

Vliv teploty na mechanické vlastnosti pryžových výrobků

Bc. Rostislav Blažek

Diplomová práce
2008



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

nascannované zadání s. 1

nascannované zadání s. 2

ABSTRAKT

Tato diplomová práce se zabývá vlivem teploty a tvaru na mechanické vlastnosti pryžových výrobků.

Teoretická část diplomové práce popisuje, co to pryž je, složení směsi, výrobu pryže a její recyklaci. Dále fyzikálně mechanické a tepelné vlastnosti pryže, složené systémy a konstrukční pryžové prvky.

V praktické části je popis výroby zkušebních těles, výpočet jejich tvarového faktoru a deformační zkouška v tlaku provedená v teplotní komoře. Jsou zde popsány FEM modely vytvořené v programech COSMOS a MSC. PATRAN. Na závěr jsou srovnány výsledky získané z modelů s výsledky z experimentálních zkoušek.

Klíčová slova: pryž, hyperelastická, teplota, tvarový faktor

ABSTRACT

The purpose of graduation thesis is to explore temperature and shape effects on mechanical properties of rubber products.

The theoretical part of the work is intended on description physico-mechanical and thermal properties of rubber, composition of mixture, production of rubber, rubber recycling, compound systems and constructional rubber elements.

The practical part of diploma work describes production of test specimens and calculation of their shape factor. Further, it describes a deformation pressure test in temperature chamber and FEM models which has been created by COSMOS and MSC programs. In the end, there are compared results obtained from models and experimental tests.

Keywords: rubber, hyper-elasticity, temperature, shapfactor

Poděkování:

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu diplomové práce panu Ing. Milanu Žaludkovi, Ph D. za odborné vedení, rady a připomínky, které mi poskytoval při řešení diplomové práce. Dále bych chtěl poděkovat panům doc. Ing. Oldřichu Šubovi, CSc. za cenné rady a pomoc při sestavení FEM modelů v programu COSMOS, Ing. Zdeňku Dvořákovi, CSc. za pomoc při získání směsi na výrobu pryžových výrobků, Ing. Vladimíru Šumberovi a Ing. Jiřímu Šálkovi za pomoc při výrobě pryžových výrobků a v neposlední řadě i Ing. Jakubu Javoříkovi Ph D. za pomoc při tvorbě FEM modelu a získání konstant pro hyperelastický model z programu MSC. PATRAN.

Souhlasím s tím, že s výsledky mé práce může být naloženo dle uvážení vedoucího diplomové práce a ředitele ústavu. V případě publikace budu uveden jako spoluautor. Prohlašuji, že jsem na celé diplomové práci pracoval samostatně a požitou literaturu sem citoval.

Ve Zlíně, 22. 5. 2008

.....

podpis

OBSAH

ÚVOD	10
1 STUDIJNÍ ČÁST	11
1 PRYŽ	12
1.1 DEFINICE PRYŽE	12
1.2 HISTORIE PRYŽE	12
2 VÝROBA PRYŽE	13
2.1 SKLADBA SMĚSI.....	13
2.1.1 Elastomer.....	13
2.1.2 Vulkanizační činidlo	13
2.1.3 Urychlovače vulkanizace	14
2.1.4 Aktivátory vulkanizace.....	14
2.1.5 Antioxidanty.....	14
2.1.6 Změkčovadla	14
2.1.7 Plniva.....	15
2.1.8 Pigmenty.....	15
2.2 MÍCHÁNÍ SMĚSI	15
2.3 PLASTIKACE	15
2.4 VULKANIZACE.....	16
2.5 VULKANIZAČNÍ OPTIMUM.....	16
3 REGENERACE PRYŽE	17
3.1 PODSTATA REGENERACE	17
3.2 VÝROBA REGENERÁTU	17
3.3 POUŽITÍ REGENERÁTU	18
4 ROZDĚLENÍ PRYŽE	19
4.1 PODLE POUŽITÍ KAUČUKU NA PRYŽOVÉ VÝROBKY.....	19
4.1.1 Přírodní kaučuky a příklady použití	19
4.1.2 Syntetické kaučuky a příklady použití.....	19
4.2 PODLE MNOŽSTVÍ VÁZANÉ SÍRY	20
4.2.1 Měkká pryž.....	20
4.2.2 Polotvrdá pryž	20
4.2.3 Tvrdá pryž	20
4.3 PODLE PRŮMYSLOVÉHO ODVĚTVÍ NA VÝROBU PRYŽOVÝCH VÝROBKŮ.....	21
5 SYNTETICKÉ KAUČUKY	22
5.1 NR – PŘÍRODNÍ ISOPRENOVÝ KAUČUK	22
5.1.1 Výroba NR	22
5.1.2 Vlastnosti NR	23
5.1.3 Použití NR.....	23

