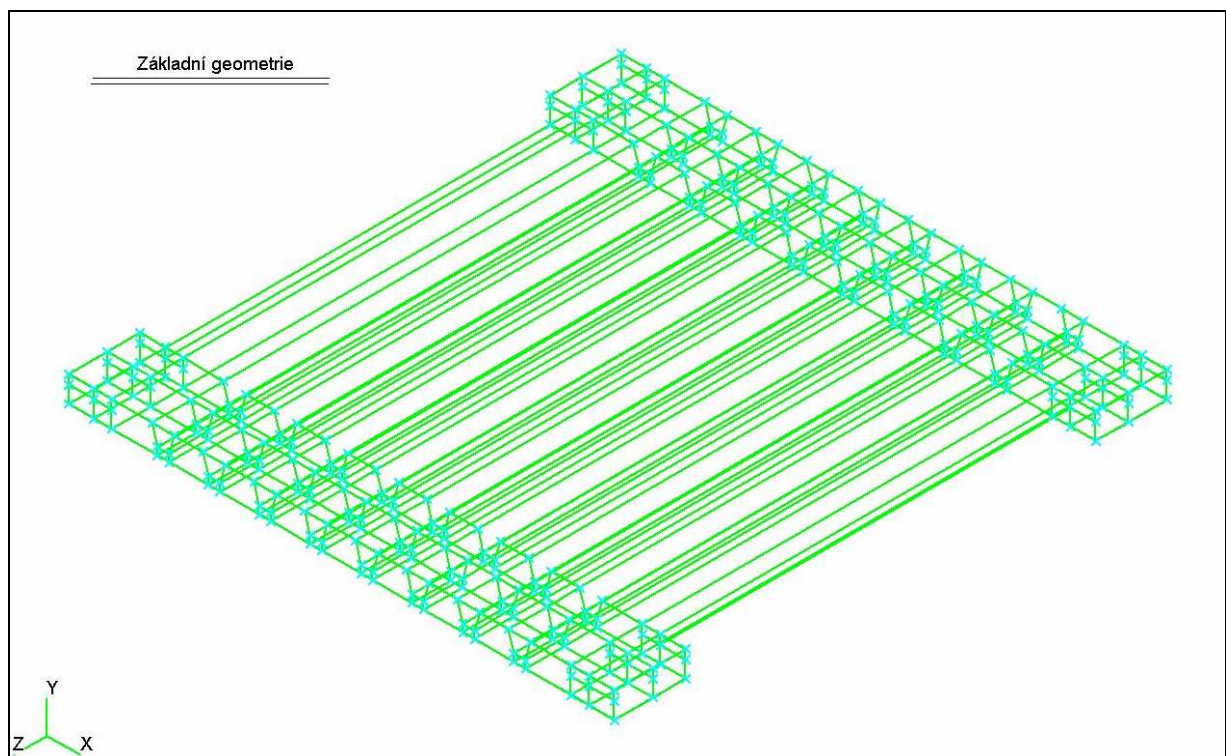


Obr. 26. Pryžová železniční podkladová podložka č. 1.

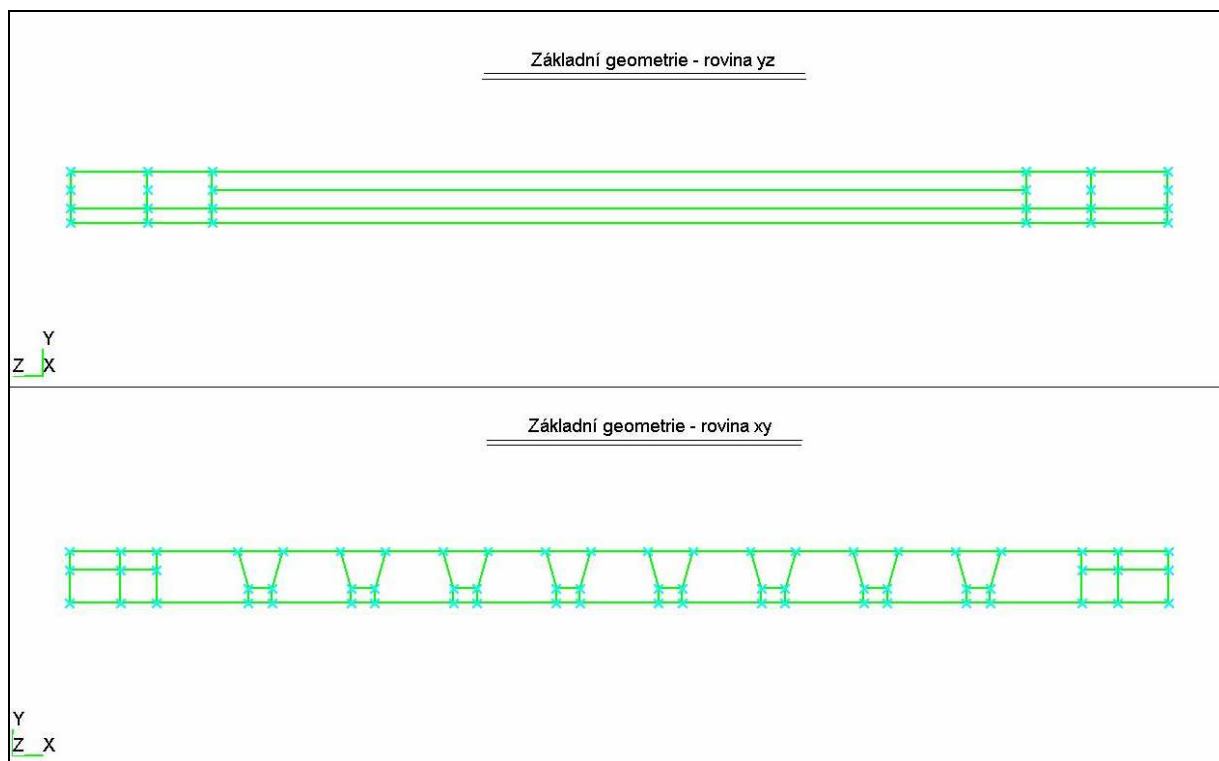


Obr. 27. Pryžová železniční podkladová podložka č. 2.

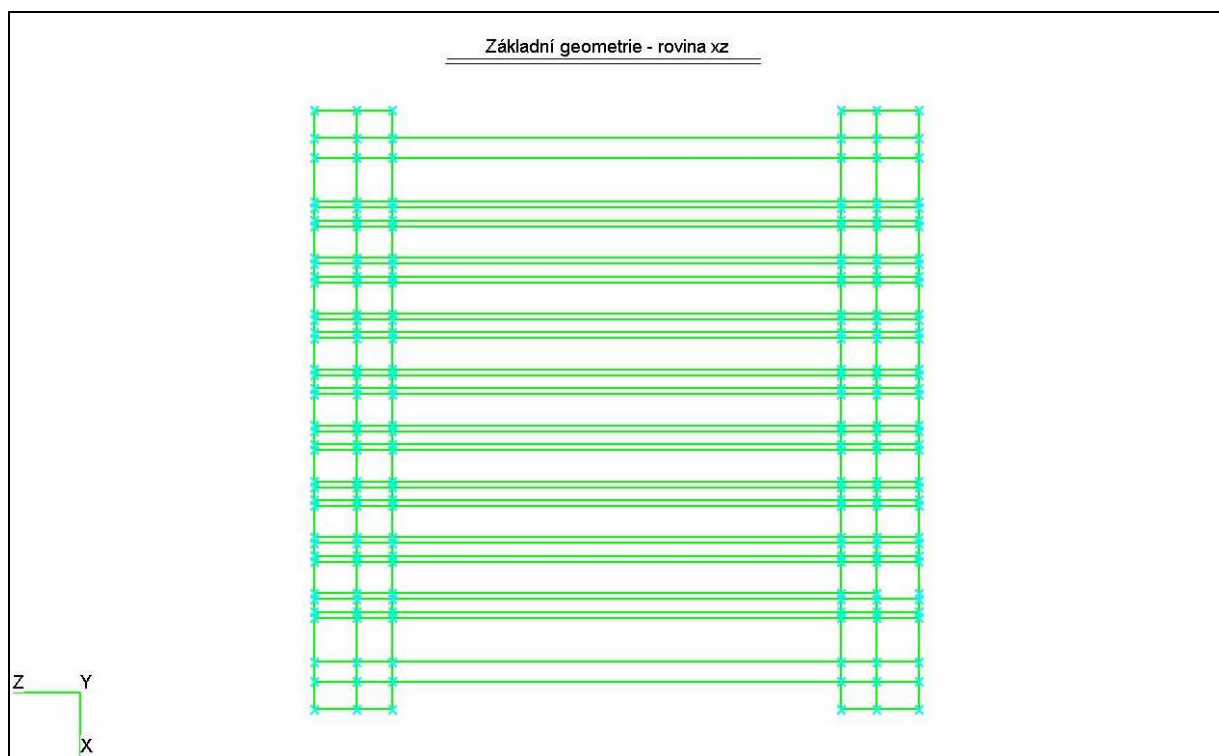
3D modelář v softwaru Samcef je podobný CAD (Computer - Aided Design) programům. V dalším kroku byly postupně namodelovány v pre-processingu software obě podložky jako 3-D model. Na následujících obrázcích je zobrazena základní geometrie modelu podložek..



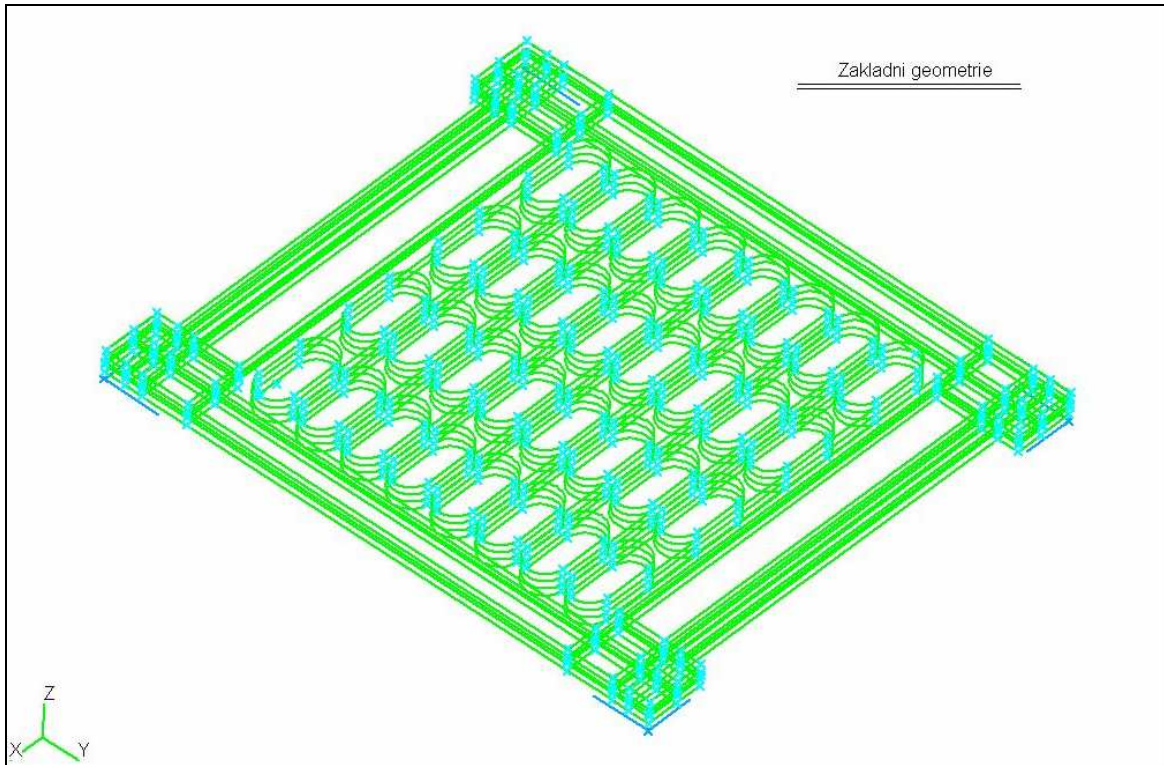
Obr. 28. Základní geometrie podložky č. 1 – izometrický pohled.



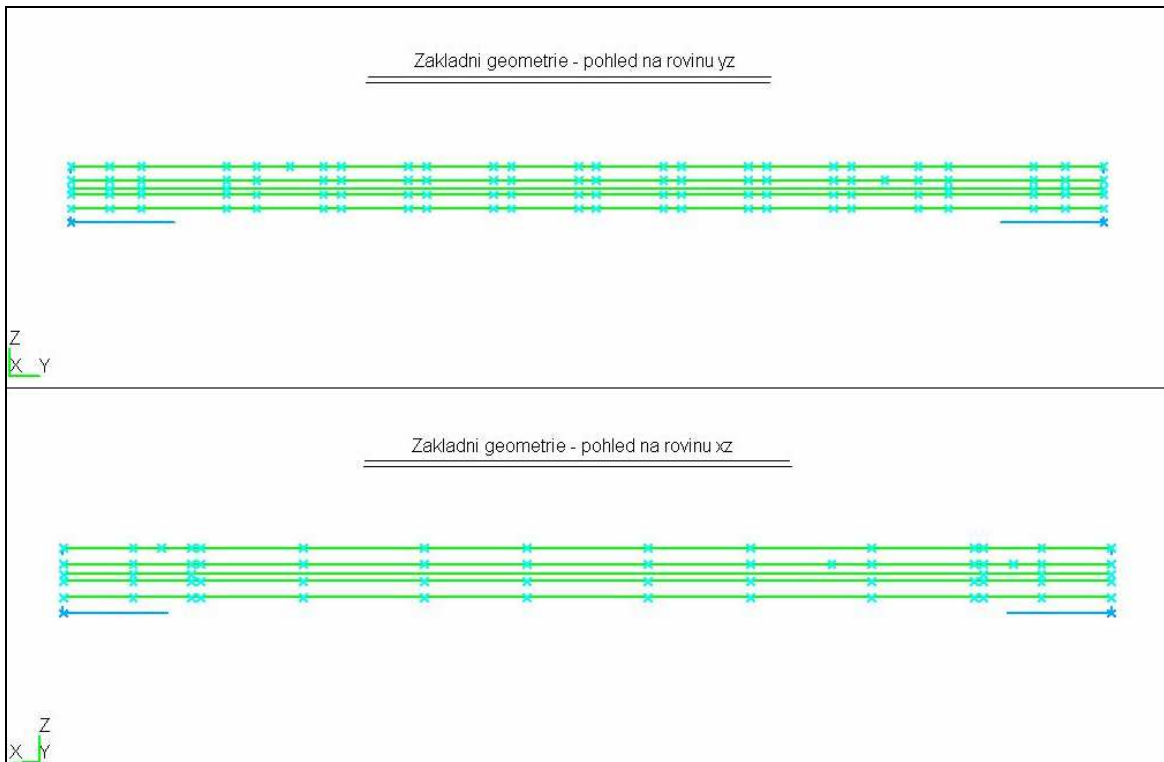
Obr. 29. Základní geometrie podložky č. 1 – pohled na roviny yz a xy.



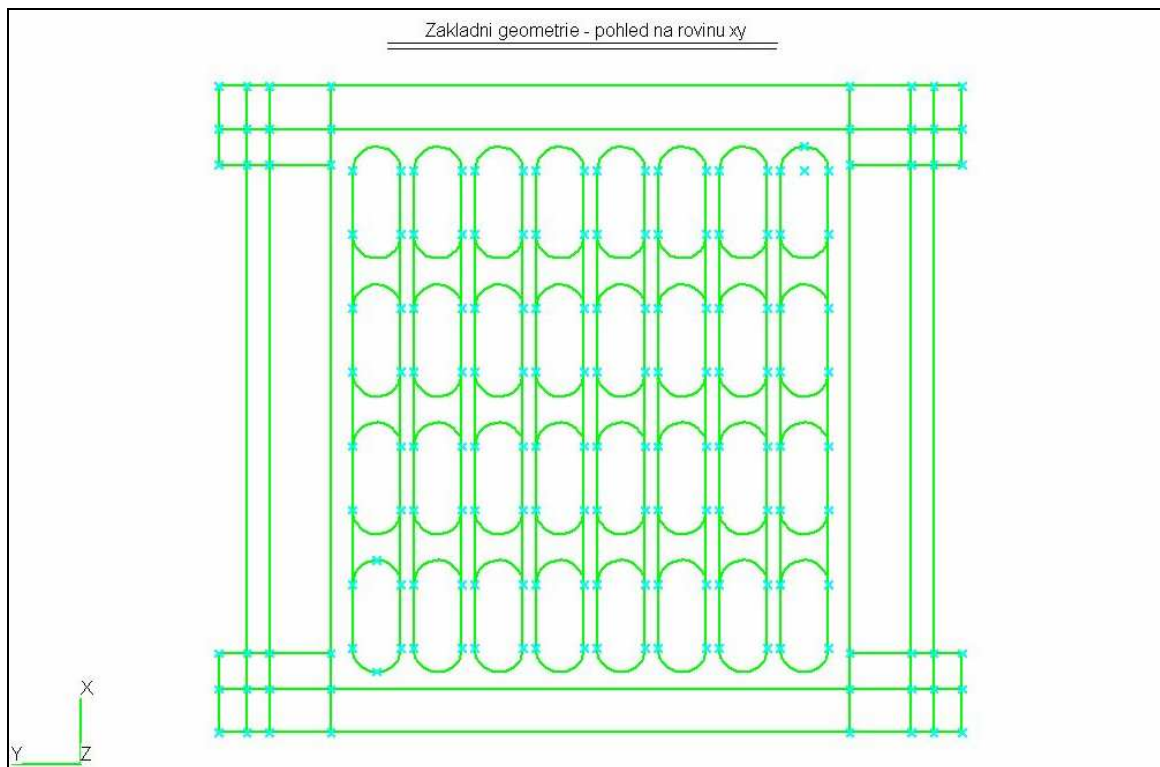
Obr. 30. Základní geometrie podložky č. 1 – pohled na rovinu xz.



Obr. 31. Základní geometrie podložky č. 2 – izometrický pohled.

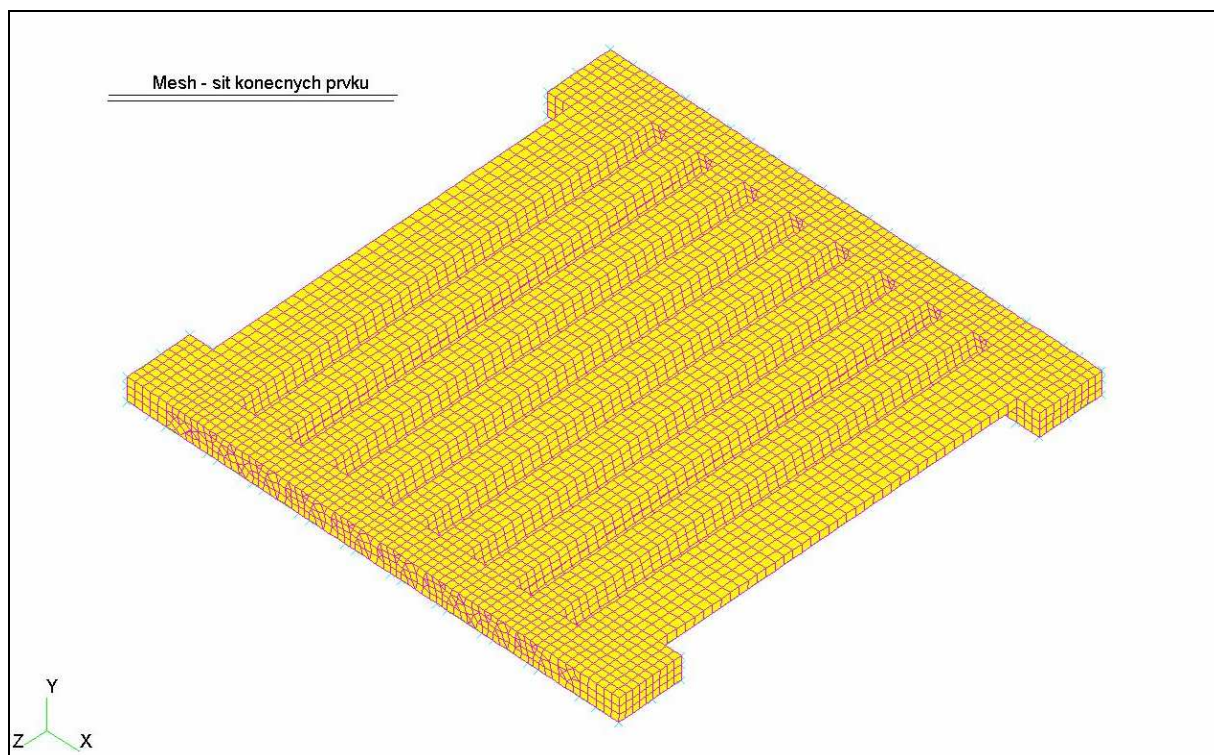


Obr. 32. Základní geometrie podložky č. 2 – pohled na rovinu yz a xz.

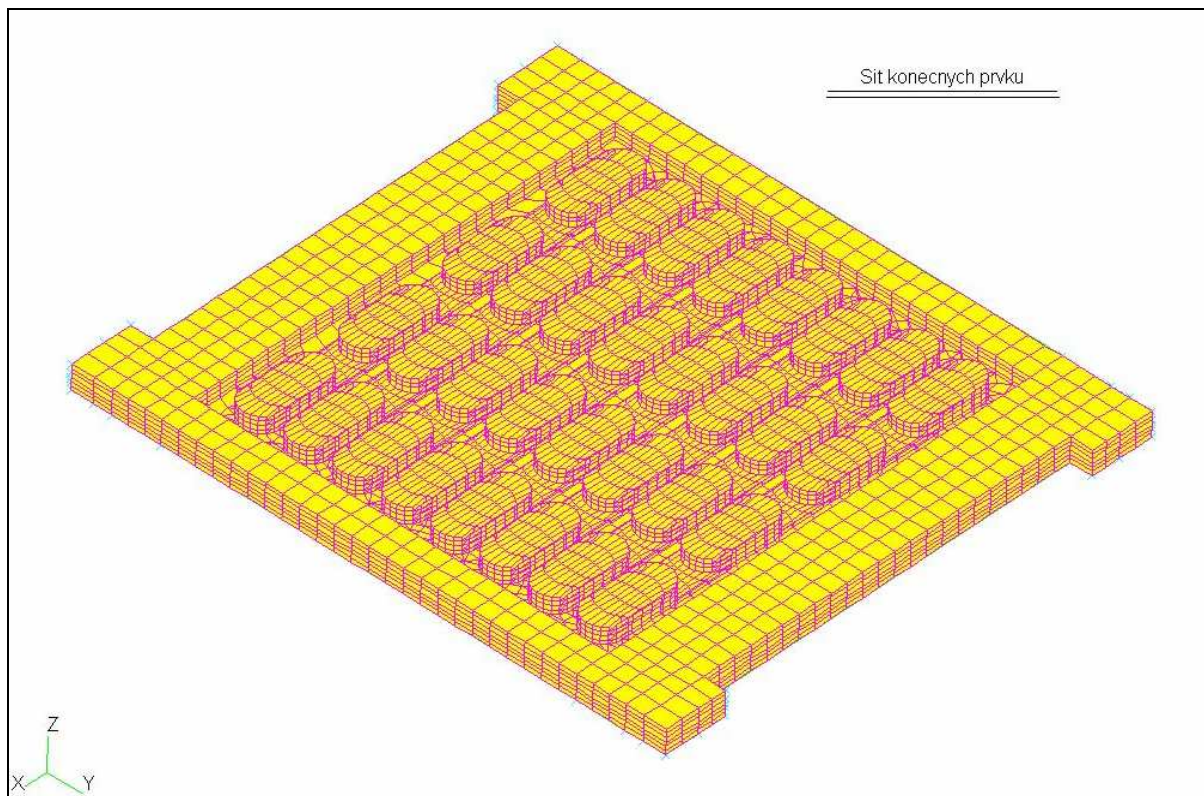


Obr. 33. Základní geometrie podložky č. 2 – pohled na rovinu xy.

Dalším krokem na 3-D modelu bylo vytvořit konečnoprvkový model podkladových desek. Výsledný model s objemovými prvky pro obě podložky je na následujících obrázcích.



Obr. 34. 3-D síť konečných prvků pro podložku č.1.



Obr. 35. 3-D síť konečných prvků pro podložku č.2.

### 3.6.3 Okrajové podmínky a zátěžné stavy

V této části práce byly nedefinovány pro obě podložky okrajové podmínky a obě podložky byly zatíženy provozními zatíženími. Zadané hodnoty zatížení a okrajových podmínek byly voleny tak, aby co nejpřesněji simulovaly skutečný stav podkladových desek za provozu. Na správné volbě okrajových podmínek značně závisí výsledky výpočtu.

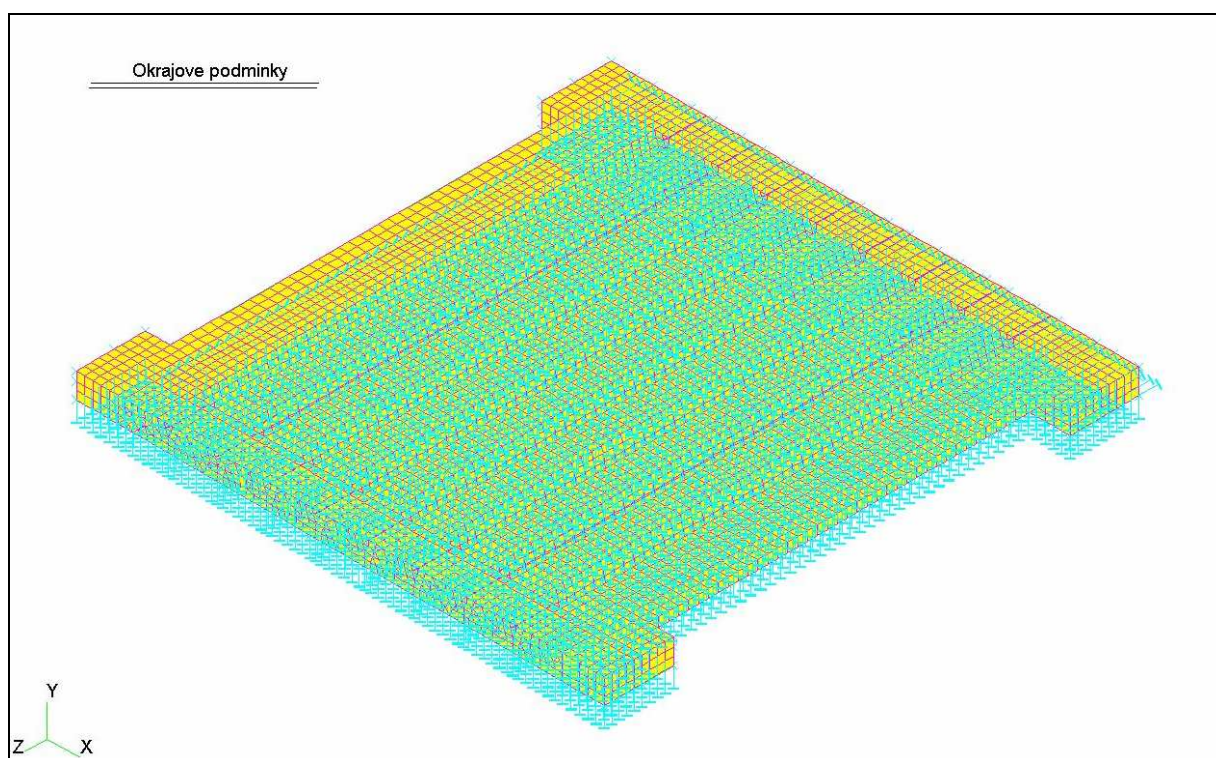
#### *Okrajové podmínky*

Zadání okrajových podmínek je jedna z důležitých operací, která se musí před vlastním pevnostním výpočtem provést. Jedná se vlastně o správné určení uložení modelovaného tělesa v prostoru tj. odebrání stupňů volnosti u tělesa tak, aby bylo zamezeno pohybu tělesa v prostoru. Nevhodně zadané okrajové podmínky vedou ke špatným nebo zkresleným výsledkům.

Mezi základní druhy pohybu tělesa v prostoru patří posuv a rotace a jejich vzájemná kombinace. Okrajové podmínky jsou od těchto možných pohybů tělesa odvozeny. Pro stanovení okrajových podmínek bylo nutné určit uložení podložek a jejich interakce s okolím.

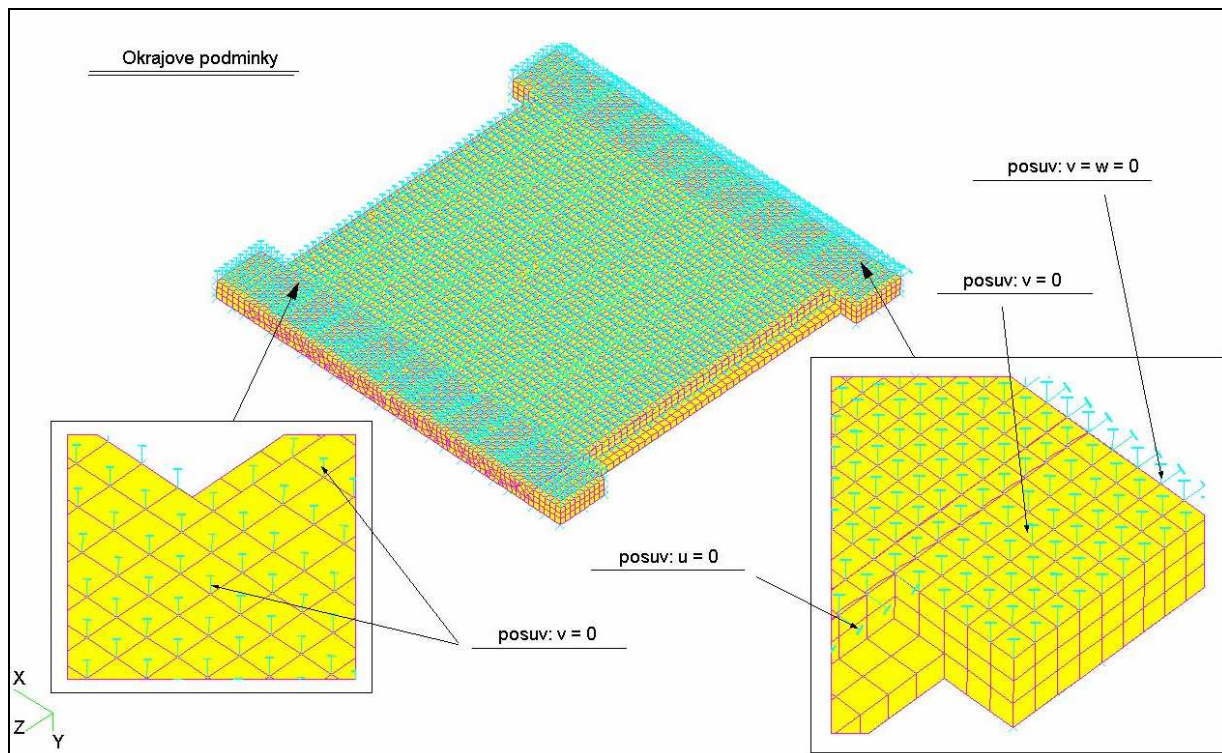
Jak je vidět na obr. 2, pryžová podložka je umístěna mezi betonovým pražcem a ocelovou kolejnicí. Podložce je zabráněno pohybovat se ve směru působení tíhové a zátěžné síly. Teoreticky by se podložka mohla pohybovat v rovině kolmé na působení tíhové a zátěžné síly, ale znemožňuje třecí síla mezi podložkou, betonovým pražcem a ocelovou kolejnicí.

Okrajové podmínky byly proto zadány tak, aby byla podložka po celé spodní ploše podepřena a na hranách bylo zamezeno posuvům ve dvou zbývajících osách. Označení  $u$ ,  $v$ ,  $w$  znamená posuvy v osách  $x$ ,  $y$ ,  $z$ .

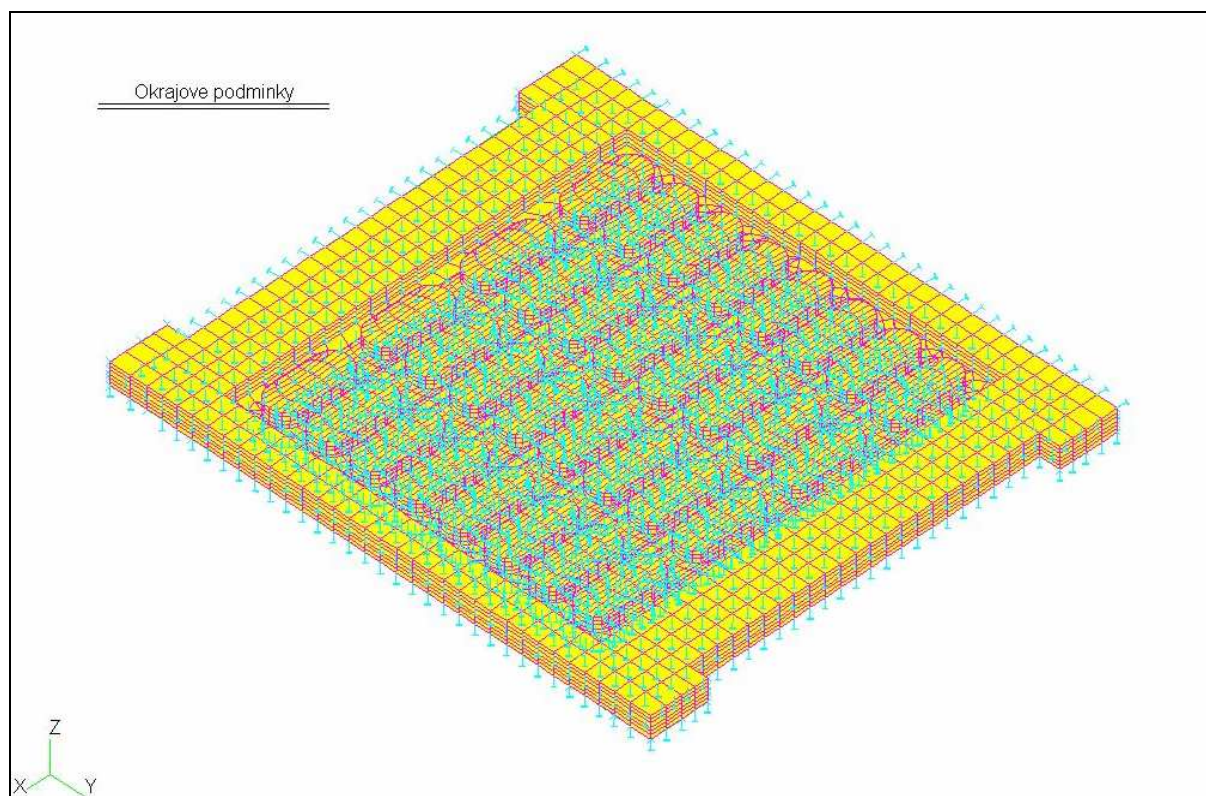


Obr. 36. Okrajové podmínky pro podložku č. 1

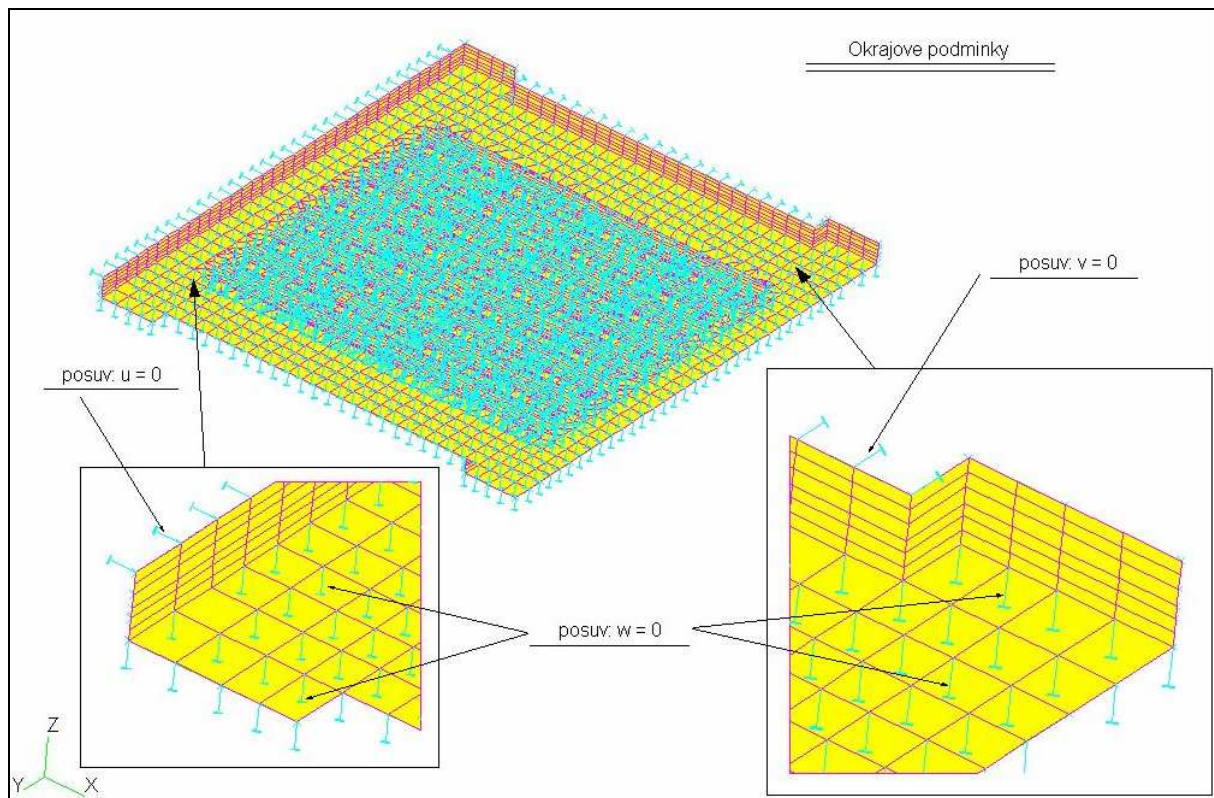




Obr. 37. Okrajové podmínky pro podložku č. 1 – detailní pohled.



Obr. 38. Okrajové podmínky pro podložku č. 2.



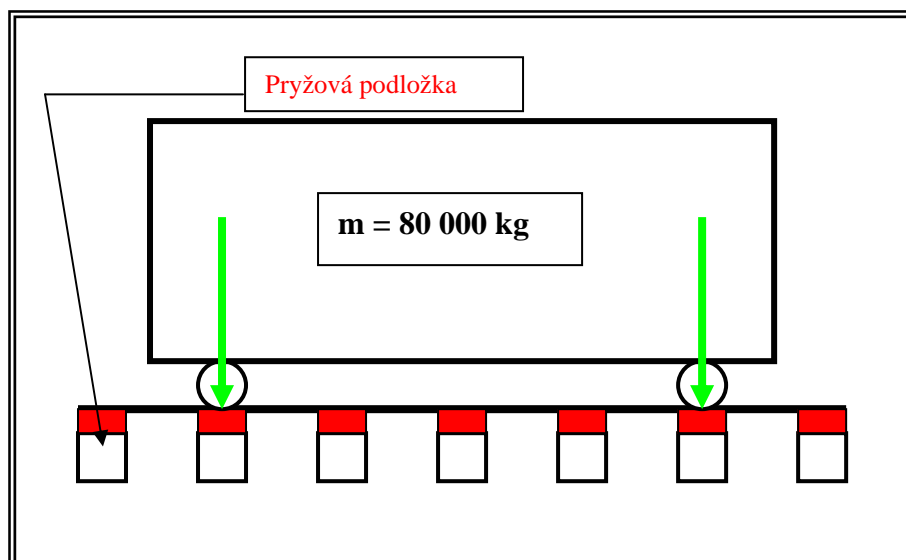
Obr. 39. Okrajové podmínky pro podložku č. 2 – detailnější pohled.

### ***Zátěžné stavy***

Jako zátěžný stav tělesa je uvažovaný stav, kdy jsou na těleso vhodně aplikovány působící okolní síly. Na každé těleso na zemském povrchu působí tíhová síla Země, uvnitř tělesa působí objemové síly. Proto je při modelování důležité správně zátěžný stav definovat, podobně jako stanovit okrajové podmínky. Je třeba vhodně navrhnout interakci tělesa s okolím, to zda se jedná o síly statické či dynamické, jak velké tyto síly jsou a jakým směrem působí

V software Samcef je několik možností jak zátěžný stav definovat. Můžeme zde nadefinovat účinky tlaku, síly zadat do uzlů nebo na linii, sílu definovat jako statickou nebo naopak sílu zadat jako funkci času apod.

V případě pryžových podložek se při určování sil, které na ně působí, postupovalo podle obr. 40.



Obr. 40. Síly působící od vlastní hmotnosti vlaku.

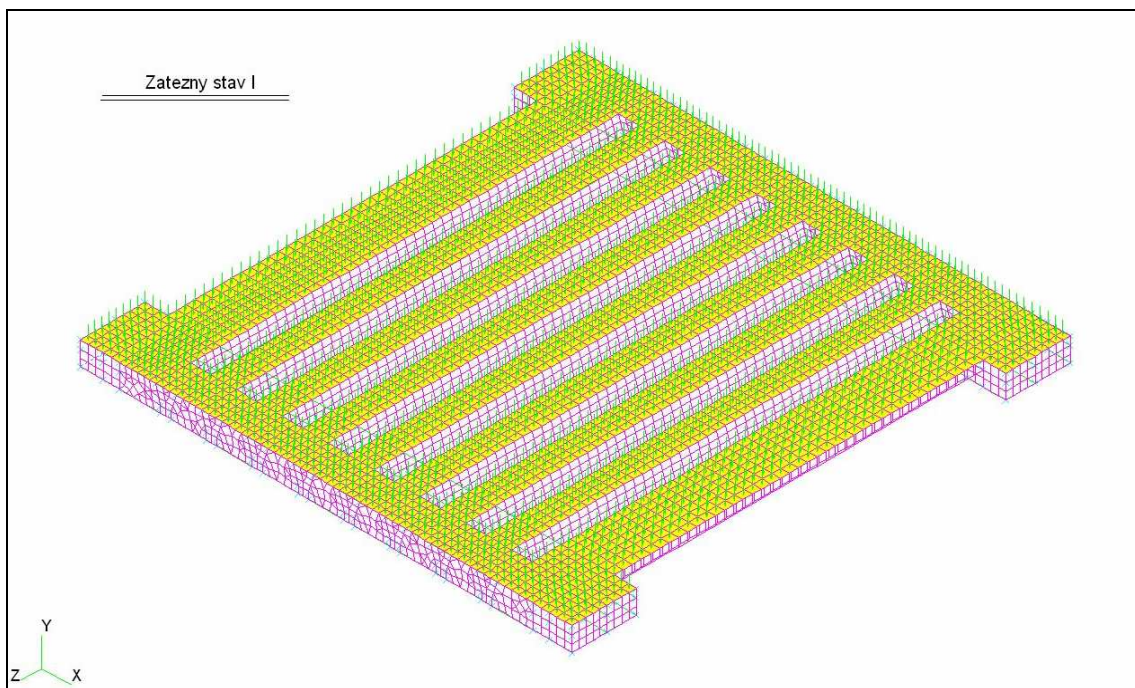
Na podložku působí tlaková síla vyvolána tíhou kolejnice, ale především tlaková síla od samotného vagónu či lokomotivy. Bylo proto nutné určit nejhorší polohu vlaku vůči podložce vzhledem k velikosti působící síly. Nejhorší zátěžný stav podle obr. 40 nastane v okamžiku, kdy se jedno z kol vlaku nachází přímo na podložce - v takovém případě je tlak na podložku od vlaku největší.

Lokomotiva má hmotnost cca 87 tun, byla uvažována zátěž 80 tun. Jeden vagón má celkem 8 kol a uvažovala se situace, kdy může stát na podložce pouze jedno z nich. Jelikož jsou obě kola těsně u sebe, uvažovala se lokomotiva jako čtyřkolová. Celková hmotnost lokomotivy je 80 tun, zátížení od jednoho kola na jednu podložku je 20 tun. Podle vztahu:

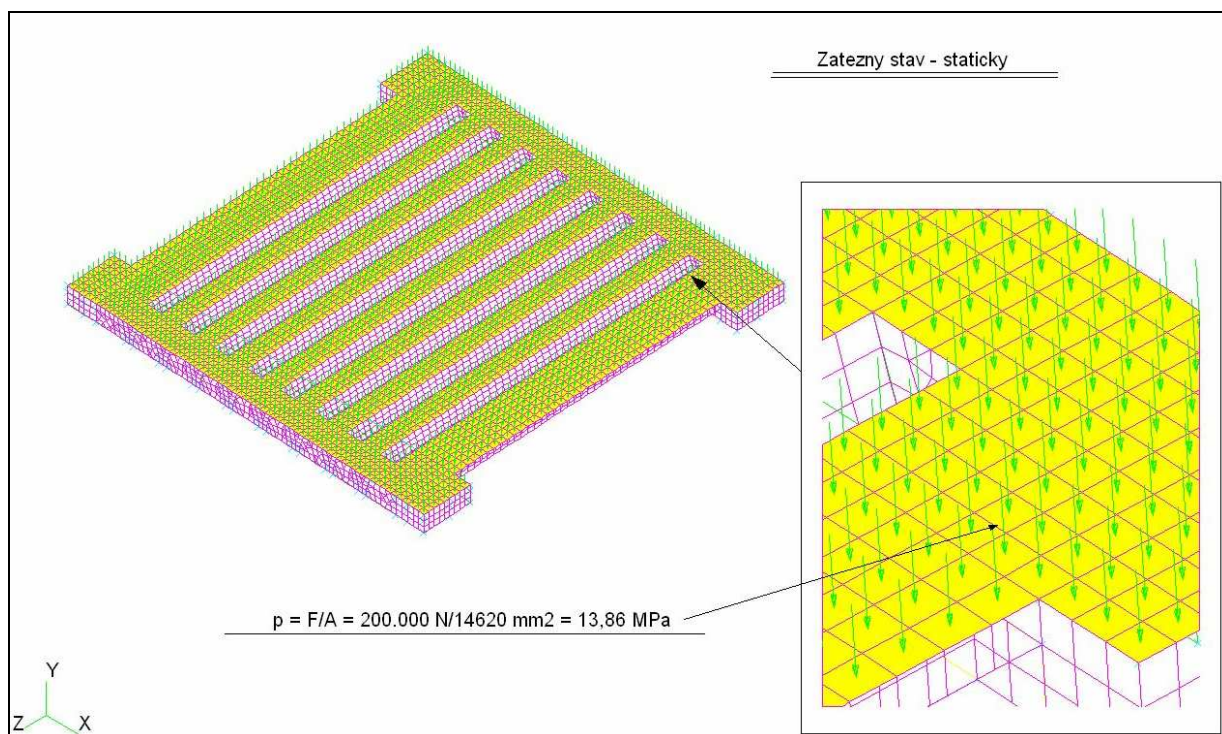
$$p = \frac{F}{S} \quad (60)$$

kde  $F$  je zatěžovací síla od jednoho kola lokomotivy a  $S$  je plocha podložky na kterou síla působí, se vypočítal tlak působící na podložku. Působící síla je  $F = 200$  kN, plocha  $S = 14\,620$  mm<sup>2</sup>, výsledný tlak je  $p = 13,68$  MPa. Tato hodnota je statický tlak, který působí na podložku, když je vlak v klidu.

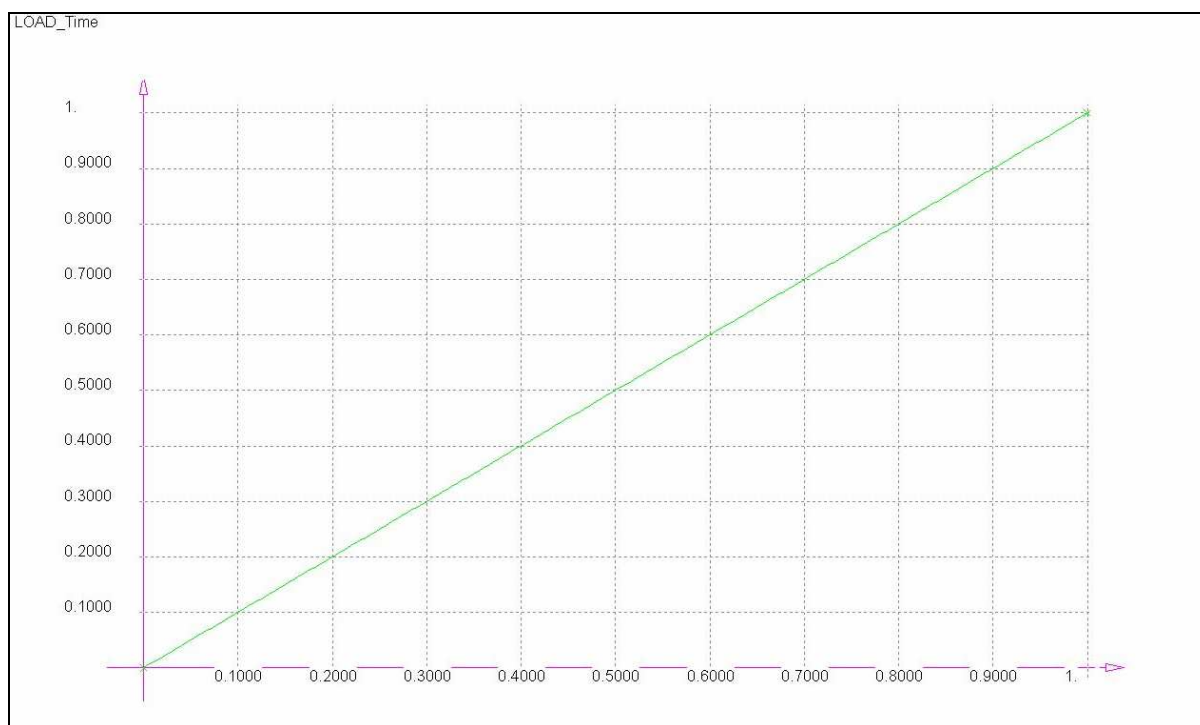
Na následujících obrázcích jsou znázorněny zátěžné stavy pro obě podložky.