5.2	SBR – BUTADIENSTYRENOVÝ KAUČUK.....	23
5.2.1	Výroba SBR	23
5.2.1.1	Výroba emulzního SBR	24
5.2.1.2	Výroba roztokových SBR	24
5.2.1.3	Vulkanizace SBR	24
5.2.2	Vlastnosti SBR	25
5.2.3	Použití SBR	25
6	VLASTNOSTI PRYŽE.....	26
6.1	FYZIKÁLNĚ – MECHANICKÉ VLASTNOSTI	26
6.1.1	Elasticita	26
6.1.2	Hyperelasticita	26
6.1.3	Hyperelastické modely	27
6.1.4	Přehled hyperelastických modelů.....	28
6.1.4.1	Neo-Hookean	28
6.1.4.2	Mooney-Rivlin	29
6.1.4.3	Ogden.....	30
6.1.5	Deformační zkoušky.....	30
6.1.5.1	Deformace v tlaku.....	31
6.1.5.2	Měrné tlakové zatížení a poměrné stlačení	32
6.1.5.3	Pevnost v tlaku.....	32
6.1.5.4	Trvalá deformace v tlaku	32
6.1.5.5	Modul pružnosti v tlaku.....	33
6.1.5.6	Tvarový faktor.....	34
6.2	TEPELNÉ VLASTNOSTI.....	35
6.2.1	Závislost modulu pružnosti na teplotě	35
6.2.1.1	Teplota zesklenní	35
6.2.1.2	Teplota tání	36
6.2.1.3	Trvalá tepelná odolnost.....	36
6.2.1.4	Závislost mechanických vlastností na teplotě.....	36
7	SLOŽENÉ SYSTÉMY	37
7.1	ZPŮSOBY SPOJOVÁNÍ PRYŽE S RŮZNÝMI MATERIÁLY.....	37
7.1.1	Pomocí lepení.....	37
7.1.1.1	Rozdělení lepidel	37
7.1.1.2	Aplikace lepidel	38
7.2	SPOJOVÁNÍ PRYŽE S KOVOVÝMI MATERIÁLY	39
8	KONSTRUKČNÍ PRYŽOVÉ PRVKY	40
8.1	PRYŽOKOVOVÉ PRUŽNÉ PRVKY – PRUŽINY A PRUŽNÁ ULOŽENÍ.....	40
8.1.1	Charakteristika pružiny	40
8.1.2	Tlaková pružina.....	41
8.1.2.1	Výpočet napětí a deformace tlakové pružiny.....	41
8.1.2.2	Tvarový faktor tlakové pružiny.....	43
9	SHRnutí STUDIjNÍ ČÁSTI.....	44
II	PRAKTICKÁ ČÁST	45
10	STANOVENÍ CÍLŮ A METOD V PRAKTICKÉ ČÁSTI.....	46