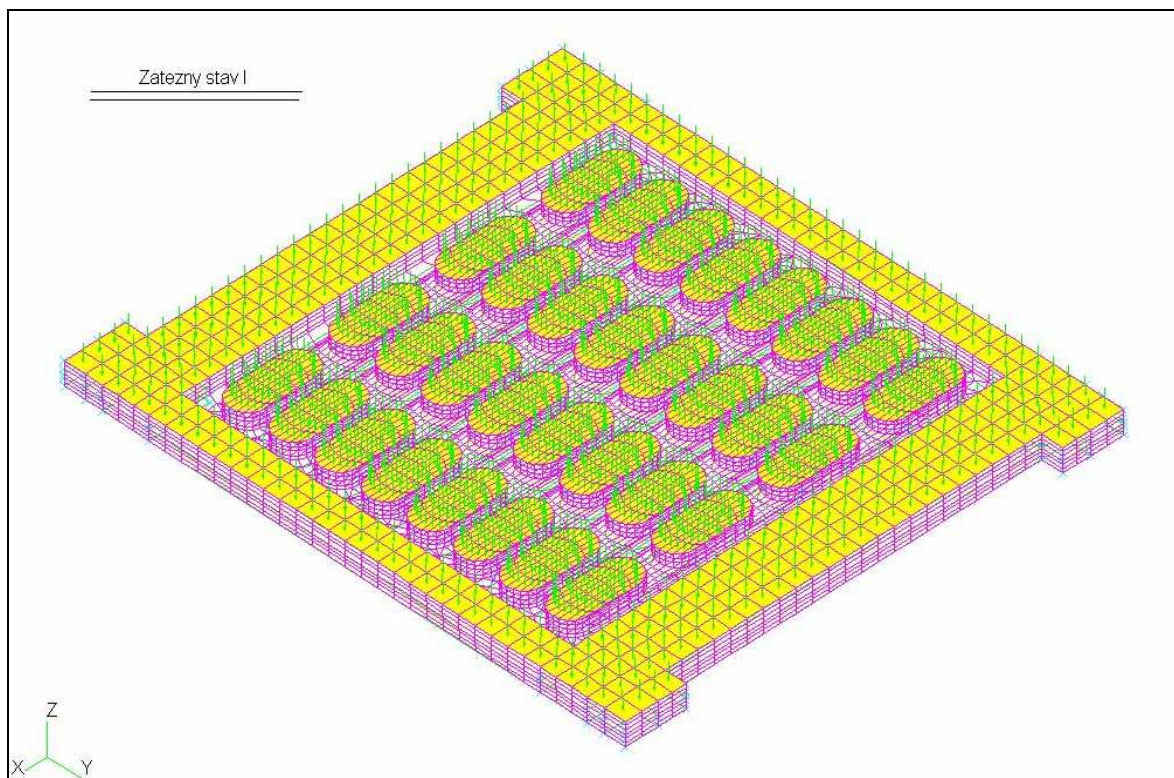
Obr. 41 .Zátěžný stav pro podložku č. 1



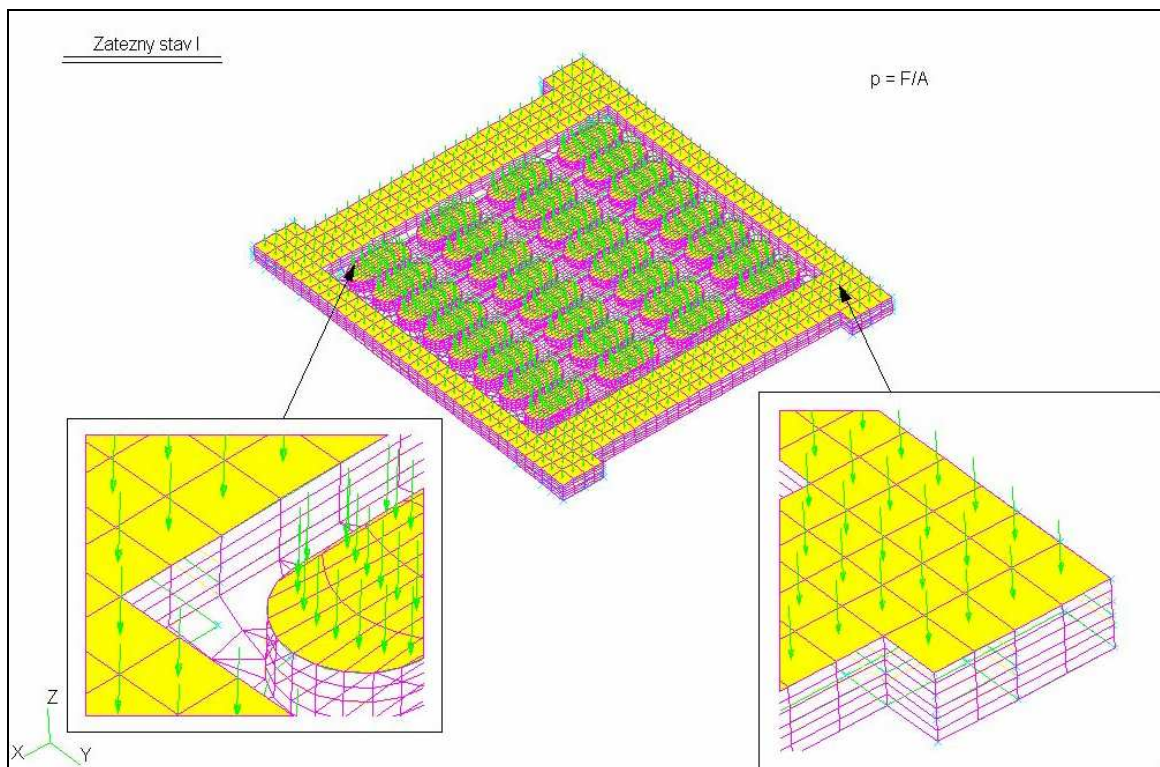
Obr. 42. Zátěžný stav pro podložku č. 1 - detailnější pohled.



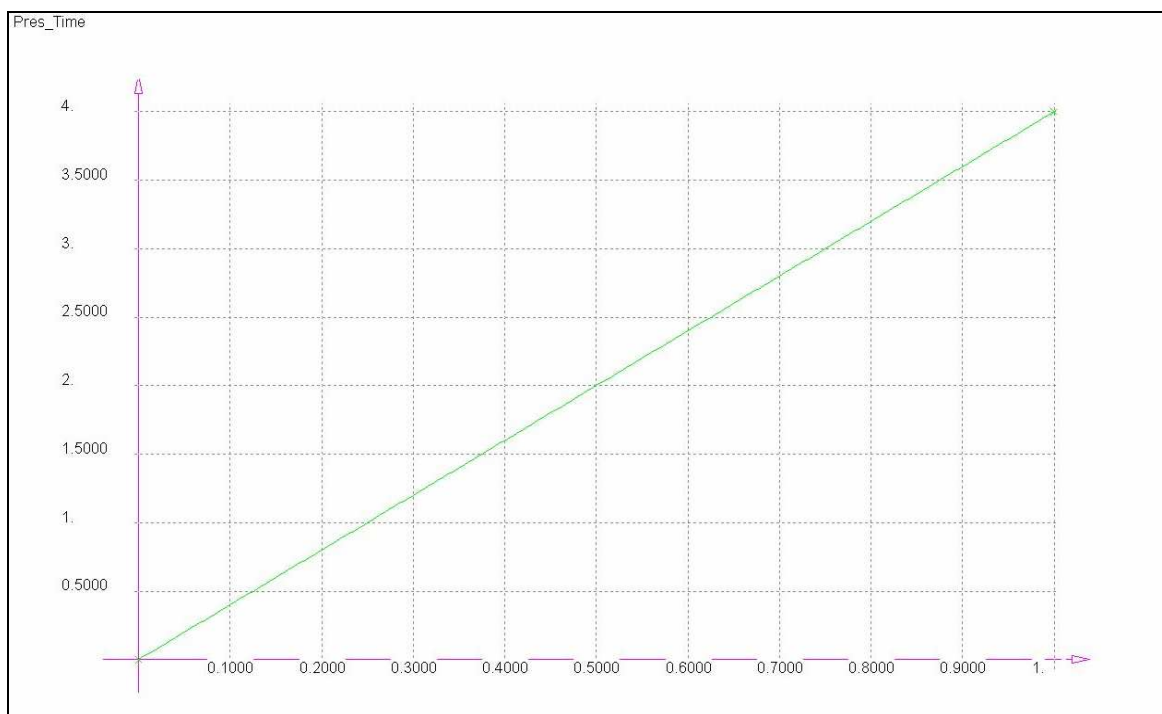
Obr. 43. Časová funkce zátěže pro podložku č. 1.



Obr. 44. Zátěžný stav pro podložku č. 2.



Obr. 45. Zátěžný stav pro podložku č. 2 - detailnější pohled.

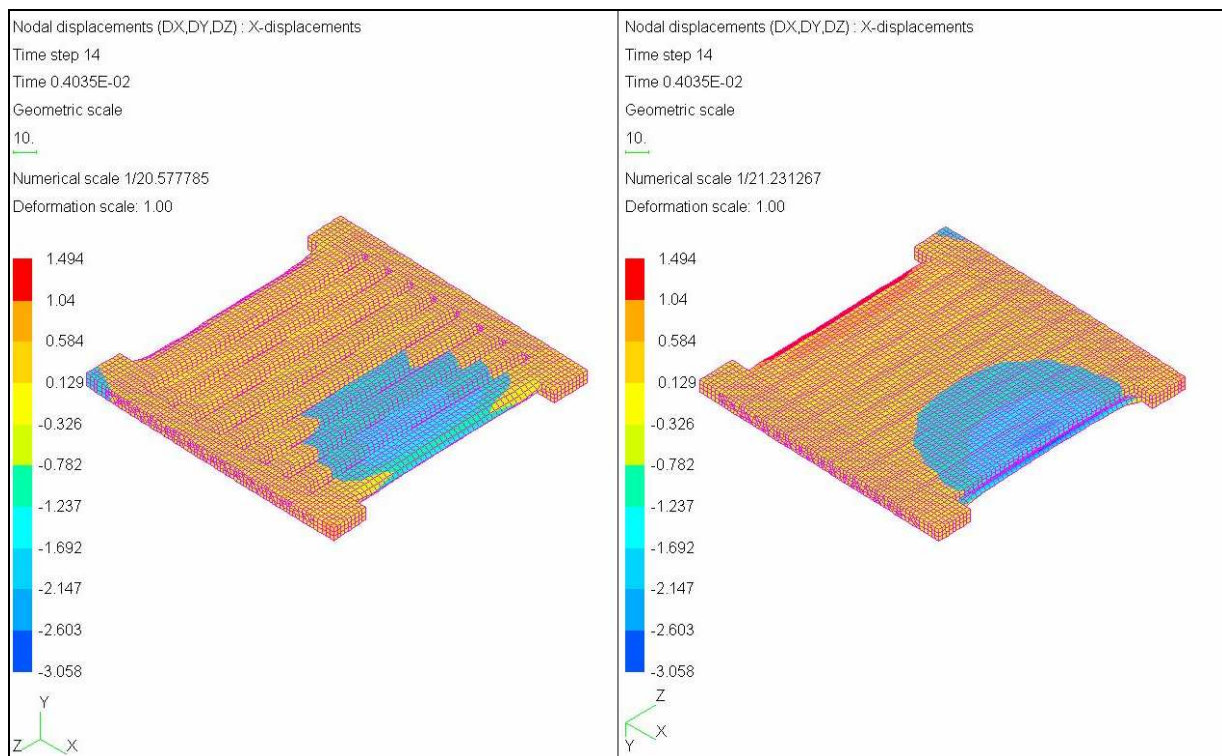


Obr. 46. Časová funkce zátěže pro podložku č. 2.

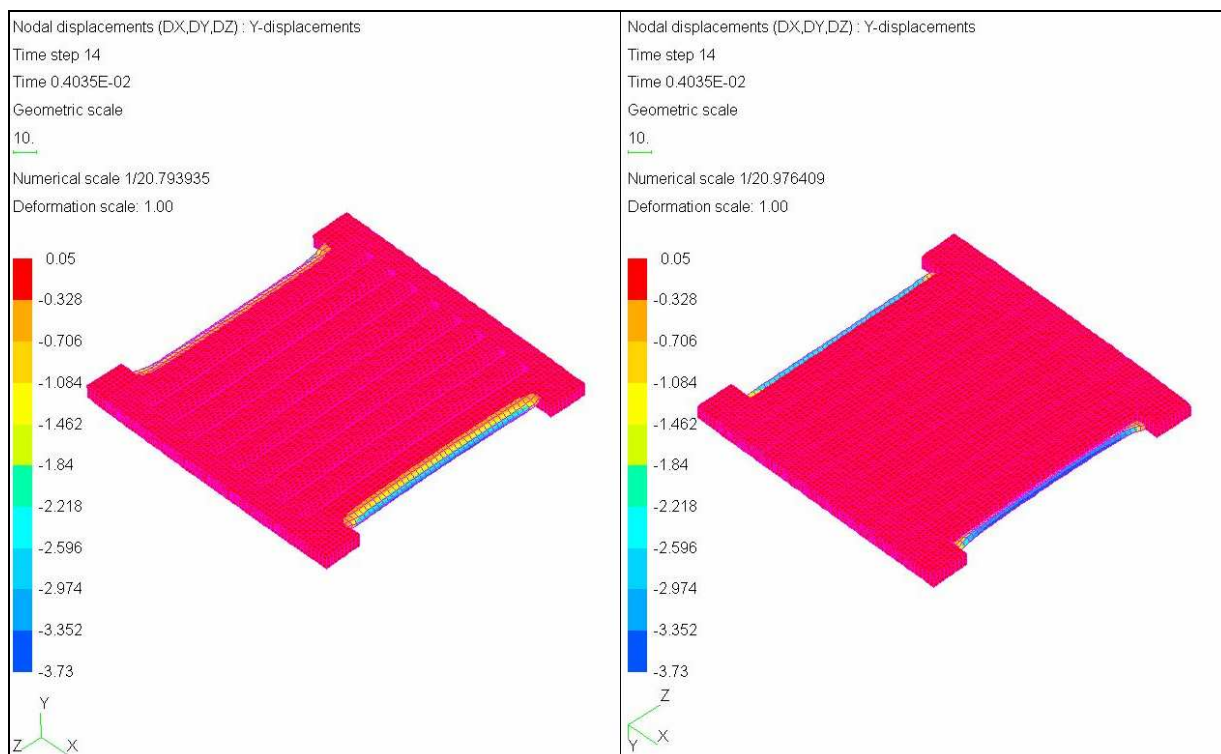
Na výpočet se aplikovala časová funkce, podle které výpočet konverguje k hodnotám předepsaného zatížení.

Po nastavení vhodných okrajových podmínek a zátěžných stavů byl provedený nelineární výpočet, protože se jednalo o nelineární úlohu. Časy výpočtů byly v řádu desítek hodin, model byl z poměrně husté sítě konečných prvků. Po výpočtu a kontrole, zda úloha dokonvergovala, se v post-processingové části zobrazily veškeré vypočtené výsledky. Hlavní pozornost se zaměřila na výsledky deformačního chování a výsledných napětí. Na následujících obrázcích je znázorněno deformační chování a průběhy napětí pro obě podložky. Popisy výsledků jsou uvedeny v diskusi výsledku.

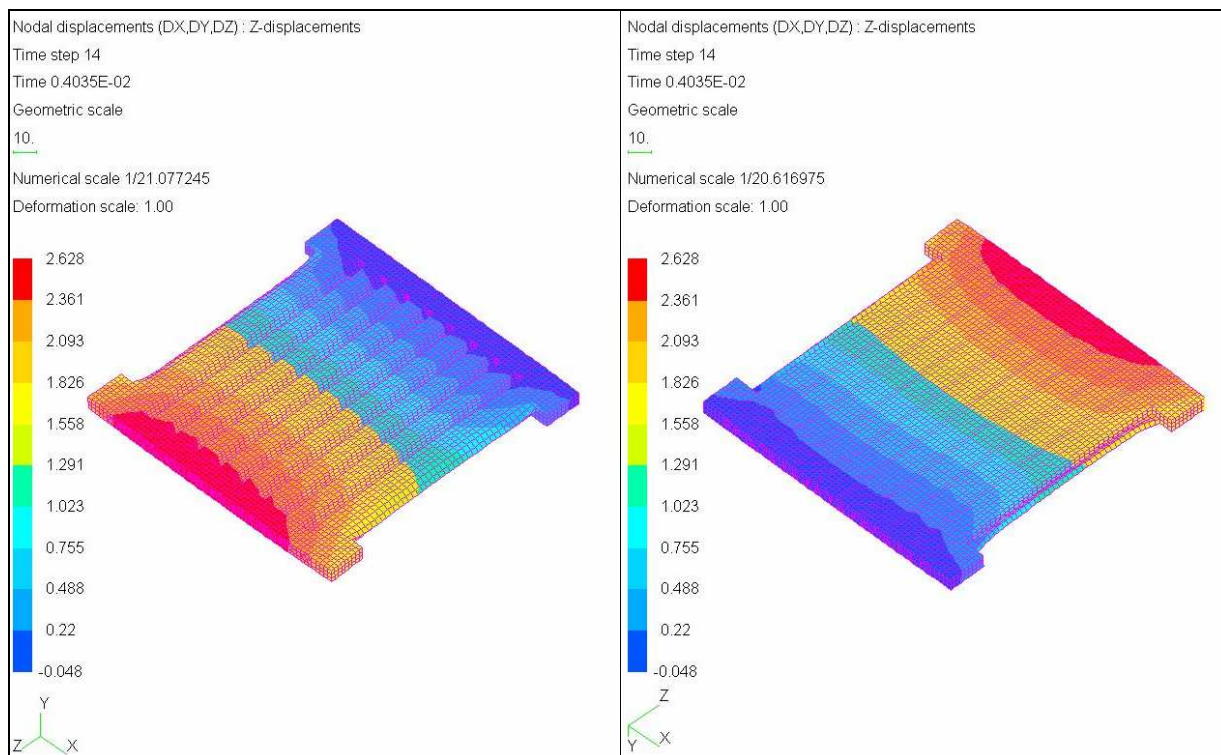
### ***Deformace a napětí pro podložku č. 1***



Obr. 47. Deformace podložky č. 1 v ose x.

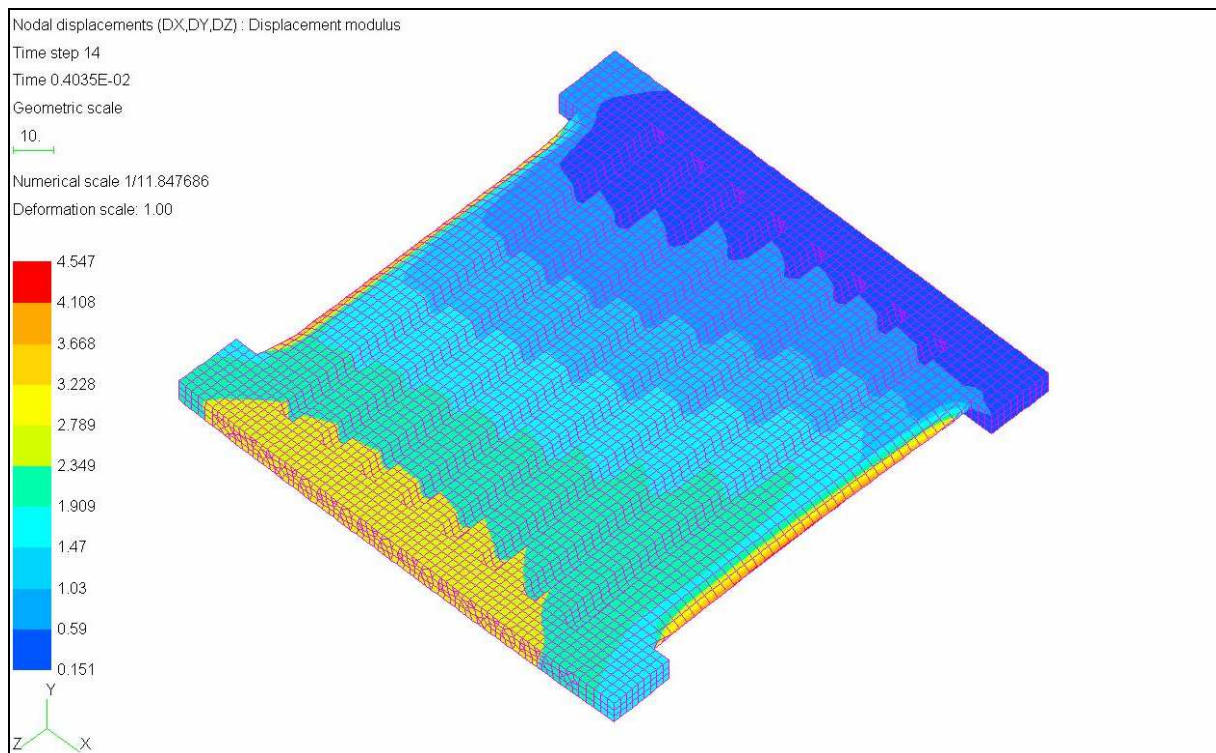


Obr. 48. Deformace podložky č. 1 v ose y.

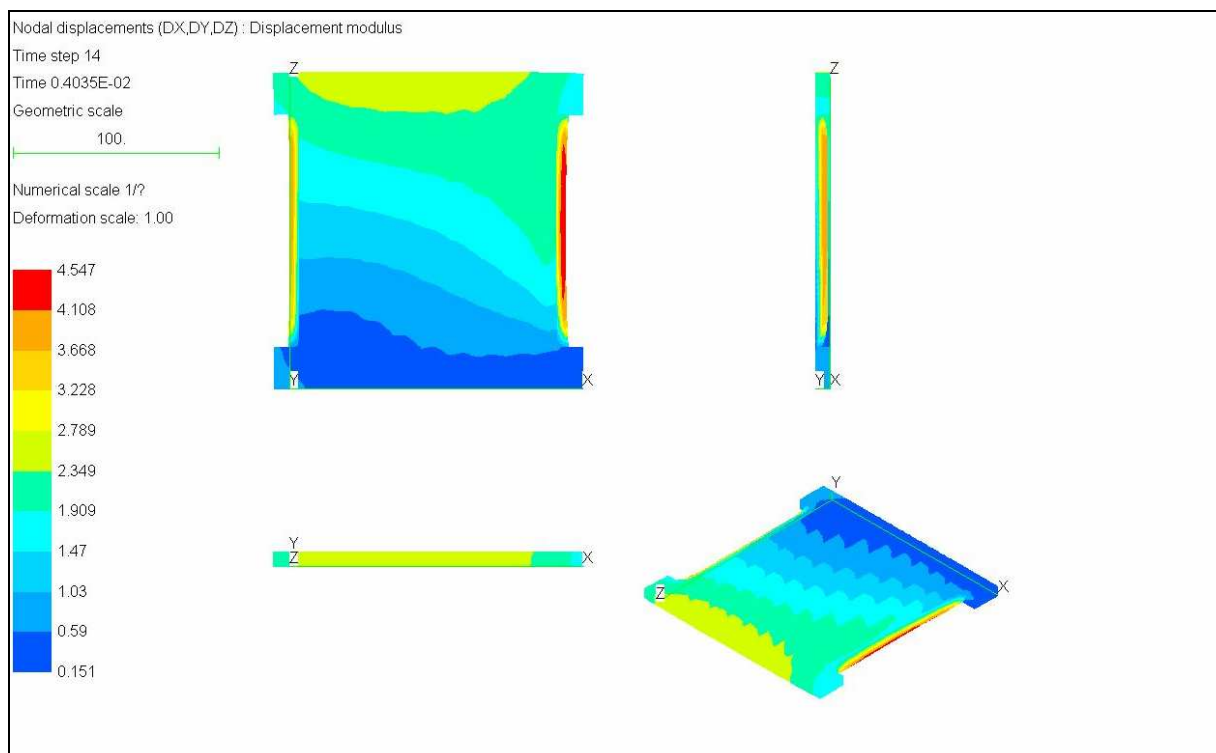


Obr. 49. Deformace podložky č. 1 v ose z.

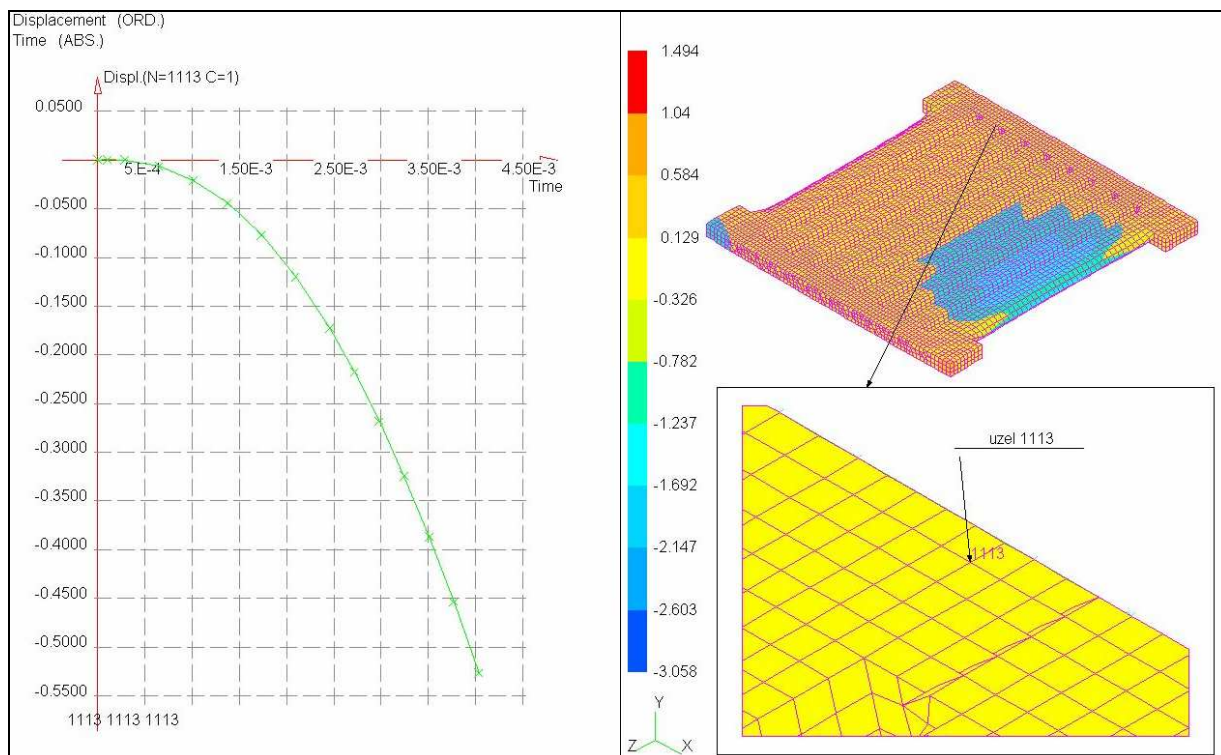




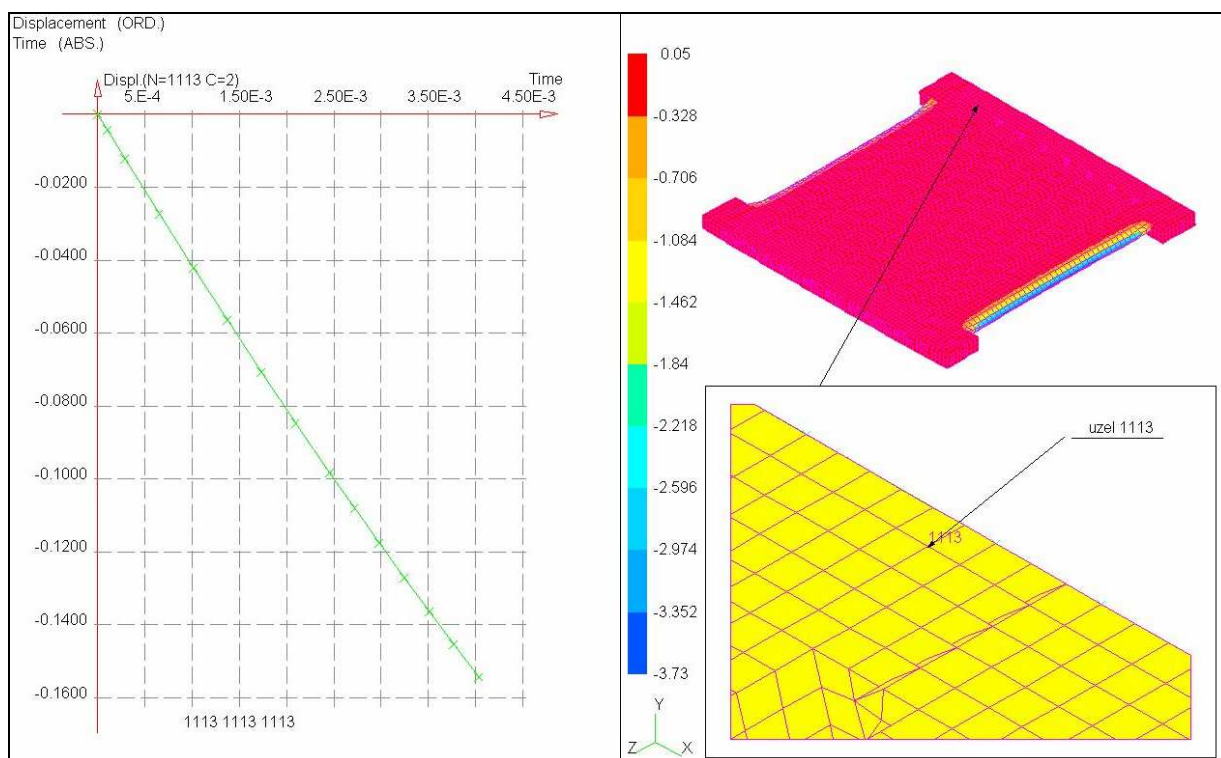
Obr. 50. Modul posunutí (deformace) podložky č. 1



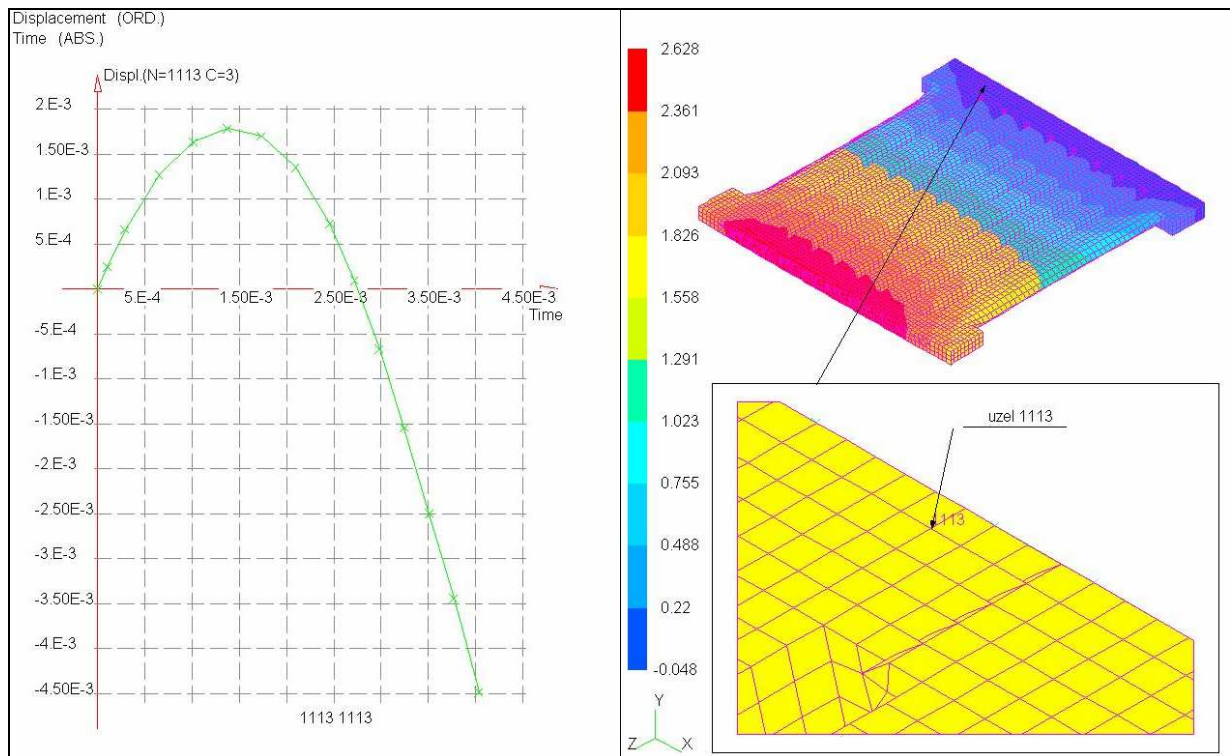
Obr. 51. Modul posunutí podložky č. 1 – pohled ve třech různých rovinách.



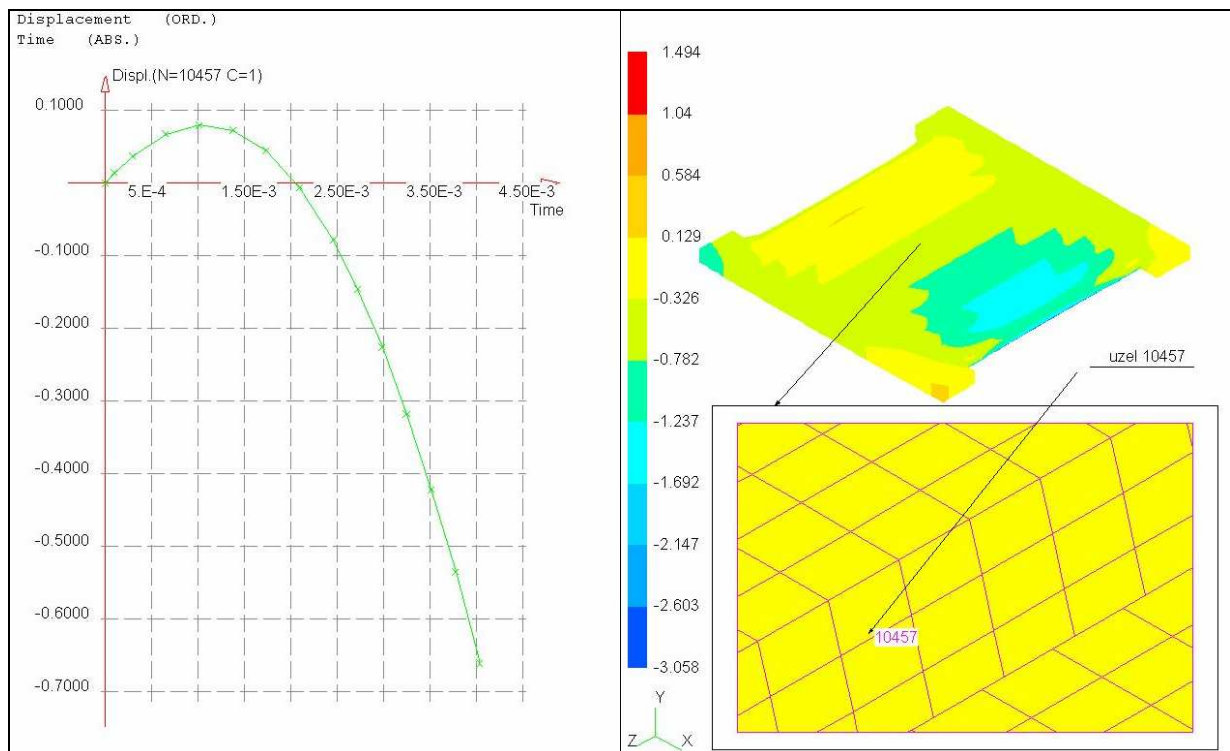
Obr. 52. Časový průběh deformace uzlu č. 1113 v ose  $x$  pro podložku č.1.



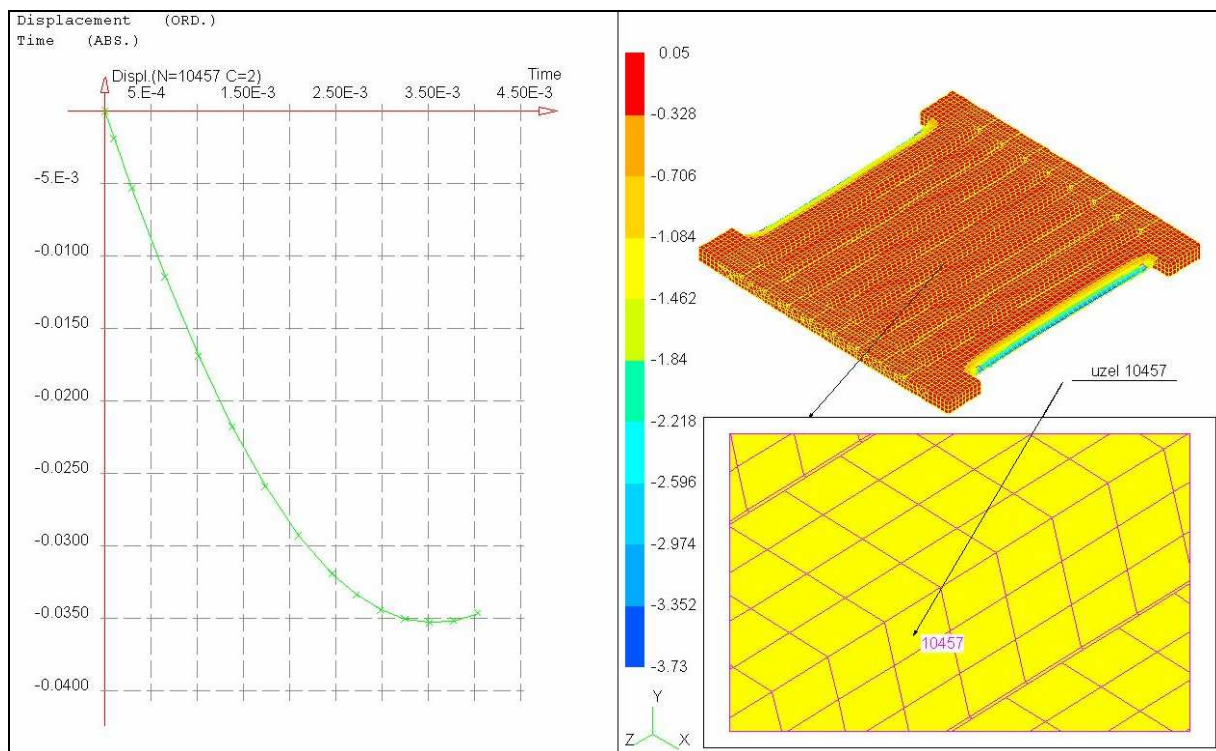
Obr. 53. Časový průběh deformace uzlu č. 1113 v ose  $y$  pro podložku č.1.



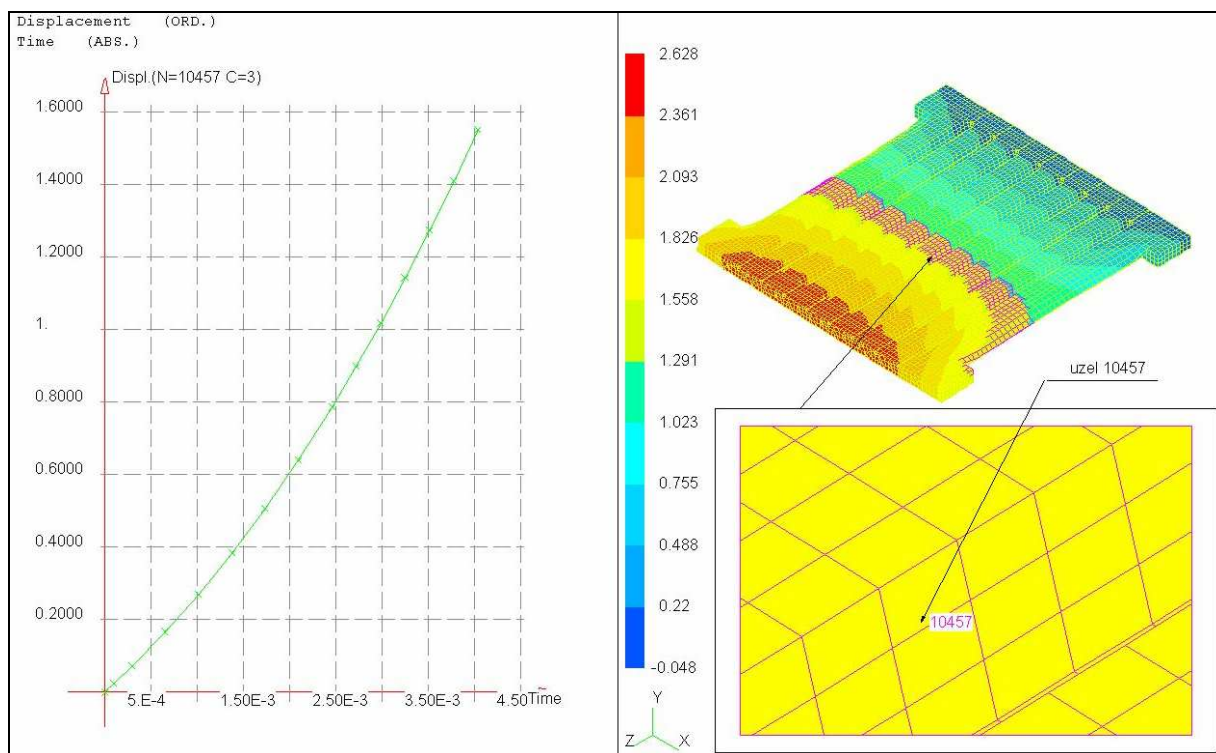
Obr. 54. Časový průběh deformace uzlu č. 1113 v ose z pro podložku č.1.



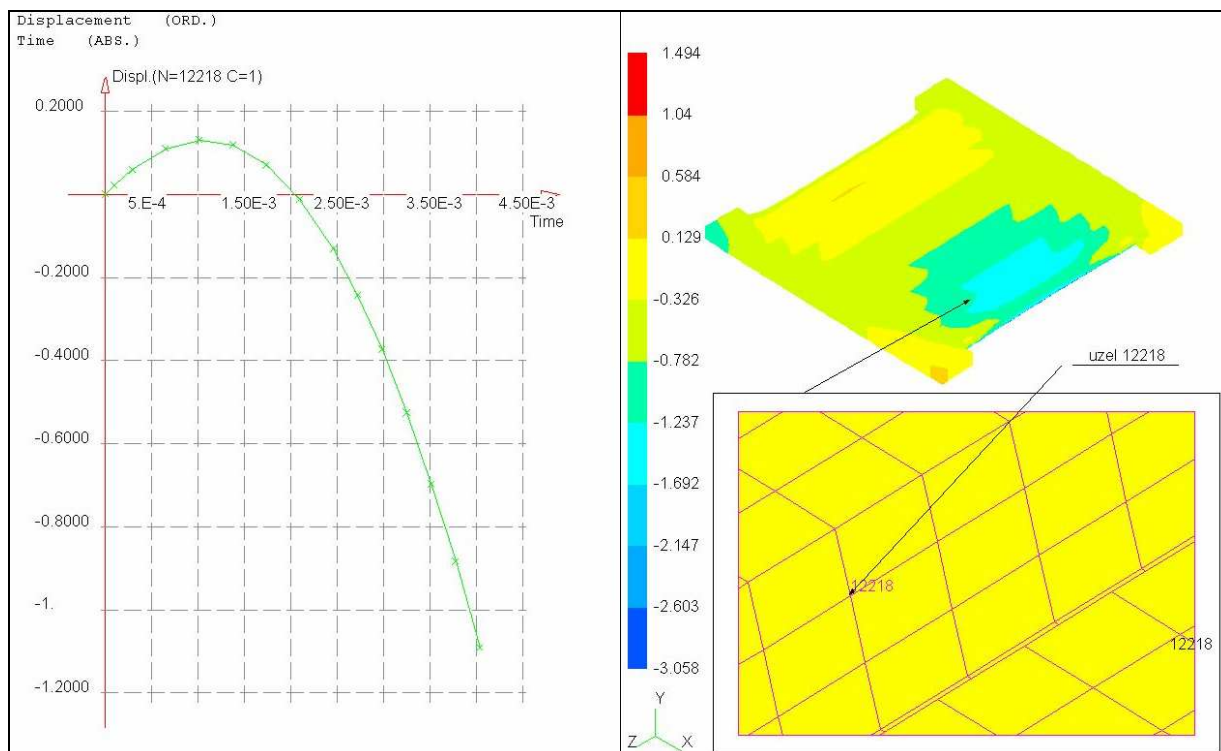
Obr. 55. Časový průběh deformace uzlu č. 10457 v ose x pro podložku č.1



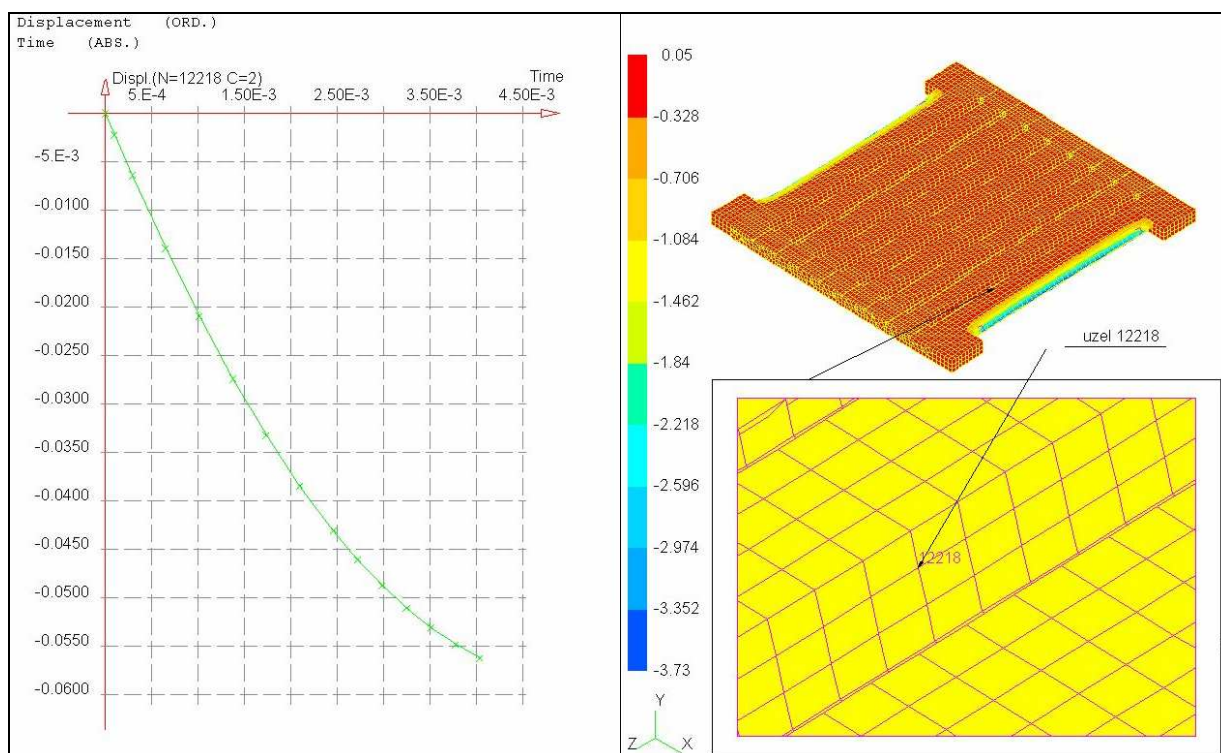
Obr. 56. Časový průběh deformace uzlu č. 10457 v ose y pro podložku č.1



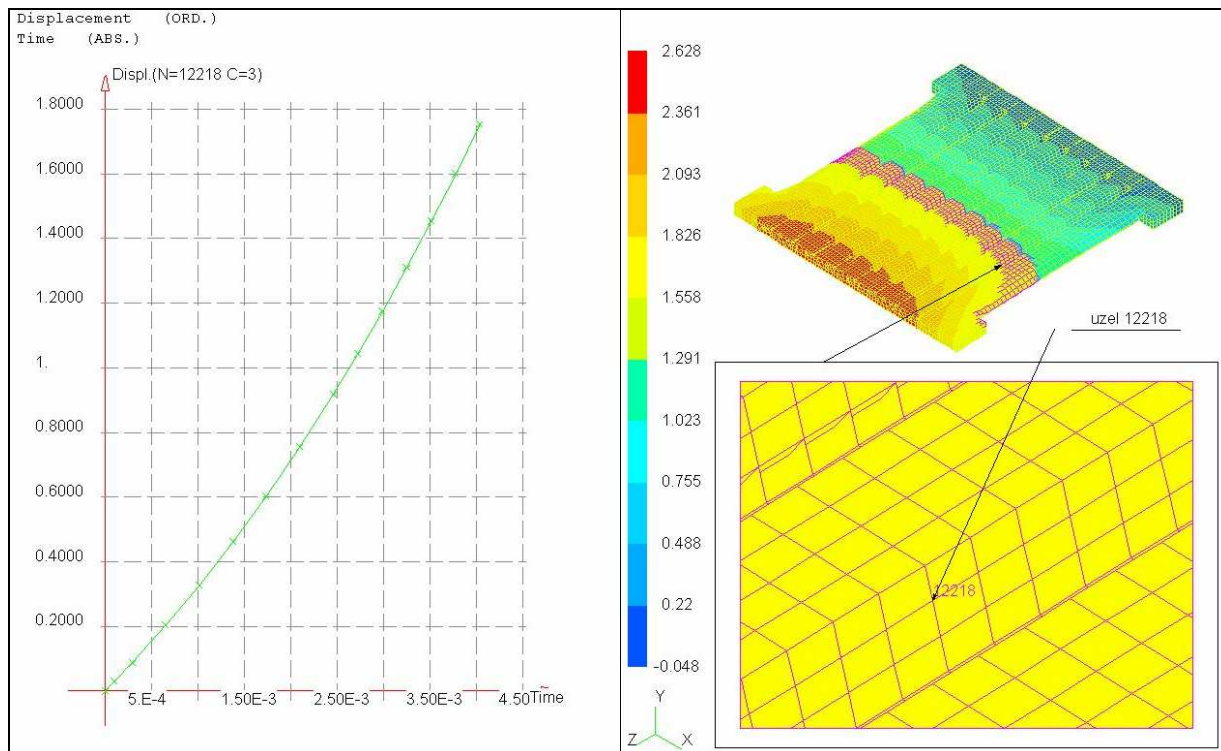
Obr. 57. Časový průběh deformace uzlu č. 10457 v ose z pro podložku č.1.



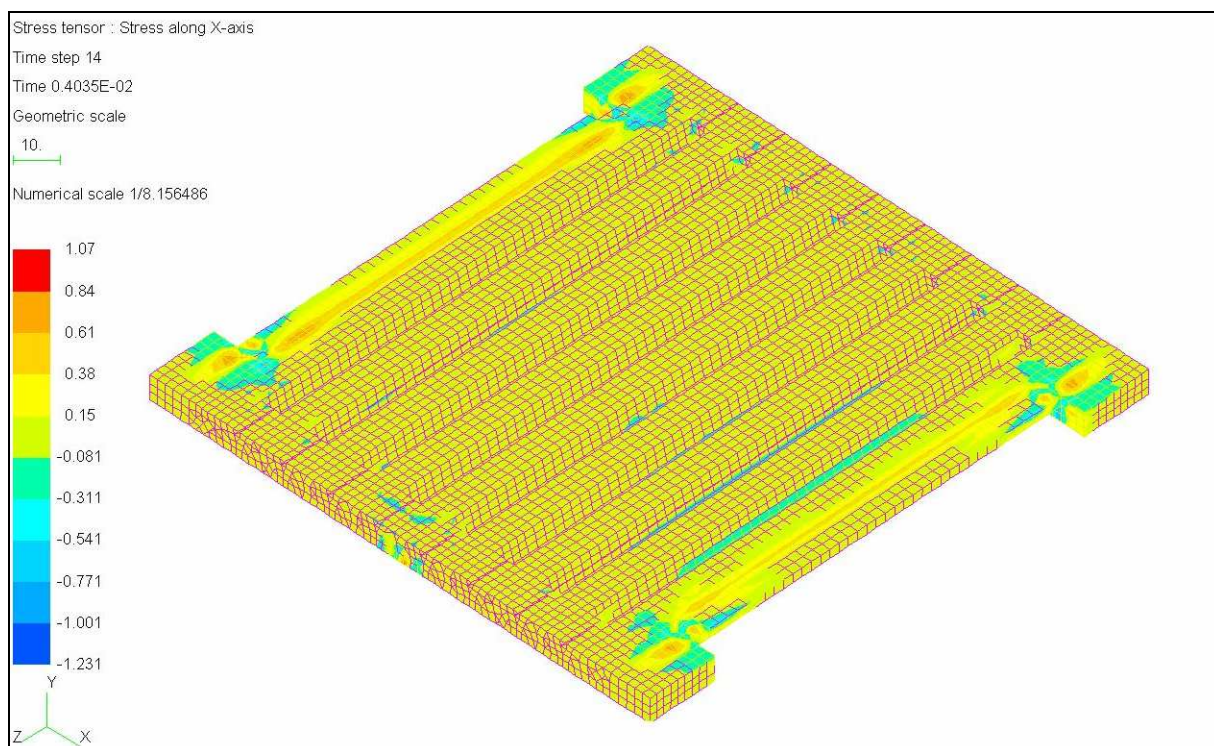
Obr. 58. Časový průběh deformace uzlu č. 12218 v ose  $x$  pro podložku č.1.