11	VÝROBA ZKUŠEBNÍCH TĚLES	47
11.1	LISOVACÍ FORMA.....	48
11.2	LISOVANÍ ZKUŠEBNÍCH VZORKŮ	49
11.3	MATERIÁL ZKUŠEBNÍCH VZORKŮ	49
12	VÝPOČET TVAROVÉHO FAKTORU A TVAROVÉ FUNKCE.....	50
12.1	TVAROVÝ FAKTOR.....	50
12.2	TVAROVÁ FUNKCE.....	53
13	MODEL.....	54
13.1	TAHOVÁ ZKOUŠKA	54
13.2	ZKOUŠKA NAFUKOVÁNÍM.....	56
13.3	VÝPOČTOVÝ PROGRAM MSC. PATRAN	57
13.4	MODEL Z PROGRAMU MSC. PATRAN	58
13.5	VÝPOČTOVÝ PROGRAM COSMOS	60
13.6	MODEL Z PROGRAMU COSMOS	60
13.6.1	Hodnoty z modelu pro výšku h_1	60
13.6.2	Hodnoty z modelu pro výšku h_3	61
14	DEFORMAČNÍ ZKOUŠKA V TLAKU	63
14.1	POPIS POUŽITÝCH ZAŘÍZENÍ.....	63
14.1.1	Zkušební stroj Zwick 1456.....	63
14.1.2	Teplotní komora Zwick.....	64
14.2	TLAKOVÁ ZKOUŠKA	65
14.2.1	Naměřené hodnoty	65
14.3	SROVNÁNÍ Vlivů TEPLIT, TVARŮ A VÝŠEK Z NAMĚŘENÝCH GRAFŮ ZÁVISLOSTI NAPĚTÍ NA POMĚRNÉM STLAČENÍ.....	66
14.3.1	Srovnání při T_1 a h_1 , pro všechny tvary	66
14.3.2	Srovnání T_2 a h_1 , pro všechny tvary.....	66
14.3.3	Srovnání T_3 a h_1 , pro všechny tvary.....	67
14.3.4	Srovnání T_1 a h_2 , pro všechny tvary.....	67
14.3.5	Srovnání T_2 a h_2 , pro všechny tvary.....	68
14.3.6	Srovnání T_3 a h_2 , pro všechny tvary.....	68
14.3.7	Srovnání T_1 a h_3 , pro všechny tvary.....	69
14.3.8	Srovnání T_2 a h_3 , pro všechny tvary.....	69
14.3.9	Srovnání T_3 a h_3 , pro všechny tvary.....	70
14.3.10	Plný válec: srovnání výšky h_x při všech teplotách	70
14.3.11	Plný hranol: srovnání výšky h_x při všech teplotách.....	72
14.3.12	Válec s kulatým otvorem: srovnání výšky h_x při všech teplotách.....	73
14.3.13	Hranol s kulatým otvorem: srovnání výšky h_x při všech teplotách	75
14.3.14	Válec se čtvercovým otvorem: srovnání výšky h_x při všech teplotách	76
14.3.15	Hranol se čtvercovým otvorem: srovnání výšky h_x při všech teplotách.....	78
15	POROVNÁNÍ VÝLEDKŮ Z MODELU A EXPERIMENTÁLNÍHO MĚŘENÍ PRO PLNÝ VÁLEC	80

15.1	SROVNÁNÍ MODEL – EXPERIMENT PRO PLNÝ VÁLEC VÝŠKY H_1	80
15.1.1	Srovnání tuhostí model – experiment pro výšku h_1 podle zvolené síly	81
15.2	SROVNÁNÍ MODEL – EXPERIMENT PRO PLNÝ VÁLEC VÝŠKY H_3	82
15.2.1	Srovnání tuhostí model – experiment pro výšku h_3 podle zvolené síly	83
15.3	SROVNÁNÍ TUHOSTÍ MODEL – EXPERIMENT Z HLEDISKA TVARU.....	83
15.3.1	Výpočet tuhosti model – experiment pro výšku h_1 a h_3	83
ZÁVĚR		85
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY		86
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK		87
SEZNAM OBRÁZKŮ		88
SEZNAM TABULEK.....		91
SEZNAM PŘÍLOH.....		92

ÚVOD

Přez patří k důležitým konstrukčním prvkům a výrobním materiálům. Zvláště její tolik vyzdvihované elastické vlastnosti, jichž zatím žádný jiný materiál nedosáhl, způsobily její nepostradatelnost a oblibu v technické praxi, a to převážně tam kde jsou součásti namáhány staticky i dynamicky na tlak a smyk.

Tato diplomová práce se zabývá vlivem teploty a tvarů na mechanické namáhání pryžových výrobků, které jsou namáhány pouze statickým jednoosým tlakem.