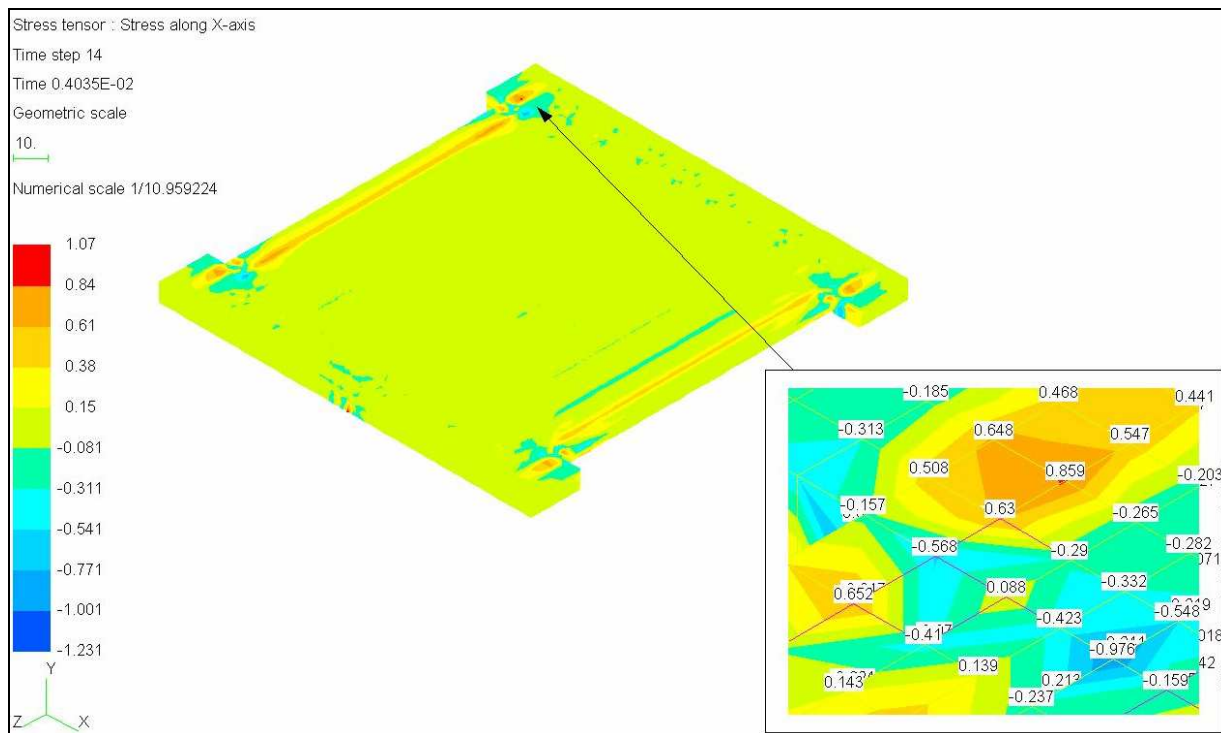
Obr. 59. Časový průběh deformace uzlu č. 12218 v ose  $y$  pro podložku č.1.



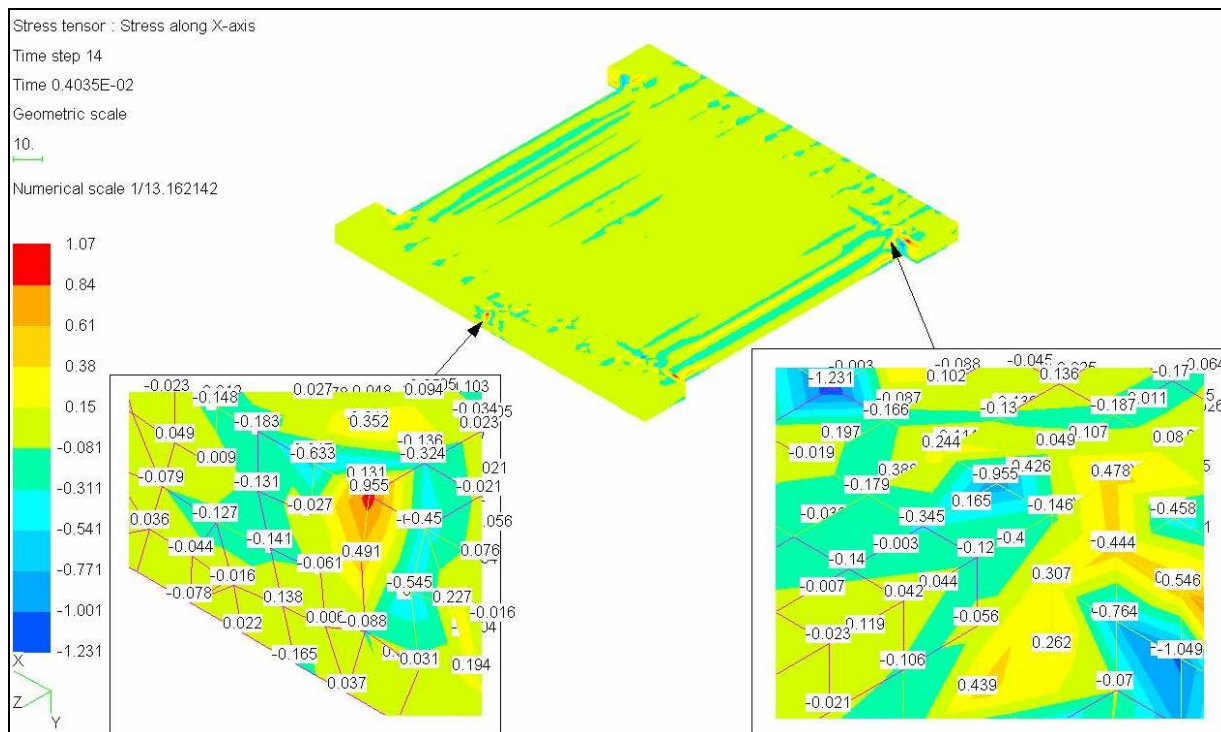
Obr. 60. Časový průběh deformace uzlu č. 12218 v ose z pro podložku č.1.



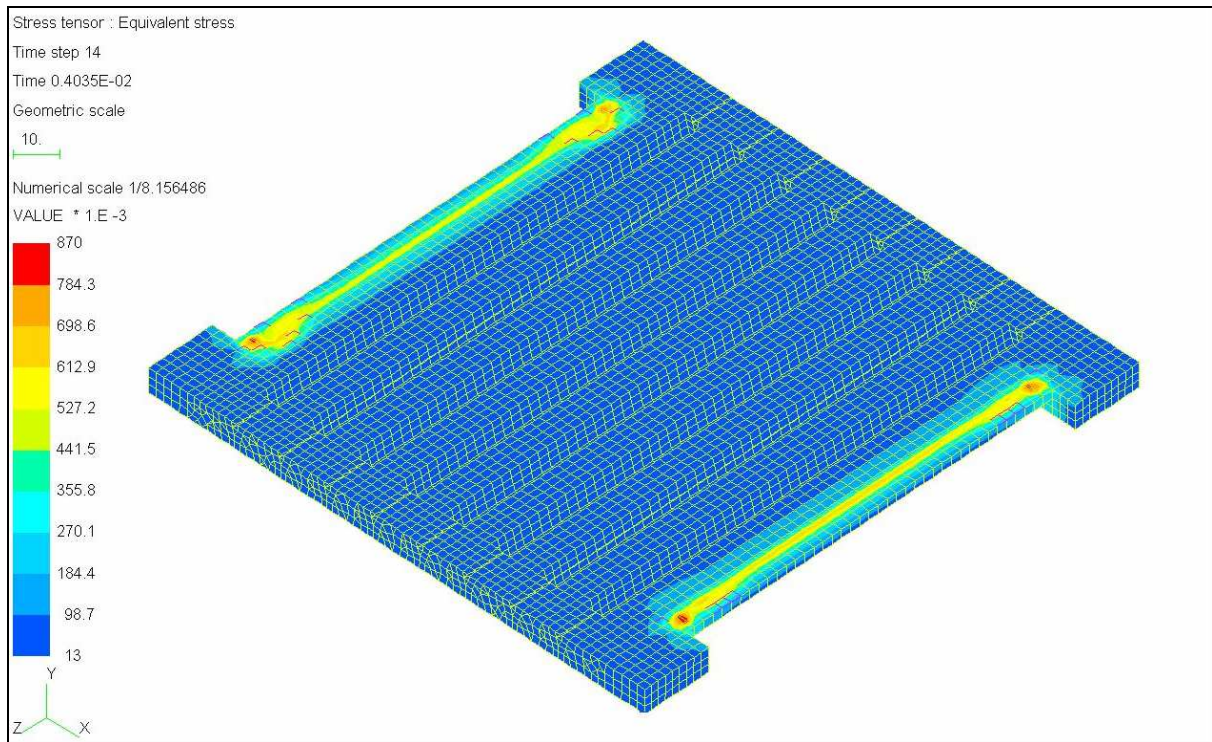
Obr. 61. Napětí podél osy x pro podložku č. 1.



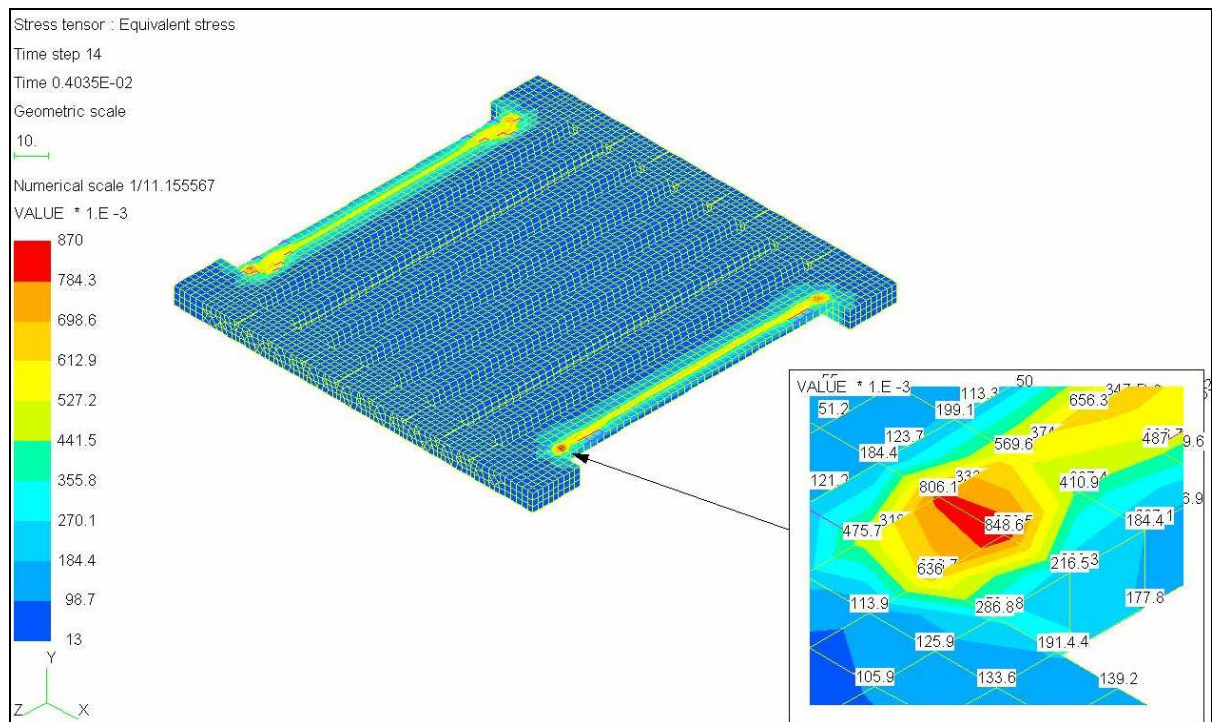
Obr. 62. Detail špičky napětí podél osy  $x$  pro podložku č. 1 (s popisky velikosti napětí)



Obr. 63. Detail špičky napětí podél osy  $x$  pro podložku č. 1 – rotace o  $180^\circ$  kolem osy  $z$



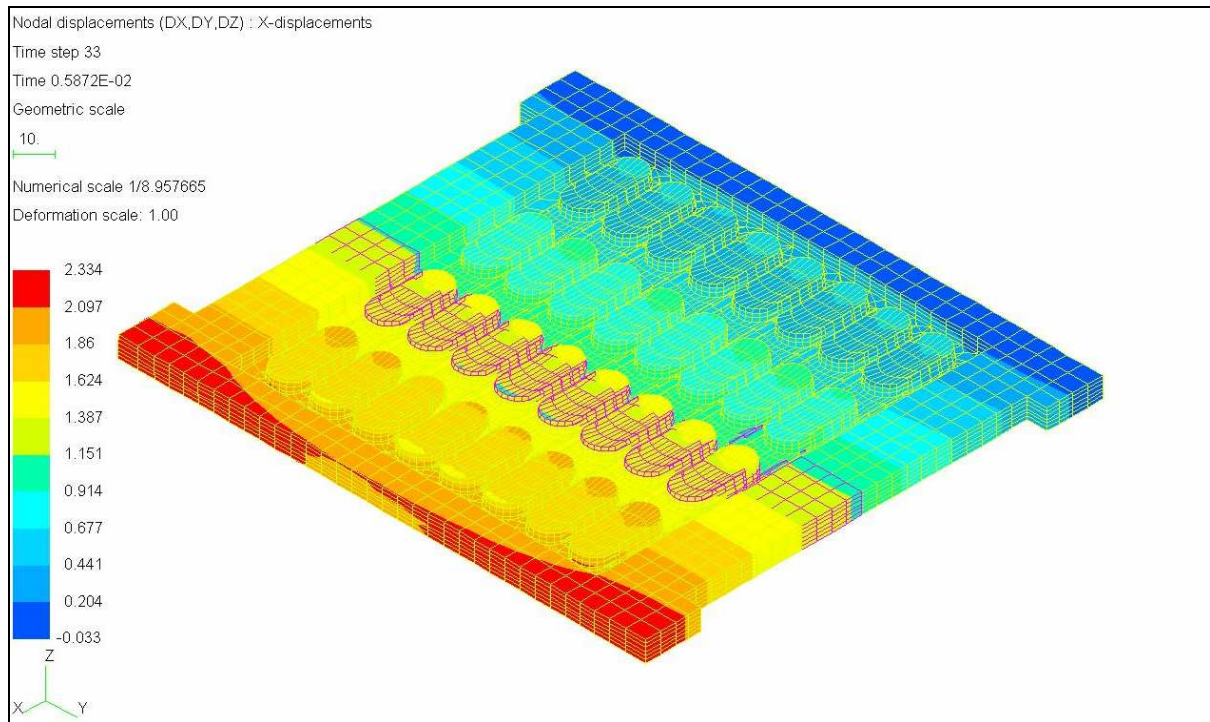
Obr. 64. Von Misesovo napětí pro podložku č. 1.



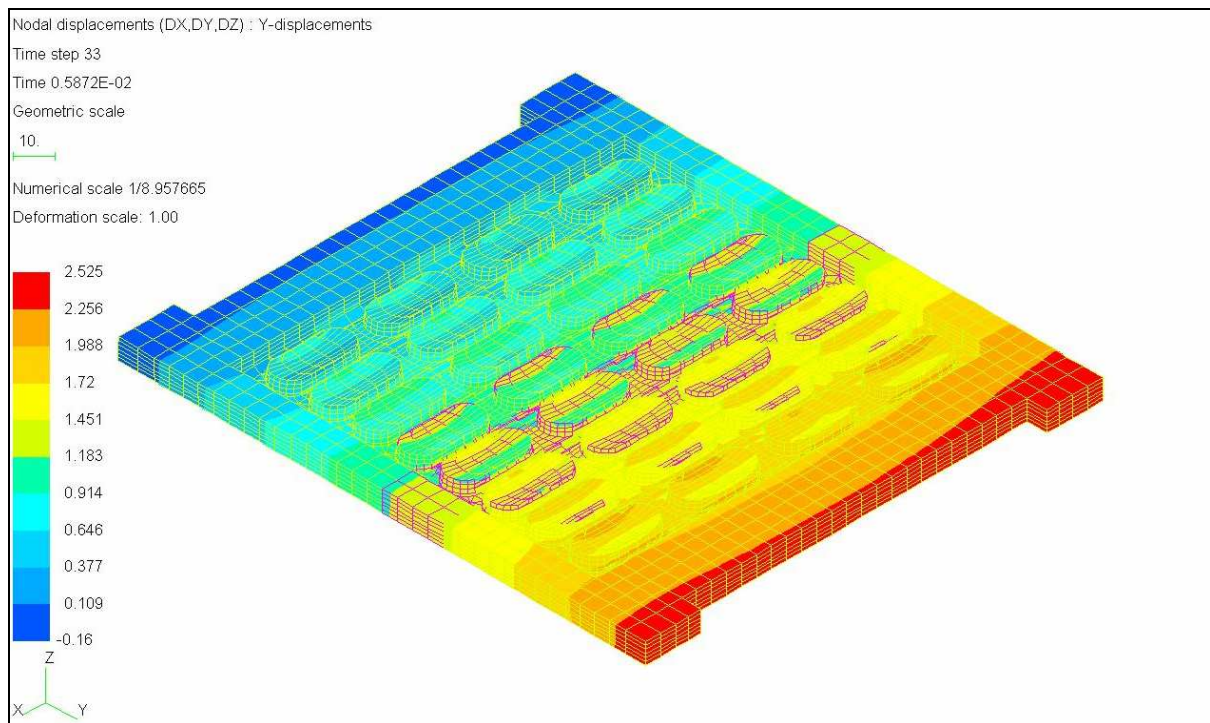
Obr. 65. Von Misesovo napětí pro podložku č. 1 (detail na špičky napětí).



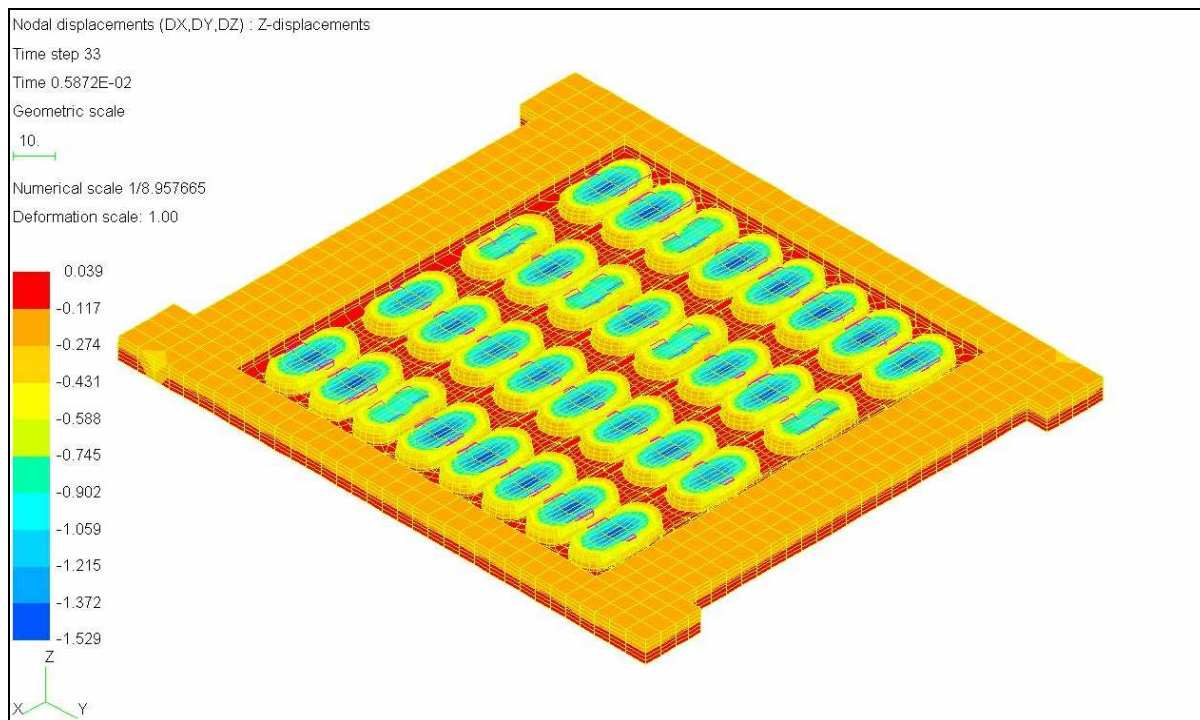
## Deformace a napětí pro podložku č. 2



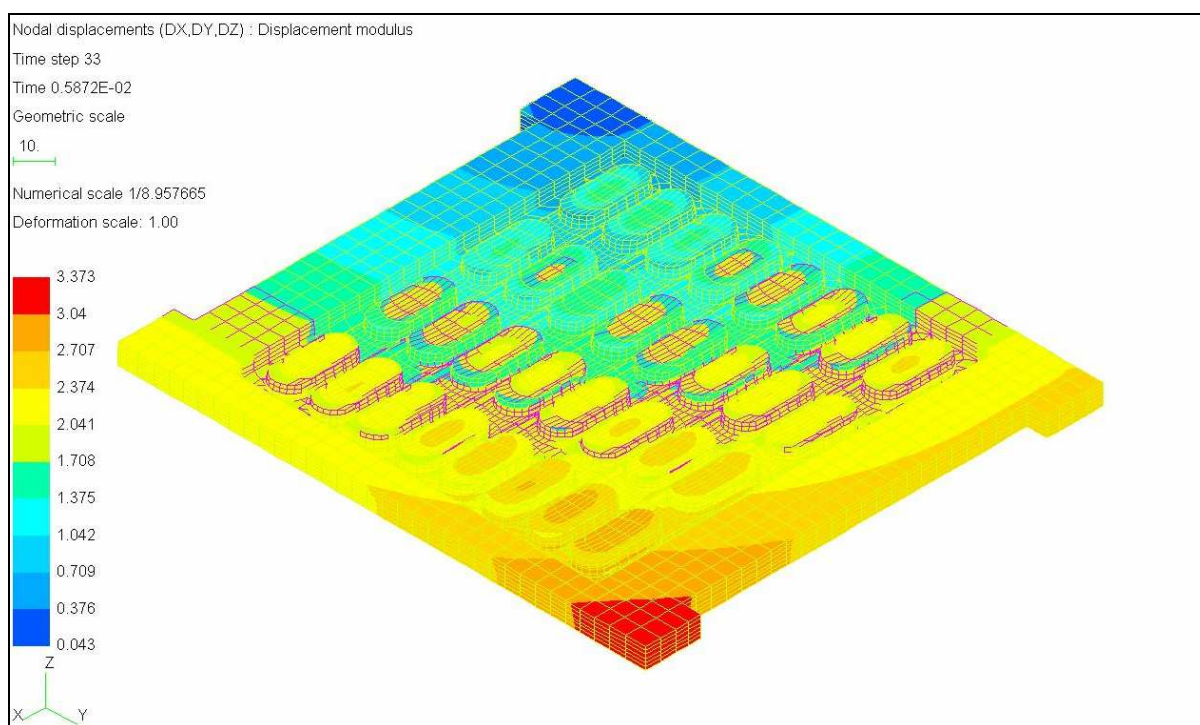
Obr. 66. Deformace podložky č. 2 v ose x.



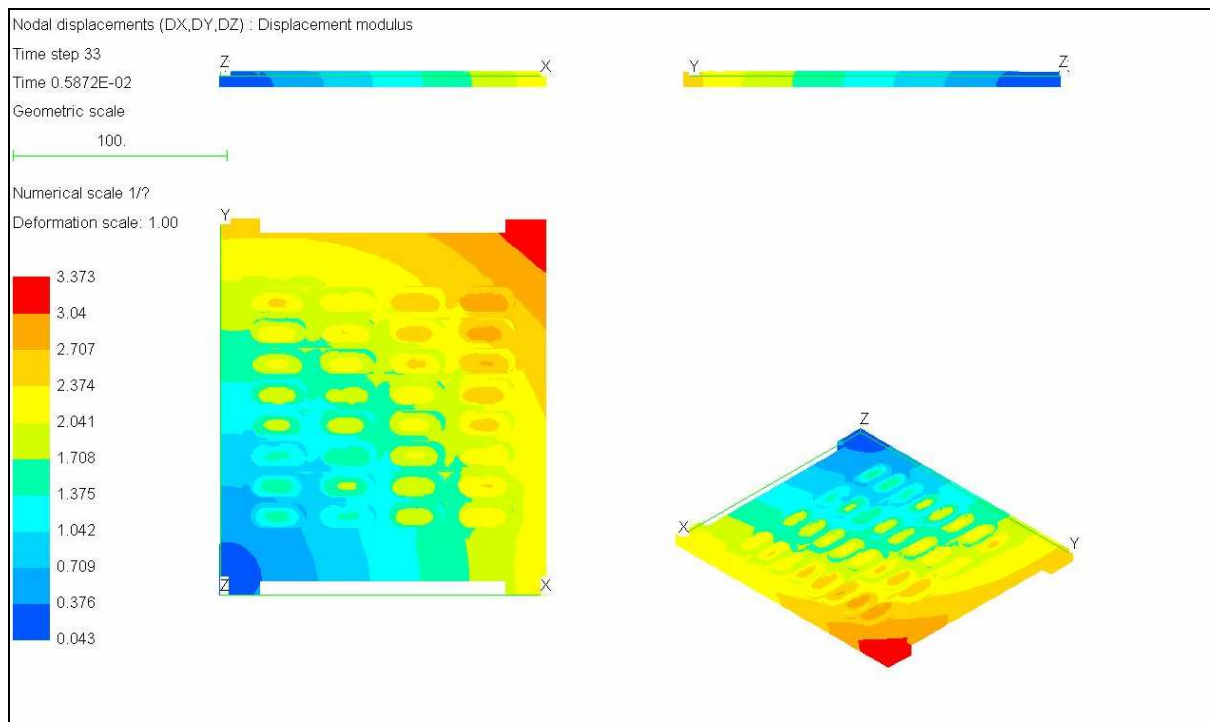
Obr. 67. Deformace podložky č. 2 v ose y.



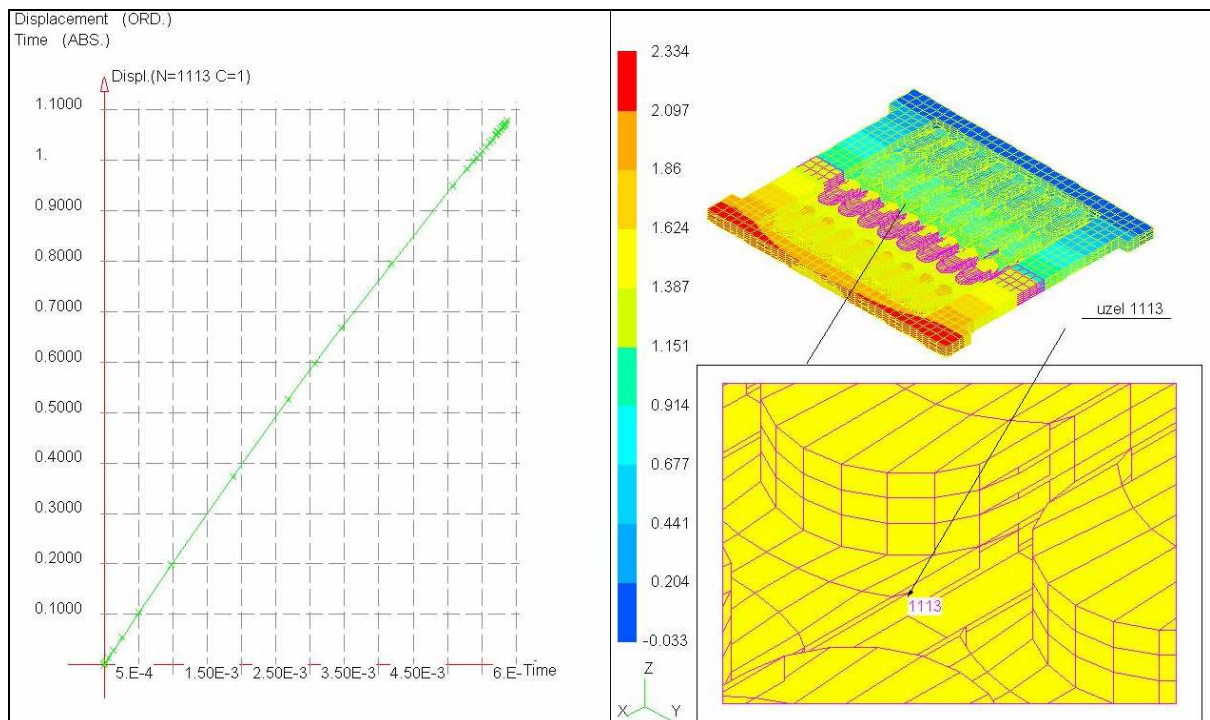
Obr. 68. Deformace podložky č. 2 v ose z.



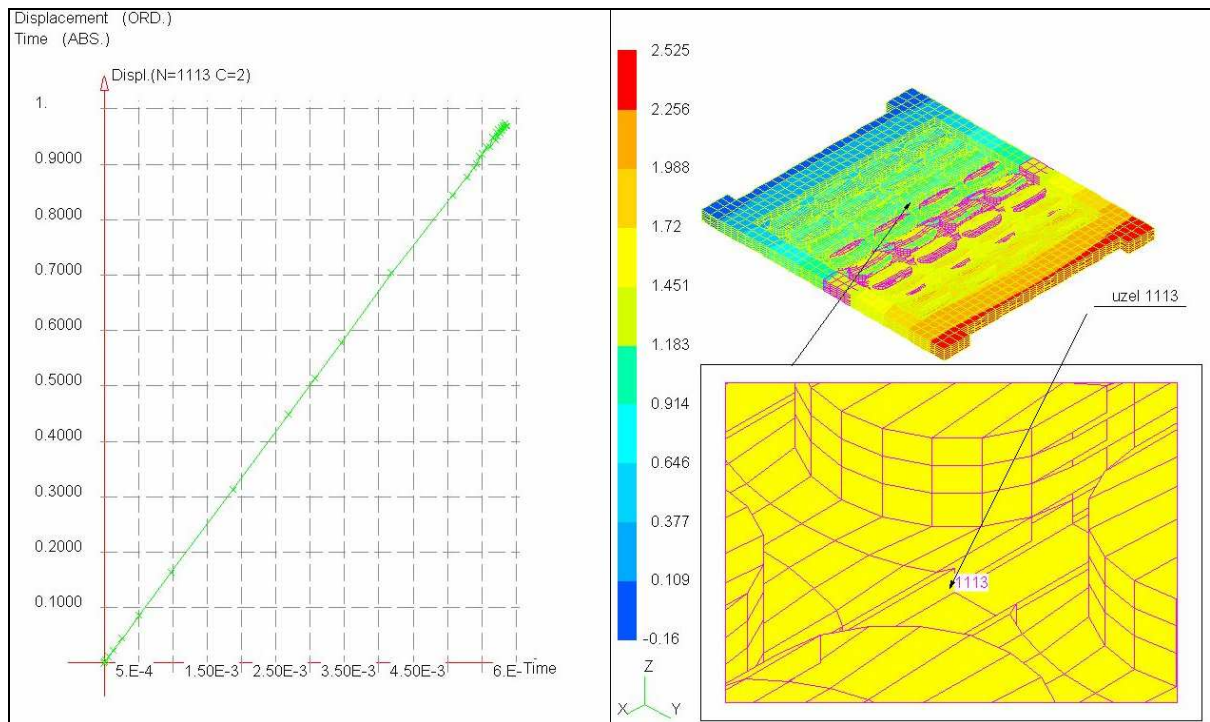
Obr. 69. Modul posunutí (deformace) podložky č. 2.



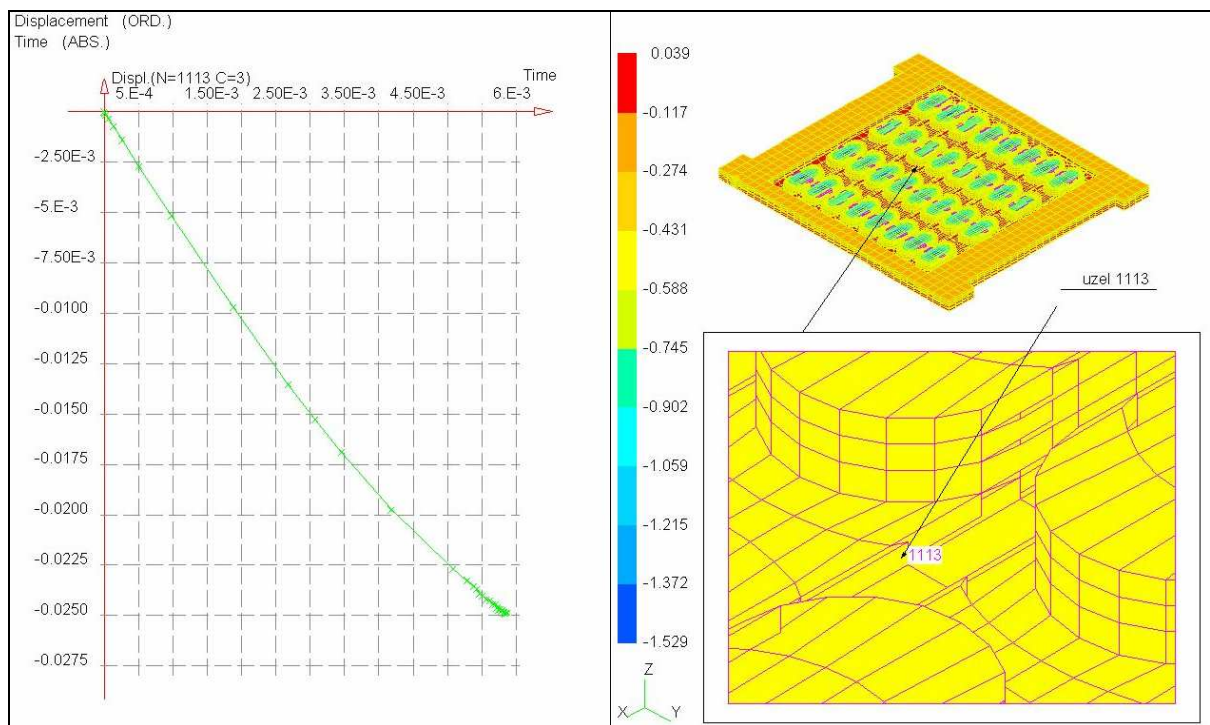
Obr. 70. Modul posunutí podložky č. 2 – pohled ve třech různých rovinách.



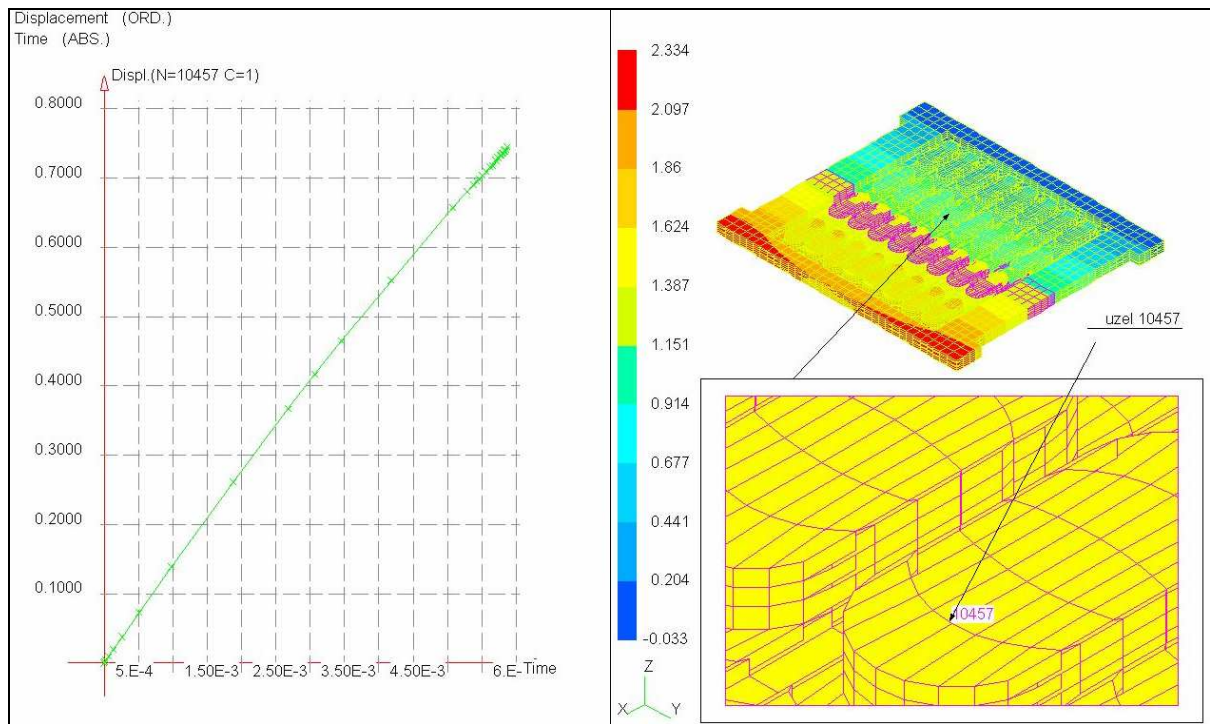
Obr. 71. Časový průběh deformace uzlu 1113 v ose  $x$  pro podložku č.2.



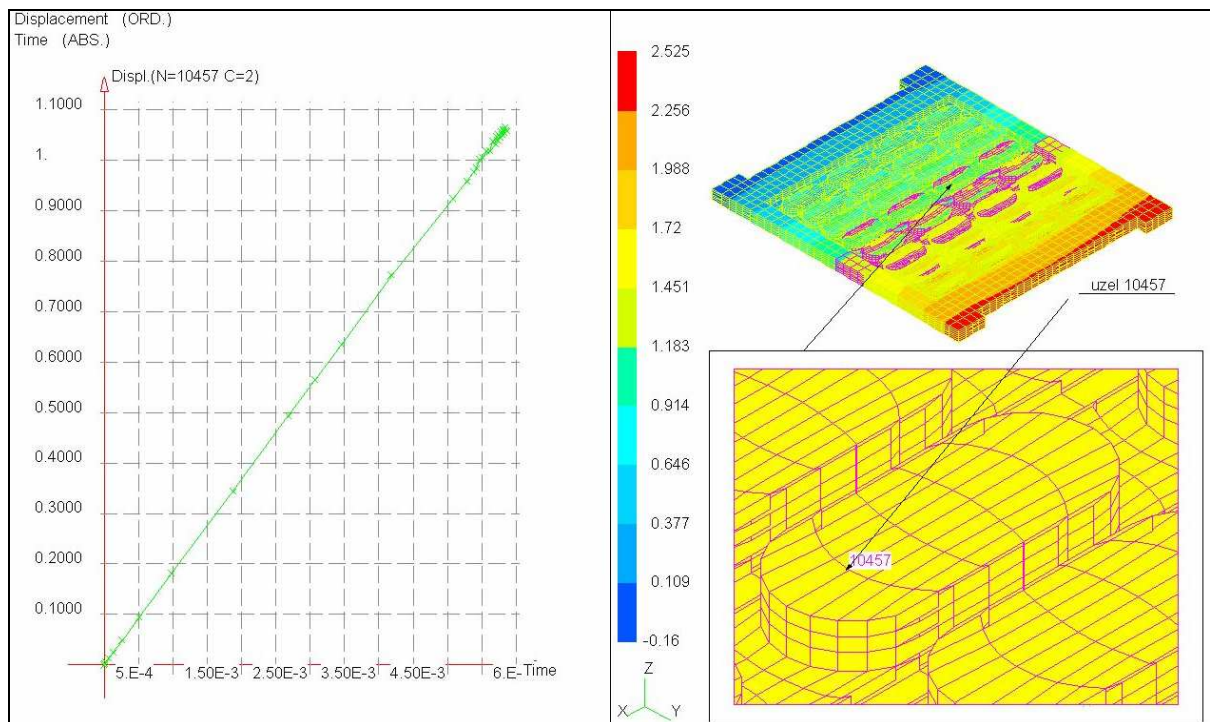
Obr. 72. Časový průběh deformace uzlu 1113 v ose y pro podložku č.2.



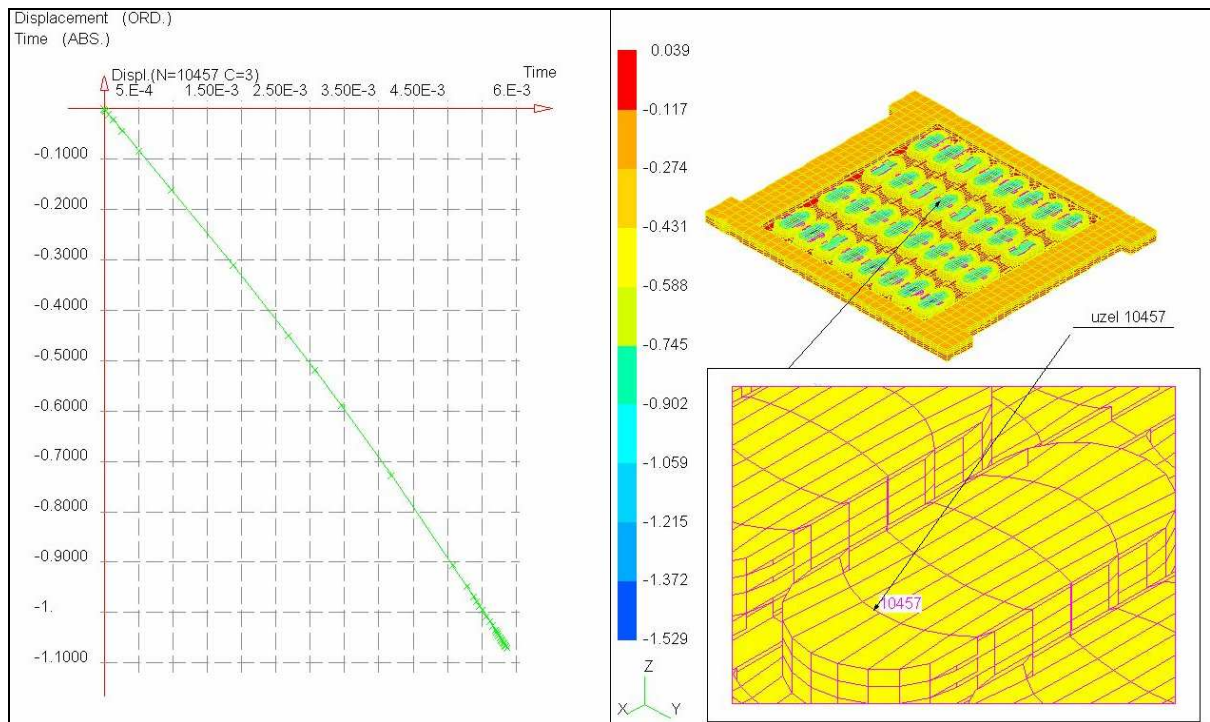
Obr. 73. Časový průběh deformace uzlu 1113 v ose z pro podložku č.2.



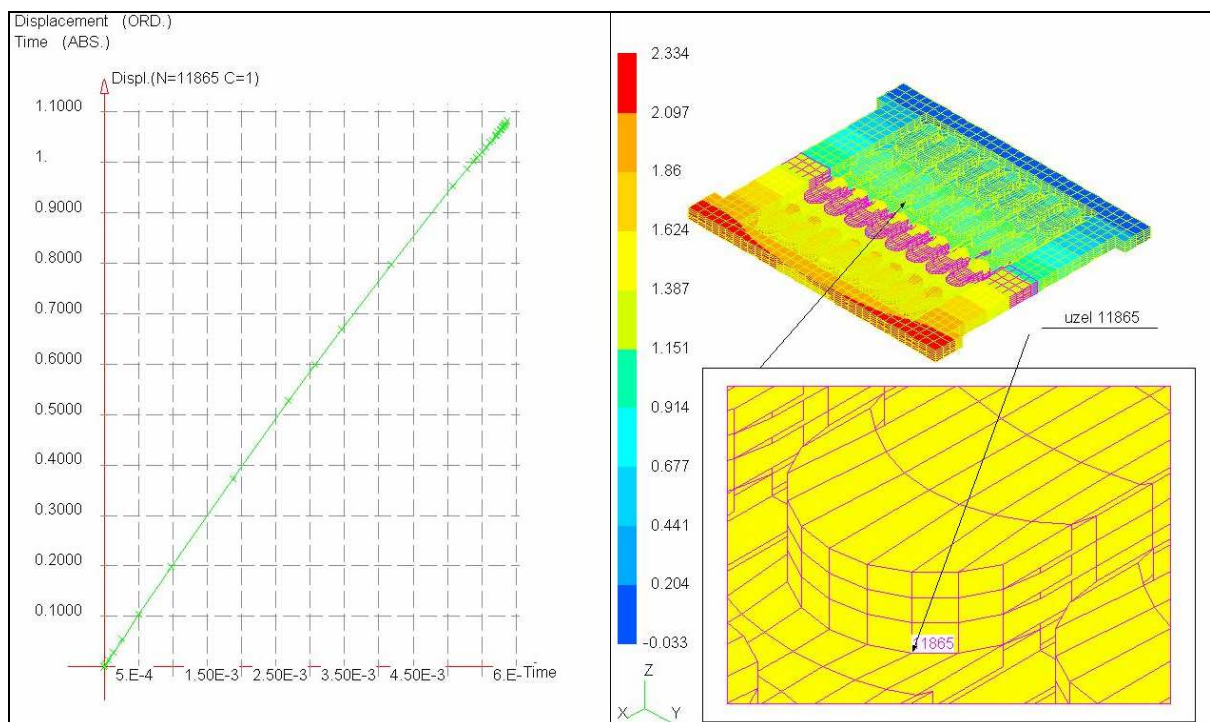
Obr. 74. Časový průběh deformace uzlu 10457 v ose x pro podložku č.2.



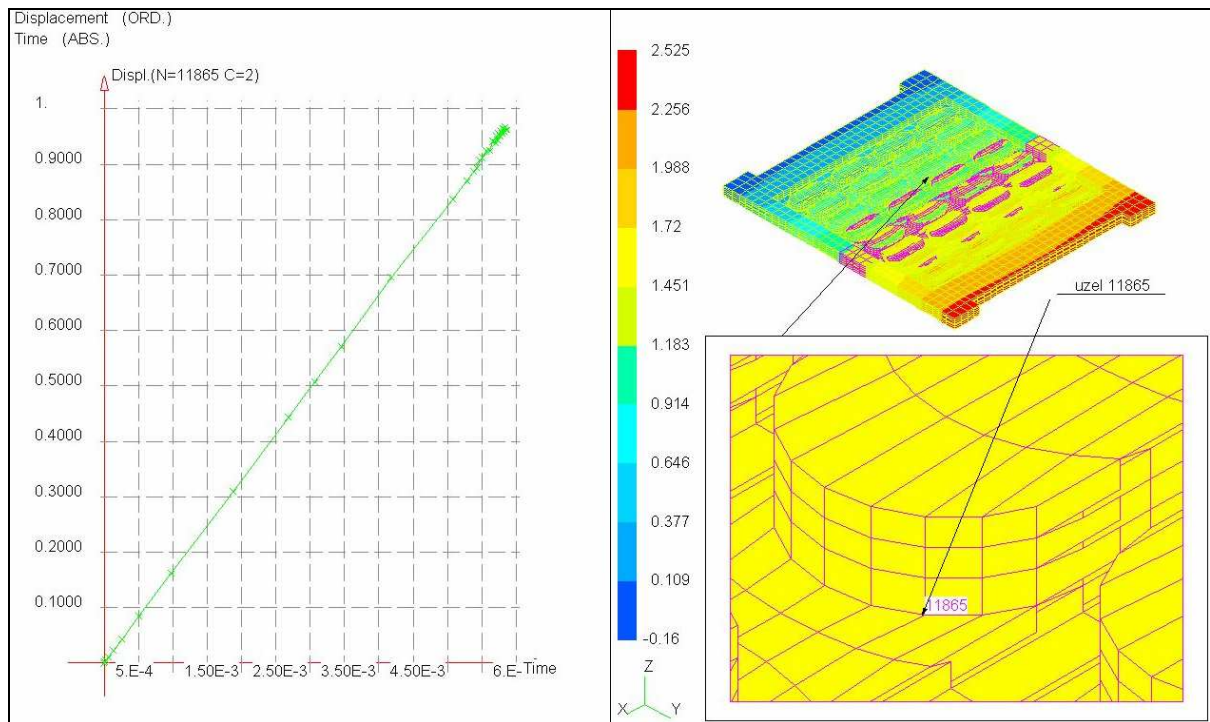
Obr. 75. Časový průběh deformace uzlu 10457 v ose y pro podložku č.2.



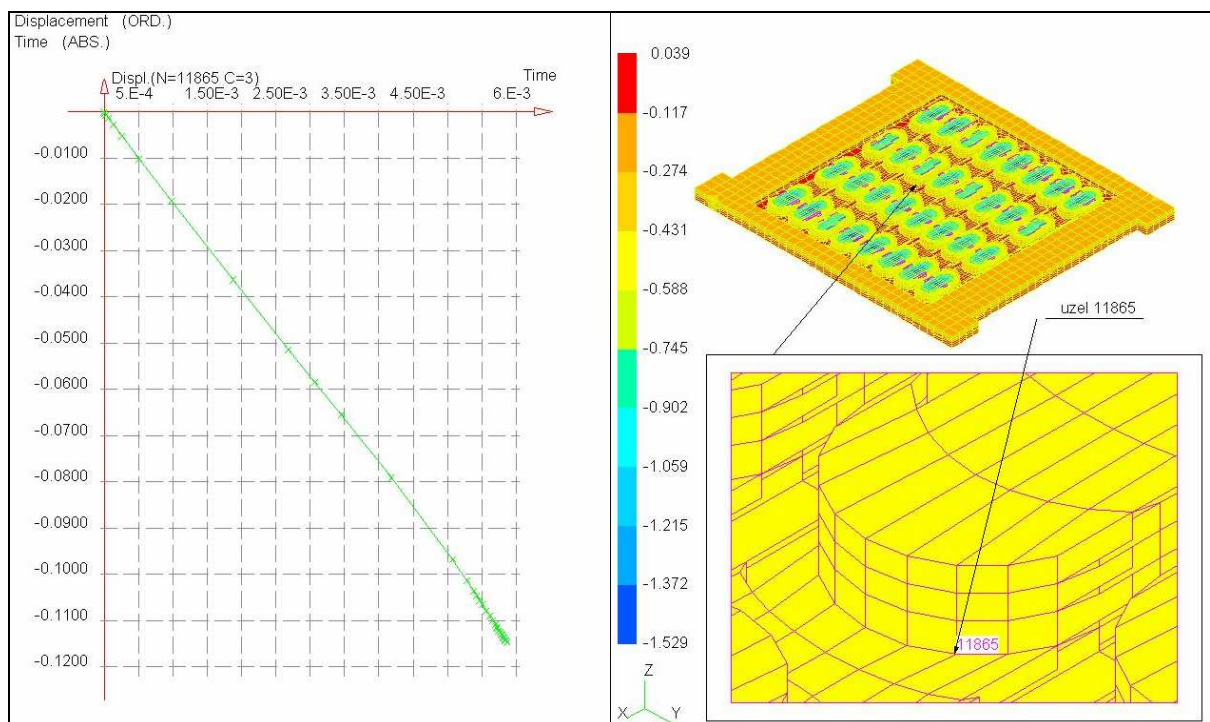
Obr. 76. Časový průběh deformace uzlu 10457 v ose  $z$  pro podložku č.2.



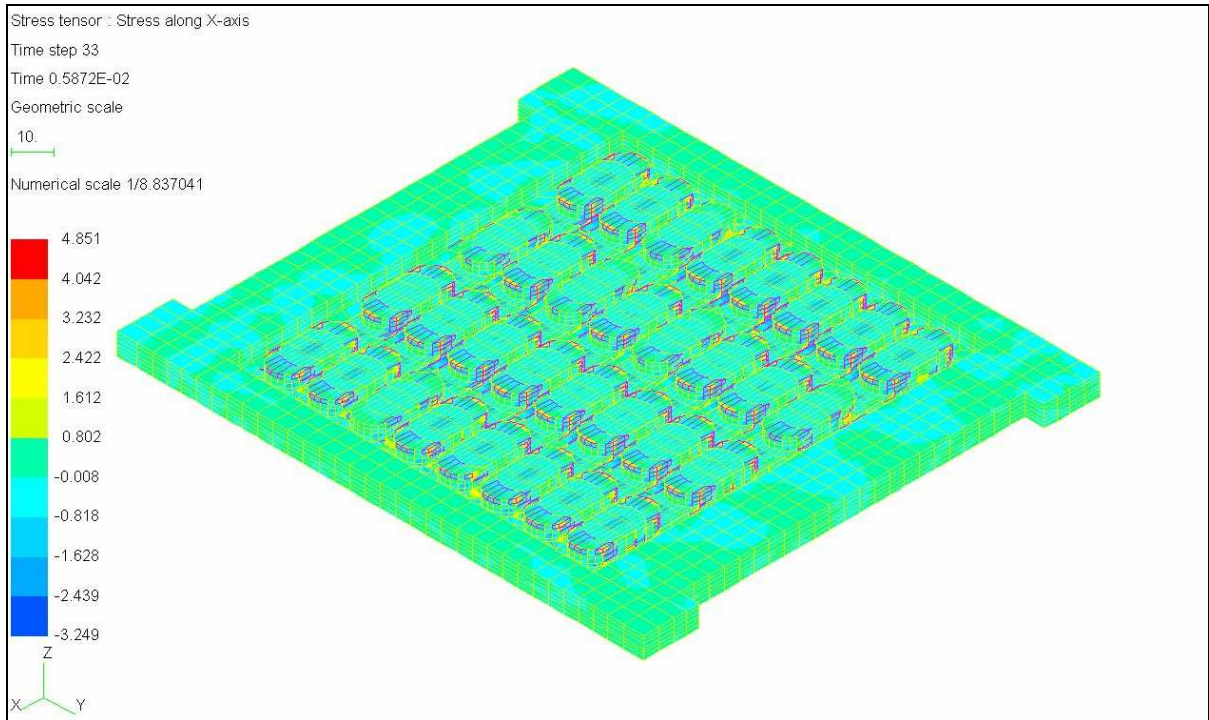
Obr. 77. Časový průběh deformace uzlu 11865 v ose  $x$  pro podložku č.2.



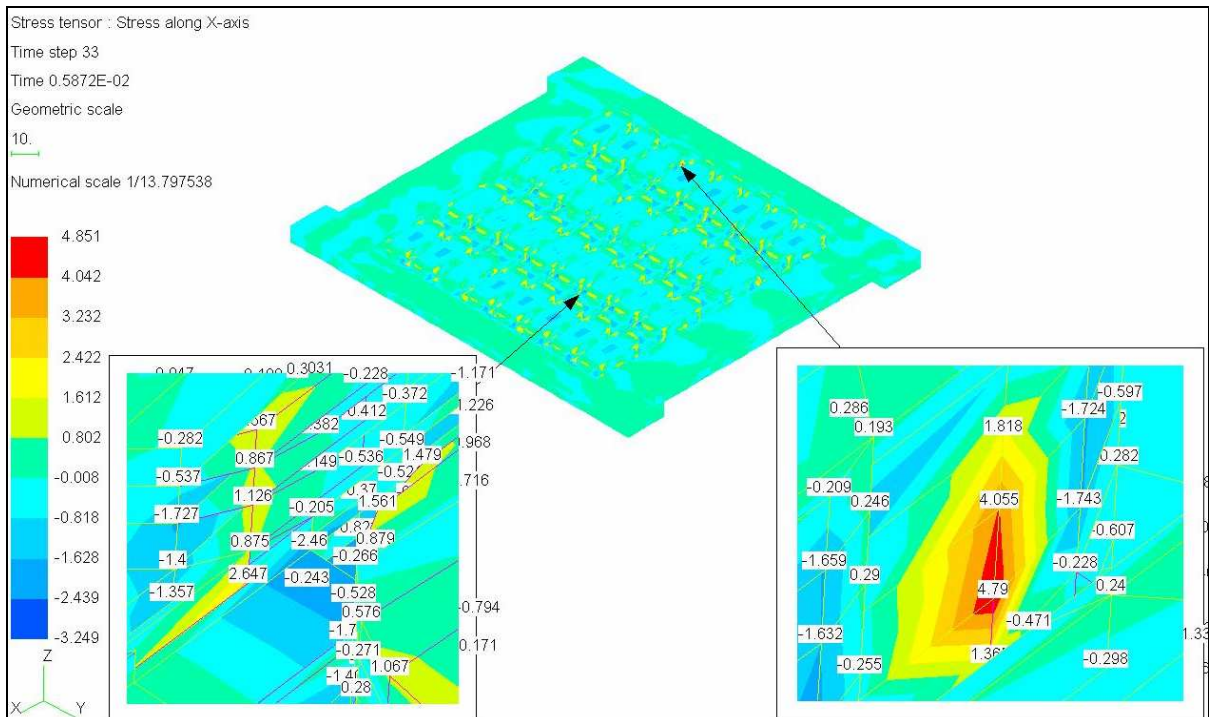
Obr. 78. Časový průběh deformace uzlu 11865 v ose y pro podložku č.2.



Obr. 79. Časový průběh deformace uzlu 11865 v ose z pro podložku č.2.

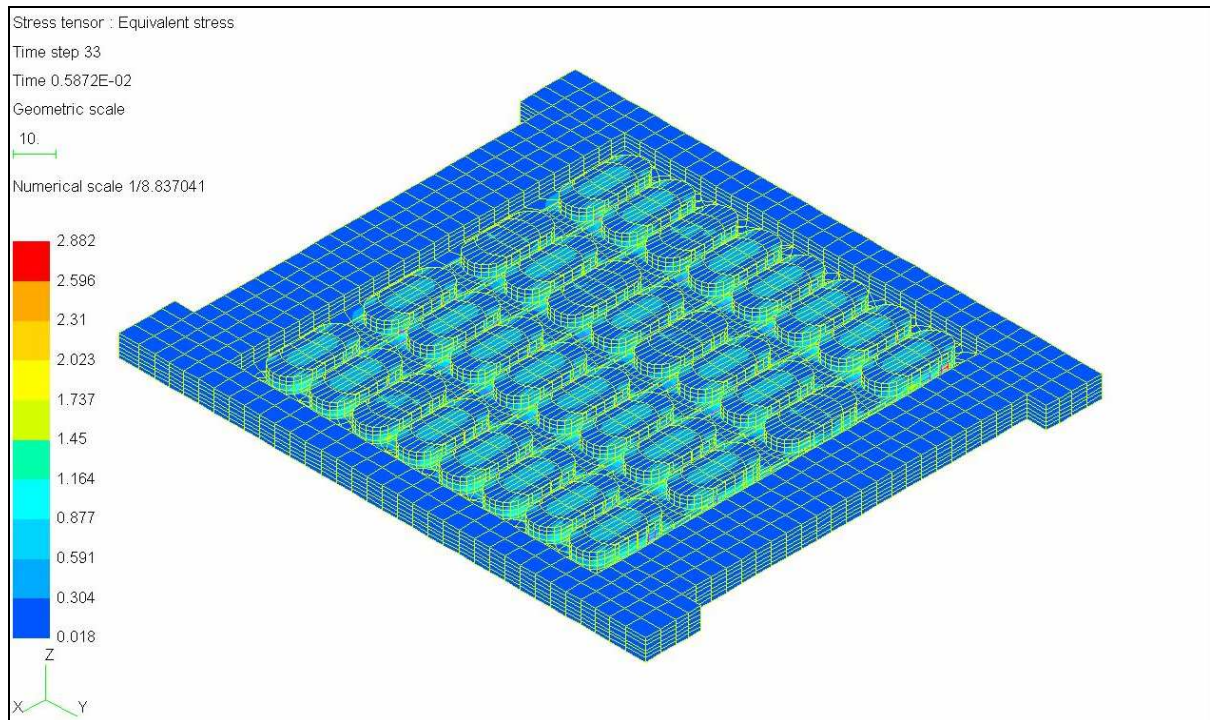


Obr. 80. Napětí podél osy x pro podložku č. 2.

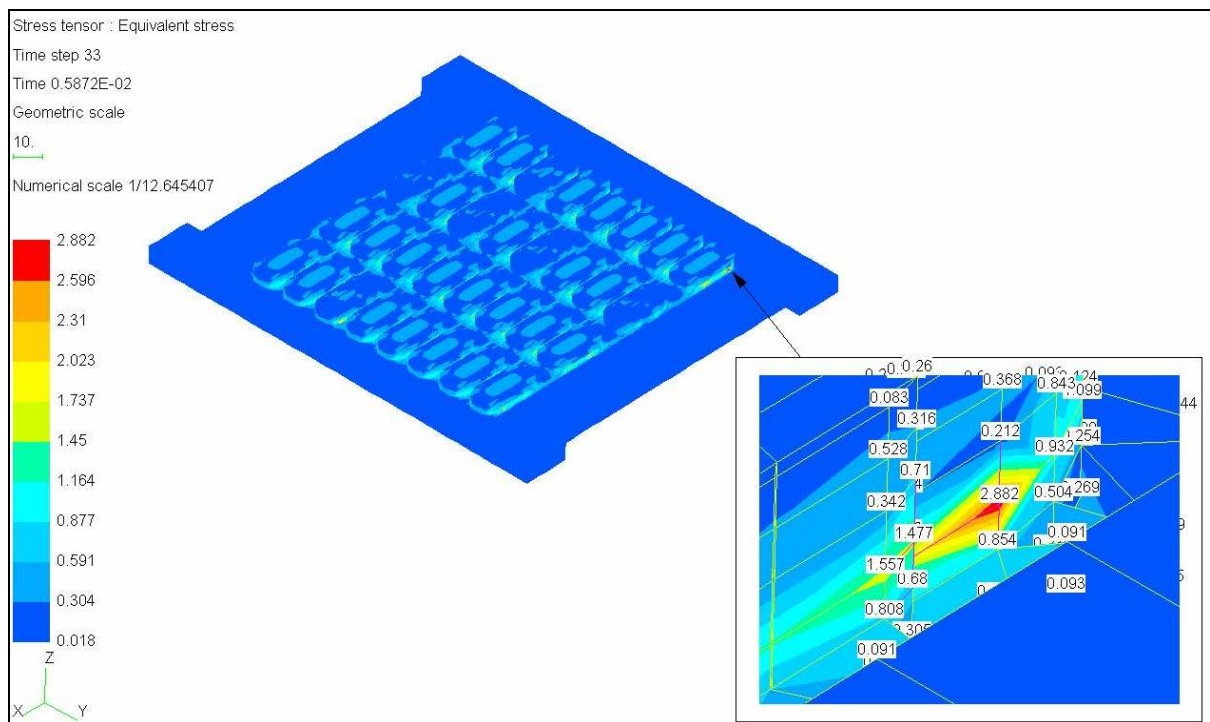


Obr. 81. Napětí podél osy x pro podložku č. 2 (detail na špičky napětí s popisky).





Obr. 82. Von Misovo napětí pro podložku č. 2.



Obr. 83. Von Misovo napětí pro podložku č. 2 (detail na špičky napětí s popisky).

## 4 DISKUSE VÝSLEDKŮ

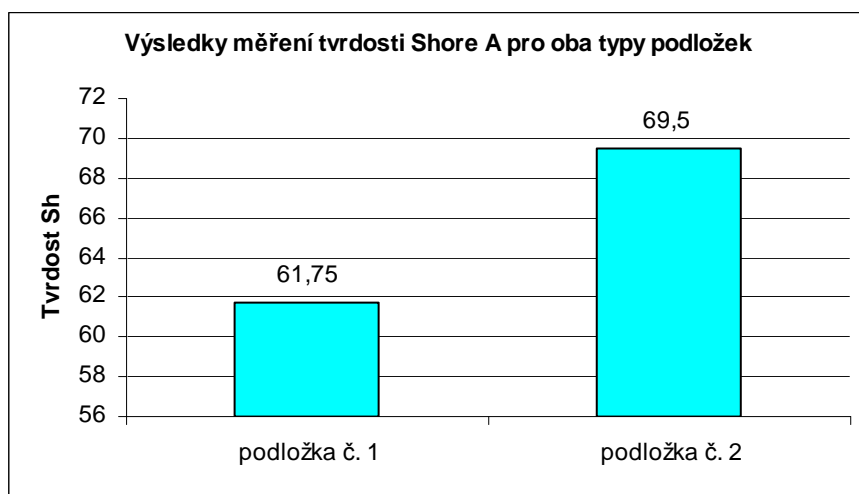
Tato část diplomové práce se věnuje celkovému vyhodnocení výsledků, které byly naměřeny. Bylo provedeno vzájemné porovnání výsledků pro obě podložky se snahou vhodně popsat obě podložky co se týká jejich využití v praxi. Dále je zde upozorněno na možné problémy, které mohou v provozu nastat.

Nejdříve se provedla diskuse výsledků získaných materiálových charakteristik pro jednotlivá měření, potom je provedeno vyhodnocení pevnostních výpočtů pomocí MKP

### 4.1 Materiálové charakteristiky pryžových podložek

#### 4.1.1 Výsledky měření tvrdosti Shore A

Tvrдость byla měřena dle metody Shore A šestkrát pro oba typy podložek. Na obr. 84 je znázorněn graficky výsledek měření tvrdosti Shore A.



Obr. 84. Grafické znázornění hodnot tvrdostí Shore A obou typů podložek

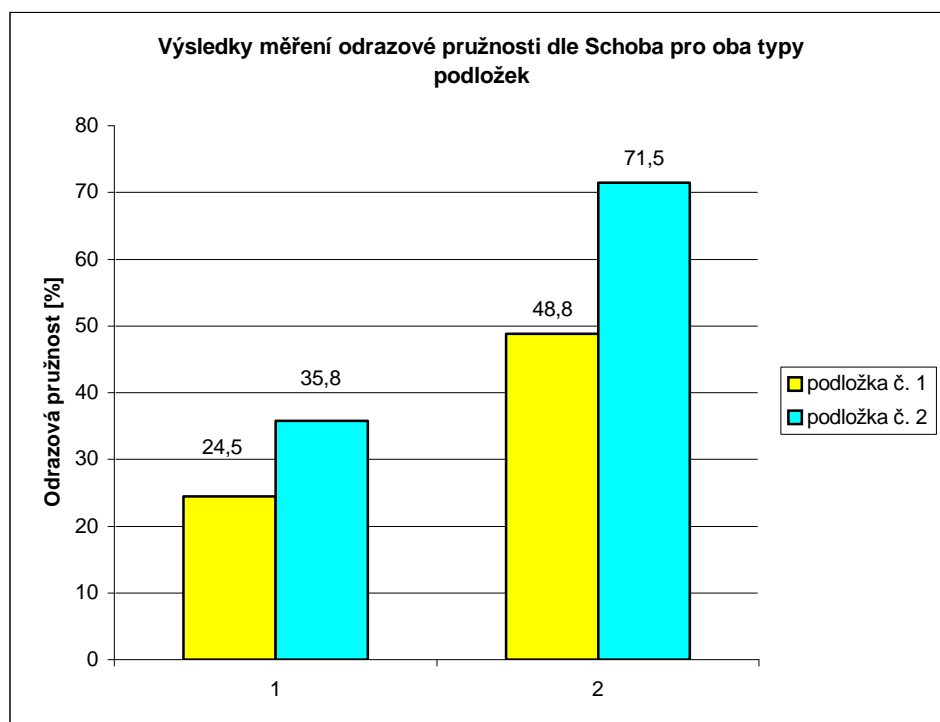
Jak je vidět na obr. 84, tvrdost obou podložek se od sebe příliš nelišila. Podložka č. 2 má tvrdost o něco vyšší, tato vlastnost se projevila i u tahové zkoušky nižší tažností. Materiál pro oba typy podložek patří do kategorie měkkých pryží, které mají tvrdost v rozmezí 20 až 95 <sup>0</sup>Sh. Výrobce udává tvrdost pro pryžové železniční podložky ze směsi přírodního kaučuku je v rozmezí 65 až 75 <sup>0</sup>Sh. Jak je vidět na obr. 84, první typ podložky se sice v tomto intervalu nenachází, ale hodnota tvrdosti se zase příliš neliší. Druhý typ podložky se již v intervalu, který výrobce garantuje, nachází.

O obou typech podložek lze konstatovat, že materiálové charakteristiky splňují požadované hodnoty garantované výrobcem vzhledem k jejich tvrdosti. Jelikož nebyl k dispozici technologický předpis na výrobu obou typů podložek, který si každá firma chrání jako své „know how“, nelze se podrobněji vyjádřit k jejich výsledným vlastnostem, které mohou být u tvrdosti ovlivněny např. stupněm plnění. Výsledná tvrdost podložek může být charakterizována jen na základě naměřených hodnot tvrdosti.

Oba typy podložek jsou s hlediska tvrdosti vhodné pro aplikaci jako tlumící podkladové desky mezi pražec a vlastní kolejnici v železničním svršku.

#### 4.1.2 Výsledky měření odrazové pružnosti podle Schoba

Odrazová pružnost byla měřena metodou podle Schoba opět pro oba typy podložek, třikrát pro každý vzorek. Na obr. 85. je graficky znázorněn výsledek měření obou typů podložek.



Obr. 85. Grafické znázornění výsledků odrazové pružnosti obou typů podložek

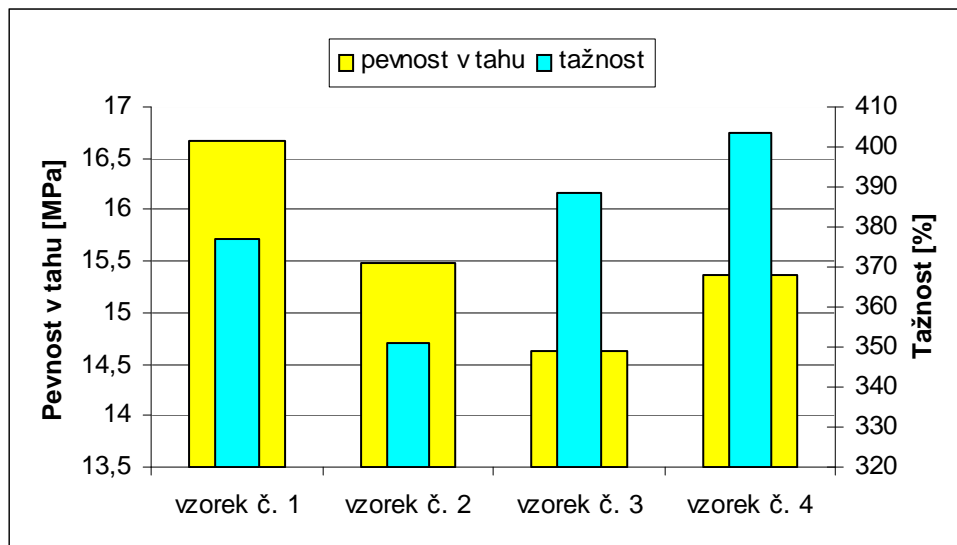
Jak je vidět na obr. 85, větší odrazovou pružnost má typ podložky č. 2. Větší tlumící účinky by měla pravděpodobně mít druhá podložka, ale výsledky měření odrazové pružnosti

obou podložek nejsou zas tak rozdílné. Proto výsledek měření není příliš směrodatný. Výsledky mohou být ovlivněny např. nepřesným měřením vlivem ztrát energie mezi zkušebním tělesem a dopadajícím kyvadlem.

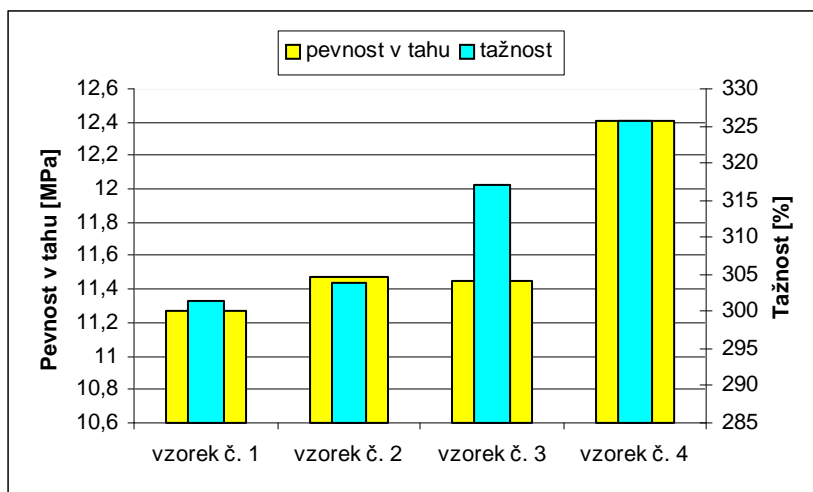
Výrobce udávané hodnoty odrazové pružnosti pro pryžové železniční podložky jsou v rozmezí 50 až 60 %, což ne zcela odpovídá naměřeným hodnotám, ale lze je akceptovat. Může na to mít vliv více faktorů (stupeň plnění, delší expozice na slunečním záření či povětrnostní stárnutí).

#### 4.1.3 Výsledky tahové zkoušky

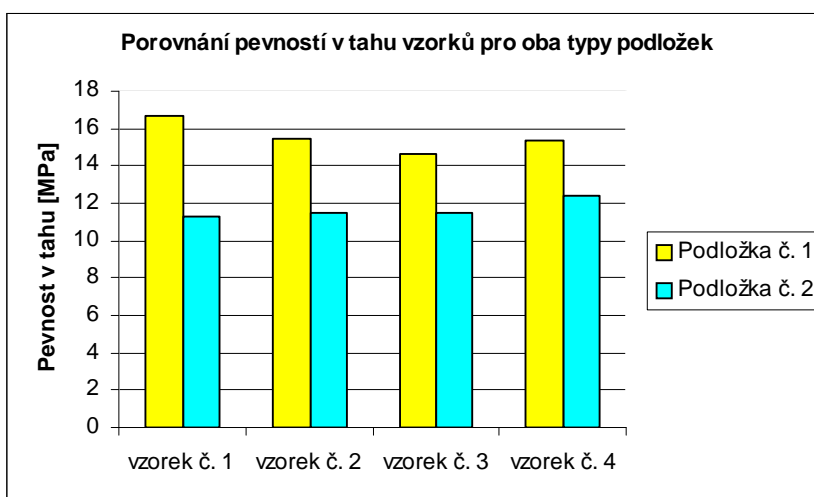
Měření tahové zkoušky bylo prováděno nejen kvůli získání pevností v tahu a tažností pryžových podložek, ale také aby se získal grafický záznam napětí na protažení, který pak posloužil k linearizaci tahové křivky a k získání konstant Mooney-Rivlinovy rovnice. Na obr. 86. jsou uvedeny výsledné hodnoty pevností v tahu a tažností pro oba typy podložek.



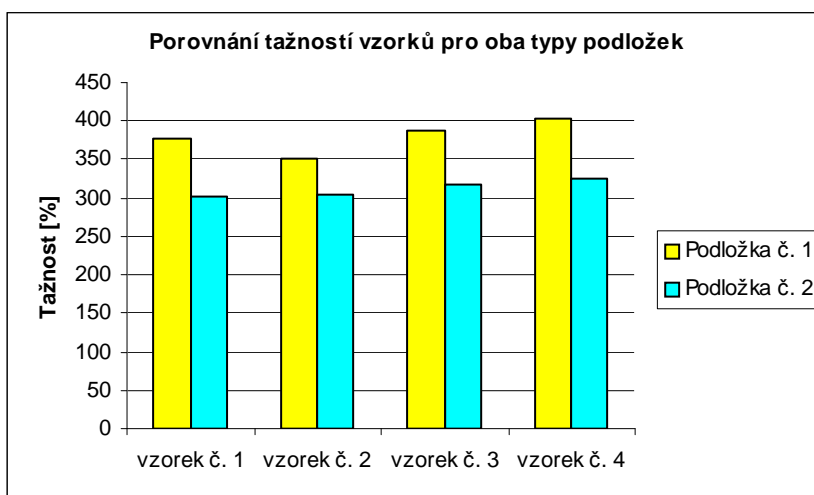
Obr. 86. Porovnání pevností v tahu a tažností 4 vzorků z podložky č.1



Obr. 87. Porovnání pevností v tahu a tažností 4 vzorků z podložky č.2



Obr. 88. Porovnání pevností v tahu vzorků pro oba typy podložek



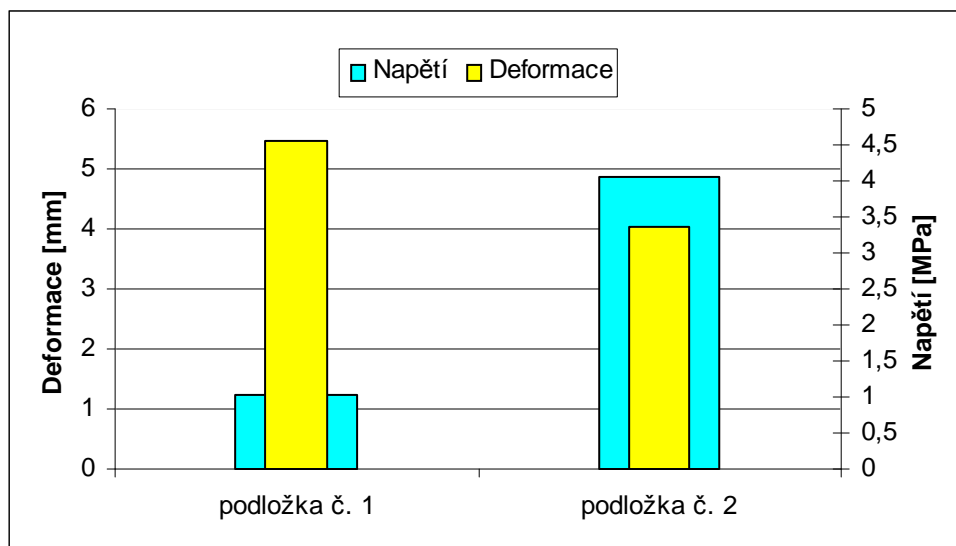
Obr. 89. Porovnání tažností vzorků pro oba typy podložek

Jak je vidět na obr. 8 a 89, vzorky z podložky č. 1 vykazují vyšší nejen pevnost v tahu, ale i tažnost. Čili by měl mít první typ podložky o něco lepší elastické vlastnosti. Na obr. 86 a 87 vidíme porovnání pevností v tahu a tažností mezi jednotlivými měřenými vzorky pro oba typy podložek.

Výsledky měření pevnosti a tažnosti jsou opět značně ovlivněny stupněm plnění a volbou eleastomeru. Čili mohou být rozdílné výsledky obou podložek způsobeny i těmito dvěma faktory.

## 4.2 Výsledky pevnostního výpočtu

Po naměření tahové křivky a její následné linearizaci, která vedla k výpočtu konstant Mooney-Rivlinovy rovnice, byly oba typy podložek namodelovány v software Samcef. Výpočet byl provedený pro Mooney-Rivlinův model, nebyly uvažovány další možné modely jako Ogdenův, případně Hard-Smith-ův. Výsledkem výpočtů byly získány rozložení tenzoru napětí a deformací pro oba typy podložek při stejných zatíženích a okrajových podmínkách. Pro zvolené uzly na podložkách byly uloženy výsledky průběhu deformací v závislosti na čase. Některé průběhy zvolených deformací jsou znázorněny na obrázcích. Na obr. 90 vidíme porovnání deformací a napětí pro oba typy podložek.



Obr. 90. Porovnání velikostí deformací a napětí obou typů podložek

Deformace první podložky je o něco větší a to koresponduje s výsledky z tahové zkoušky, kde první podložka vykazovala vyšší stupeň elasticity. Tomu odpovídá i vyšší hodnota špičky napětí u druhé podložky, která vykazuje vyšší tuhost.

Velikosti deformací obou podložek lze akceptovat, stejně i tak velikosti špiček napětí pro obě podložky. Maximální vypočtená napětí leží dostatečně nízko pod mezí pevnosti v tahu. Ta je u první podložky nad 14 MPa a u druhé podložky nad 11 MPa. Špičková napětí se nacházejí pouze na malém počtu prvků. Výskyt špiček napětí u obou podložek je v místech tvarových diskontinuit tj. na hranách a v místech ostrých přechodů. V těchto místech může docházet při dynamickém zatěžování k možnému vzniku poškození, případně šíření trhlin. Na obr. 52 až 60 a 71 až 79 jsou vidět časové průběhy deformací pro tři různé uzly v síti konečných prvků. Je vidět, že průběhy nejsou lineární, což koresponduje s nelineárním deformačním chováním pryžových materiálů.

## ZÁVĚR

Hlavním cílem diplomové práce bylo stanovit vliv hyperelastických vlastností pryžových železničních podkladových desek prážců na jejich napjatost a chování. Proto bylo nutné nejprve stanovit materiálové charakteristiky těchto podložek. K dispozici byly dva typy pryžových podložek z nedefinovaných kaučukových směsí a s různou morfologií povrchu. Podložky byly dodány firmou ŽPSV a.s. Uherský Ostroh.

Nejdříve byly provedeny u obou typů podložek měření materiálových charakteristik. Měřila se tvrdost a odrazová pružnost. Na normalizovaných vzorcích, vytvořených z reálných pryžových podložek, byly při tahových zkouškách naměřeny a vyhodnoceny průběhy deformačně-napěťových závislostí. Měření tvrdosti a odrazové pružnosti poskytly základní informace o materiálu, ze kterého jsou podložky vyrobeny.

Výsledky měření tvrdosti ukázaly, že oba typy podložek byly v mezích tolerance, udávané výrobcem pro pryžové podkladové podložky. Podložky z tohoto hlediska patří do skupiny měkkých pryží. Výsledky odrazové pružnosti už tak dobře nekorespondovaly s údaji garantovanými výrobcem, byly nižší, než uvádí výrobce. Hodnoty mohou být ovlivněny vyšším stupněm plnění.

Tahové zkoušky potvrdily hyperelastické chování pryže, kdy tahové křivky měly charakteristický nelineární esovitý průběh. Následující linearizací tahových křivek byly získány konstanty pro Mooney-Rivlinovu rovnici, která velmi dobře charakterizuje deformační chování pryže. Pomocí těchto konstant byly vypočteny moduly pružnosti v tahu a ve smyku. Vypočtené konstanty byly dále použity pro charakterizaci pryžového materiálu pro Mooney-Rivlinův konečnoprvkový model a jeho nelineární statický výpočet pomocí MKP v software Samcef. V tomto výpočetním software byly sestrojeny 3D modely podložek, zadány okrajové podmínky a zátěžné stavy pro nelineární pevnostní výpočet.

Výsledkem nelineárního statického pevnostního výpočtu bylo získání rozložení tenzoru napětí a deformací v makroobjemu podložek a časový průběh deformací zvolených uzlů v síti konečných prvků. Výsledné hodnoty deformací jsou přípustné pro dané geometrické rozměry podložek. Vypočítané hodnoty deformací ukazují, že se jedná o podložky z elastického kaučuku. Velikosti špiček napětí jsou vyhovující, protože i maximální hodnota špičkových napětí leží pod hodnotou pevnosti v tahu naměřené pomocí tahové zkoušky. Špičky napětí jsou pouze v místech velkých tvarových diskontinuit tj. v místě hran a ostrých přechodů a jejich hodnota velmi rychle klesá již s velikostí objemového prvku. Mají



především vliv na vznik trhlin a jejich následné šíření v materiálu z pohledu únavy materiálu. Velikost nominálních napětí leží hluboko pod mezí pevnosti u měřených vzorků podložek. MKP dobře vystihuje deformační a napět'ové chování podkladových podložek při statickém zatížení a výsledky můžeme považovat za korektní

Na základě naměřených materiálových charakteristik a z výsledků pevnostního výpočtu se jako vhodnější pryžová železniční podložka do provozních podmínek jeví podložka č.1. Velikosti deformací u podložky č.1 jsou větší než u podložky č.2 ale velikosti špiček napětí jsou nižší než u druhé podložky. Proto by v praxi tato podložka díky své vyšší elasticitě měla lépe tlumit vibrace, které se do ní přenáší od projíždějících vlaků. Z hlediska cyklické únavy by měla být odolnější vůči vzniku a šíření trhlin ve své struktuře díky nižším vypočteným špičkovým napětím.

Protože se tato diplomová práce zabývala jen řešením problému týkajícího se měření a výpočtů podložek při konstantním zatížení, je třeba popis vlivu hyperelastických vlastností na napjatost a chování podkladových desek brát jako modelový. Pro komplexní posouzení by bylo nutné provést řadu dalších měření materiálových hodnot i u jiných modifikovaných tvarů a konstrukcí podkladových podložek. Dále by bylo třeba na reálných konstrukcích provést měření pro získání zatěžovacích spekter pro následné transientní dynamické výpočty, aby byl problém chování podložek dostatečně popsán. Všechny tyto nadstavby ale přesahují rámec možností diplomové práce i znalostí získaných studiem.

## SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- (1) <http://www.k-report.net/koridory/ktechnol.html>
- (2) ČECHÁK, J. *Vývoj železničního svršku v letech 1929 – 2003*, KPM Consult, a.s., Brno, 2004.
- (3) KUBÍK, J. a ZYTKA, A. *Zkušební metody v gumárenství*, SNTL Praha, 1962.
- (4) SCHÄTZ, M. a VONDRÁČEK, P. *Zkoušení polymerů* (Skripta), Praha, 1978.
- (5) BATHE, K.J. *Finite Element Procedures in Engineering Analysis*, Prentice Hall Inc., USA, 1982.
- (6) SEGERLIND, L.J. *Applied Finite Element Analysis*, John Willey, New York, USA, 1984.
- (7) KOLÁŘ, V., NĚMEC, I. A KANICKÝ, V. *FEM – principy a praxe metody konečných prvků*, Computer Press, Praha, 1997.
- (8) JANÍČEK, P. *Pružnost a pevnost I*, Vysoká škola zemědělská v Brně, 1976.
- (9) BONET, J. a WOOD, R.D. *Nonlinear Continuum Mechanics for Finite Element Analysis*, Cambridge University Press, ISBN 0-521-57272-X, 1997.
- (10) CIULLO, P. a HEWITT, N. *The Rubber Formulary*, New York, USA, 1999.
- (11) <http://www.cd.cz/index.php?action=section&id=7>
- (12) Výhody a nevýhody železnice
- (13) [http://cs.wikipedia.org/wiki/%C5%BDlezni%C4%8Dn%C3%AD\\_doprava](http://cs.wikipedia.org/wiki/%C5%BDlezni%C4%8Dn%C3%AD_doprava)
- (14) Hitorie železnice
- (15) <http://cs.wikipedia.org/wiki/Kolejnice>
- (16) <http://cs.wikipedia.org/wiki/V%C3%BDhybka>
- (17) [http://cs.wikipedia.org/wiki/%C5%BDlezni%C4%8Dn%C3%AD\\_pra%C5%BEec](http://cs.wikipedia.org/wiki/%C5%BDlezni%C4%8Dn%C3%AD_pra%C5%BEec)
- (18) [http://irpec.lgm.gov.my/prd\\_railpads.html](http://irpec.lgm.gov.my/prd_railpads.html)
- (19) [http://www.tiflex.co.uk/track\\_home/railpads/railpads.html](http://www.tiflex.co.uk/track_home/railpads/railpads.html)
- (20) [http://www.vipheinke.com/rail\\_support\\_pads.asp](http://www.vipheinke.com/rail_support_pads.asp)
- (21) stránka applications
- (22) SCHÄTZ, M. *Kaučuk*, STNL Praha, 1965.
- (23) FRANTA, I. A kol. *Zpracování kaučukových směsí a vlastnosti*, SNTL Praha, 1969.
- (24) ŠPAČEK, J. *Technologie gumárenská a plastikářská II*, VUT Brno, 1979.

- (25) MORTON, M. *Rubber technology*, Van Nostrand Reinhold Company, New York, 1973.
- (26) ŠTĚPAN, M. *Gumárenská technologie VI: Teoretické základy*, STNL Praha, 1965.
- (27) PERMSKÝ, R. a SAMEC, M. *Gumárenská technologie VIII: Tvrdá pryž*, SNTL Praha, 1968.
- (28) LEPETOV, V.A. *Technická pryž*, STNL Praha, 1965.
- (29) MEISSNER, B. a ZILVAR, V. *Fyzika polymerů: Struktura a vlastnosti polymerních materiálů*, SNTL Praha, 1987.
- (30) BROŽ, P. a PROCHÁZKA, P. *Řešení nelineárních úloh mechaniky metodou okrajových prvků*, Grada Publishing s.r.o., 1995.
- (31) HINTON, E. *Numerical Methods and Software for Dynamic analysis of Plates and Shells*, Swansea, UK, 1988.
- (32) ČSN ISO 37 *Stanovení tahových vlastností*.
- (33) ČSN 621480 *Stanovení odrazové pružnosti na přístroji Schob*.
- (34) ISO 7615 *Stanovení tvrdosti vtlačováním pomocí kapesních tvrdoměrů*.
- (35) *Samcef User Manual, V.10.1*, Samtech, Belgium, 2004
- (36) BONET, J a WOOD, R.D. *Nonlinear Continuum Mechanics for Finite Element Analysis*, Cambridge University Press, UK, 1997

## SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

$A_0$	původní průřez zkušebního tělesa
$A_\varepsilon$	plocha hysterezní křivky
$A_h$	plocha hysterezních ztrát
$a_0$	šířka zkušebního tělesa
$b_0$	tloušťka zkušebního tělesa
$B$	Cauchyho tenzor napětí
$[B]$	transformační matice
$[B]^T$	matice transponovaných operátorů
$C$	Cauchyho tenzor napětí
$C_1, C_2$	konstanty Mooney - Rivlinovy rovnice
$[D]$	matice fyzikálních konstant
$\{d\}$	vektor uzlových posunutí pro celý systém
$\{d\}^e$	vektor uzlových posunutí elementu
$[d]^e$	vektor posuvu elementu
${}^T[d]^e$	vektor zobecněných posuvů
$dV$	objemový element
$d\Gamma$	definovaná povrchová plošná oblast
$E$	Youngův modul pružnosti v tahu
$F$	síla
$F_{\max}$	maximální síla
$\{f\}$	vektor výsledných sil v uzlech
${}^T\{f\}^e$	vektor zatížení v uzlech
$G$	modul pružnosti ve smyku
$G_M$	modul tuhosti
$G_{teor}$	rovnovážný smykový modul ideální sítě
$H$	tvrdost Shore
$H_M$	konstanta symetrie deformační energie
$H_\varepsilon$	poměrná statická hystereze
$h$	hloubka deformace

$h_0$	výška před dopadem kyvadla
$h_r$	výška po dopadu kyvadla
$I$	jednotkový tenzor
$I_1, I_2, I_3$	hlavní invarianty tenzoru deformace
$K$	objemový modul pružnosti
$[k]$	matice tuhosti pro celý systém
$[k]^e$	matice tuhosti pro element
$l$	změněná délka zkušebního tělesa po deformaci
$l_0$	původní délka zkušebního tělesa
$l_t$	délka zkušebního tělesa při přetržení
$m$	hmotnost lokomotivy
$M_x$	gumárenský modul
MKP	metoda konečných prvků
$n$	počet měření
$[N]^T$	matice interpolačních funkcí
$p$	polymerační stupeň
$p_x, p_y, p_z$	rozložená zatížení na povrchu
$R$	molární plynová konstanta
$\bar{R}$	střední hodnota odrazové pružnosti
$R_b$	napětí při přetržení
$R_m$	mez pevnosti
$R_s$	odrazová pružnost
$R_\varepsilon$	statická resilience
$S$	druhý Piola-Kirchhoffův tenzor napětí
$S$	plocha
$s$	směrodatná odchylka
$T$	termodynamická teplota
$t_k$	studentův činitel
$T_g$	teplota skelného přechodu
$u, v, w$	posuv v osách $x, y, z$
$V_0$	původní objem

$W$	deformační energie
$W_0^e$	práce vykonaná objemovými silami
$W_p^e$	práce vykonaná rozloženým zatížením
$\bar{x}$	výběrový průměr
$\tilde{x}_{50}$	medián
$x_{\max}$	maximální hodnota statistického výběru
$x_{\min}$	minimální hodnota statistického výběru
$X^*, Y^*, Z^*$	vyjádření objemových sil
$\gamma$	zkos
$\Delta l$	změna délky
$\Delta V$	změna objemu
$\varepsilon$	poměrné (relativní) prodloužení, deformace
$\varepsilon_b$	poměrné zkrácení
$\varepsilon_b$	deformace při přetržení
$\varepsilon_m$	deformace na mezi pevnosti
$\varepsilon_t$	tažnost
$\{\varepsilon_T\}$	přetvoření od teploty
$\lambda$	poměrná délka
$\lambda_x, \lambda_y, \lambda_z$	hlavní poměrná přetvoření ve směru os
$\mu_{MR}$	smykový modul (Mooney-Rivlinův model)
$\mu_{NH}$	modul pružnosti ve smyku (Neo-Hookovský model)
$\mu_p$	smykový modul (Ogdenův model)
$\mu_v$	modul pružnosti ve smyku (Vargův model)
$\nu$	poissonova konstanta
$\nu_{id}$	koncentrace řetězců (síťová hustota)
$\sigma$	napětí v tahu
$\sigma_{destrkt}$	napětí při přetržení
$\sigma_E$	mez úměrnosti
$\sigma_{hl}$	horní mez kluzu
$\sigma_k$	mez kluzu

$\sigma_{kd}$	dolní mez kluzu
$\sigma_{\max}$	maximální napětí v tahu
$\sigma_r$	mez pružnosti
$\Pi$	celková potenciální energie
$\Pi_i$	deformační energie vnitřních sil tělesa
$\Pi_z$	práce vnějších sil
$\Pi^e$	celková potenciální energie elementu

## SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1. Průřez dvojkolejnou koridorovou tratí.....	12
Obr. 2. Bezpodkladnicové upevnění pryžnými svěrkami VOSSLOH.....	17
Obr. 3. Obecná tahová křivka.....	33
Obr. 4. Schobův přístroj pro zkoušení odrazové pružnosti.....	38
Obr. 5. Lüpkeho přístroj pro zkoušení odrazové pružnosti.....	39
Obr. 6. Zkušební hrot tvrdoměru typu A a D.....	42
Obr. 7. Tvary zkušebních těles pro tahové zkoušky podle ČSN 64 0605.....	49
Obr. 8. Vysekávací nůž pro zkušební tělesa ve tvaru oboustranných lopatek.....	50
Obr. 9. Zkušební tělísko ve tvaru oboustranné lopatky.....	51
Obr. 10. Tahová křivka pro podložku č. 1 - vzorek č. 1.....	54
Obr. 11. Tahová křivka pro podložku č. 1 - vzorek č. 2.....	54
Obr. 12. Tahová křivka pro podložku č. 1 - vzorek č. 3.....	55
Obr. 13. Tahová křivka pro podložku č. 1 - vzorek č. 4.....	55
Obr. 14. Tahová křivka pro podložku č. 2 - vzorek č. 1.....	56
Obr. 15. Tahová křivka pro podložku č. 2 - vzorek č. 2.....	56
Obr. 16. Tahová křivka pro podložku č. 2 - vzorek č. 3.....	57
Obr. 17. Tahová křivka pro podložku č. 2 - vzorek č. 4.....	57
Obr. 18. Linearizace tahové křivky pro podložku č. 1 - vzorek č. 1.....	61
Obr. 19. Linearizace tahové křivky pro podložku č. 1 - vzorek č. 2.....	61
Obr. 20. Linearizace tahové křivky pro podložku č. 1 - vzorek č. 3.....	62
Obr. 21. Linearizace tahové křivky pro podložku č. 1 - vzorek č. 4.....	62
Obr. 22. Linearizace tahové křivky pro podložku č. 2 - vzorek č. 1.....	63
Obr. 23. Linearizace tahové křivky pro podložku č. 2 - vzorek č. 2.....	63
Obr. 24. Linearizace tahové křivky pro podložku č. 2 - vzorek č. 3.....	64
Obr. 25. Linearizace tahové křivky pro podložku č. 2 - vzorek č. 4.....	64
Obr. 26. Pryžová železniční podkladová podložka č. 1.....	69
Obr. 27. Pryžová železniční podkladová podložka č. 2.....	70
Obr. 28. Základní geometrie podložky č. 1 - izometrický pohled.....	70
Obr. 29. Základní geometrie podložky č. 1 - pohled na roviny $yz$ a $xy$ .....	71
Obr. 30. Základní geometrie podložky č. 1 - pohled na rovinu $xz$ .....	71
Obr. 31. Základní geometrie podložky č. 2 - izometrický pohled.....	72
Obr. 32. Základní geometrie podložky č. 1 - pohled na roviny $yz$ a $xy$ .....	72



Obr. 33. Základní geometrie podložky č. 1 - pohled na rovinu $xz$ .....	73
Obr. 34. 3-D síť konečných prvků pro podložku č. 1 .....	73
Obr. 35. 3-D síť konečných prvků pro podložku č. 2 .....	74
Obr. 36. Okrajové podmínky pro podložku č. 1 .....	75
Obr. 37. Okrajové podmínky pro podložku č. 1 - detailnější pohled .....	76
Obr. 38. Okrajové podmínky pro podložku č. 2 .....	76
Obr. 39. Okrajové podmínky pro podložku č. 2 - detailnější pohled .....	77
Obr. 40. Síly působící od vlastní hmotnosti vlaku .....	78
Obr. 41. Zátěžný stav pro podložku č. 1 .....	79
Obr. 42. Zátěžný stav pro podložku č. 1 - detailnější pohled .....	79
Obr. 43. Časová funkce zátěže pro podložku č. 1 .....	80
Obr. 44. Zátěžný stav pro podložku č. 2 .....	80
Obr. 45. Zátěžný stav pro podložku č. 2 - detailnější pohled .....	81
Obr. 46. Časová funkce zátěže pro podložku č. 2 .....	81
Obr. 47. Deformace podložky č. 1 v ose $x$ .....	82
Obr. 48. Deformace podložky č. 1 v ose $y$ .....	83
Obr. 49. Deformace podložky č. 1 v ose $z$ .....	83
Obr. 50. Modul posunutí (deformace) podložky č. 1 .....	84
Obr. 51. Modul posunutí podložky č. 1 - pohled ve třech různých rovinách .....	84
Obr. 52. Časový průběh deformace uzlu 1113 v ose $x$ pro podložku č. 1 .....	85
Obr. 53. Časový průběh deformace uzlu 1113 v ose $y$ pro podložku č. 1 .....	85
Obr. 54. Časový průběh deformace uzlu 1113 v ose $z$ pro podložku č. 1 .....	86
Obr. 55. Časový průběh deformace uzlu 10457 v ose $x$ pro podložku č. 1 .....	86
Obr. 56. Časový průběh deformace uzlu 10457 v ose $y$ pro podložku č. 1 .....	87
Obr. 57. Časový průběh deformace uzlu 10457 v ose $z$ pro podložku č. 1 .....	87
Obr. 58. Časový průběh deformace uzlu 12218 v ose $x$ pro podložku č. 1 .....	88
Obr. 59. Časový průběh deformace uzlu 12218 v ose $y$ pro podložku č. 1 .....	88
Obr. 60. Časový průběh deformace uzlu 12218 v ose $z$ pro podložku č. 1 .....	89
Obr. 61. Napětí podél osy $x$ pro podložku č. 1 .....	89
Obr. 62. Detail špičky napětí podél osy $x$ pro podložku č. 1 (s popisky špiček napětí) .....	90
Obr. 63. Detail špičky napětí podél osy $x$ pro podložku č. 1 - rotace o $180^0$ kolem osy $z$ .....	90
Obr. 64. Von Misesovo napětí pro podložku č. 1 .....	91
Obr. 65. Von Misesovo napětí pro podložku č. 1 (detail na špičky napětí) .....	91
Obr. 66. Deformace podložky č. 2 v ose $x$ .....	92

Obr. 67. Deformace podložky č. 2 v ose y .....	92
Obr. 68. Deformace podložky č. 2 v ose z .....	93
Obr. 69. Modul posunutí (deformace) podložky č. 2 .....	93
Obr. 70. Modul posunutí podložky č. 2 - pohled ve třech různých rovinách.....	94
Obr. 71. Časový průběh deformace uzlu 1113 v ose x pro podložku č. 2 .....	94
Obr. 72. Časový průběh deformace uzlu 1113 v ose y pro podložku č. 2 .....	95
Obr. 73. Časový průběh deformace uzlu 1113 v ose z pro podložku č. 2 .....	95
Obr. 74. Časový průběh deformace uzlu 10457 v ose x pro podložku č. 2 .....	96
Obr. 75. Časový průběh deformace uzlu 10457 v ose y pro podložku č. 2.....	96
Obr. 76. Časový průběh deformace uzlu 10457 v ose z pro podložku č. 2 .....	97
Obr. 77. Časový průběh deformace uzlu 11865 v ose x pro podložku č. 2 .....	97
Obr. 78. Časový průběh deformace uzlu 11865 v ose y pro podložku č. 2 .....	98
Obr. 79. Časový průběh deformace uzlu 11865 v ose z pro podložku č. 2.....	98
Obr. 80. Napětí v ose x pro podložku č. 2 .....	99
Obr. 81. Napětí v ose x pro podložku č. 2 (detail na špičky napětí s popisky) .....	99
Obr. 82. Von Misesovo napětí pro podložku č. 2.....	100
Obr. 83. Von Misesovo napětí pro podložku č. 2 (detail na špičky napětí s popisky) .....	100
Obr. 84. Grafické znázornění hodnot tvrdostí Shore A obou typů podložek.....	101
Obr. 85. Grafické znázornění výsledků odrazové pružnosti pro oba typy podložek .....	102
Obr. 86. Porovnání pevností v tahu a tažností 4 vzorků z podložky č.1 .....	103
Obr. 87. Porovnání pevností v tahu a tažností 4 vzorků z podložky č.2 .....	104
Obr. 88. Porovnání pevností v tahu vzorků pro oba typy podložek.....	104
Obr. 89. Porovnání tažností vzorků pro oba typy podložek.....	104
Obr. 90. Porovnání velikostí deformací a napětí obou typů podložek.....	105

## SEZNAM TABULEK

Tab. I	Rozměry zkušebních těles pro tahové zkoušky [mm] .....	49
Tab. II	Rozměry vysekávacích nožů zkušebních těles ve tvaru oboustranných lopatek ..	50
Tab. III	Naměřené hodnoty pevností v tahu, modulů a tažností z tahových křivek.....	58
Tab. IV	Statistické výpočty tahové zkoušky pro podložku č. 1 .....	58
Tab. V	Statistické výpočty tahové zkoušky pro podložku č. 2 .....	58
Tab. VI	Naměřené a vypočtené hodnoty Mooney-Rivlinových konstant a modulů.....	65
Tab. VII	Naměřené hodnoty tvrdosti a vypočtená statistika pro oba typy podložek .....	66
Tab. VIII	Naměřené a vypočtené hodnoty odrazové pružnosti pro oba typy podložek.....	67
Tab. IX	Intervaly spolehlivosti hodnot odrazové pružnosti pro obě podložky .....	68