Teoretická část se zabývá studiem pryže a pryžových výrobků. Například kdy byla pryž poprvé objevena, co to pryž je, jakým způsobem se vyrábí a recykluje. Je zde základní rozdělení pryže ze tří různých hledisek. Jsou zde popsány dva nejvyužívanější syntetické kaučuky SBR a NR, ze kterých se pryžové výrobky vyrábí a byly z nich také zhotoveny zkušební výrobky pro použití v praktické části. Popsány jsou i fyzikálně mechanické a tepelné vlastnosti pryže. Z fyzikálně mechanických vlastností je to především hyperelastická, pro kterou se pryž v technické praxi hojně využívá a jsou zde popsány i některé nejznámější hyperelastické modely. Je tu popsána také deformační zkouška v tlaku a byla provedena studie tvarového faktoru a tvarové funkce. Na závěr jsou v teoretické části popsány složené systémy, to jsou způsoby spojování pryže s jinými materiály, převážně s kovovými a konstrukční pryžové prvky – tlakové pružiny, jejich charakteristika a způsoby namáhání.

Úkolem praktické části bylo na začátku vyrobit v lisovací formě pryžové výrobky šesti různých tvarů o třech různých výškách. Jedná se o plný válec, plný hranol, válec s kruhovým a čtvercovým otvorem uprostřed, hranol s kruhovým a čtvercovým otvorem uprostřed. Výrobky byly zhotoveny ve školních dílnách. Potom byl spočítán tvarový faktor a tvarová funkce jednotlivých výrobků. V další části byl vytvořen nelineární model plného válce o dvou zvolených výškách v programu COSMOS a MSC. PATRAN, kde bylo simulováno zatížení tlakem. Následovala samotná deformační zkouška v tlaku, která byla provedena za okolní teploty a pak za zvýšených teplot v teplotní komoře Zwick. Deformační zkouška se prováděla na zkušebním stroji Zwick 1456. Je zde uvedeno srovnání jednotlivých naměřených grafických závislostí za vlivu teplot, tvarů a výšek jednotlivých výrobků. Na závěr jsou v praktické části srovnány výsledky modelu a naměřených hodnot a závislostí ze zkušebního stroje Zwick a jejich zhodnocení.

I. STUDIJNÍ ČÁST

1 PRYŽ

Pryž se stala v dnešní době nedílnou součástí našeho každodenního života. Málokdo si všimne, že pryžové výrobky jsou všude okolo nás, ať už to jsou pneumatiky, obuv, koupací čepice, manžety, těsnění, podlahoviny a mnoho dalších jiných předmětů uplatňujících se v nejrůznějších průmyslových odvětvích. Většina lidí zná pryž pod pojmem guma, a to kvůli jejím elastickým vlastnostem. Ale co to pryž ve skutečnosti je a jaká je definice pryže?

1.1 Definice pryže

Pryž je směs přírodního nebo syntetického kaučuku, či jejich kombinací, plniv, vulkanizačních činidel, urychlovačů vulkanizace, retardérů, pigmentů, změkčovadel a dalších přísad, která se získává vulkanizací (zesít'ováním), tj. působením tepla. [2]

1.2 Historie pryže

Pryž je vulkanizovaný kaučuk a přírodní kaučuk se poprvé do Evropy dostal před 200 lety. Jako technicky významný materiál se stal, ale až v polovině 19. století. Od té doby spotřeba kaučuku rostla a s tím i jeho možnosti využití.

Postupem času se začaly vyrábět i syntetické kaučuky. S rostoucí ekonomickou výhodností, rostla také spotřeba a použití syntetických kaučuků, které dnes tvoří převážně materiály na výrobu pryže, buď samostatně, nebo v kombinaci s přírodním kaučukem.

Pryžových výrobků se v dnešní době používá pro jejich výhodné vlastnosti ve velkém množství a skoro ve všech oborech. Vynikají velmi dobrými fyzikálně mechanickými vlastnostmi a to především elasticitou. Mezi další patří dobré elektroizolační vlastnosti, malá vodivost, nepropustnost plynů a chemická odolnost. Uplatnění pryže je mnohostranné a vyrábí se z ní dnes tisíce předmětů denní potřeby, které nemá cenu pro jejich množství zde uvádět. Jejich význam je nesmírný a není si možné bez nich představit dnešní způsob života společnosti.

2 VÝROBA PRYŽE

Výroba pryže začala už v 19. století a dnes se stala téměř nepostradatelnou součástí našeho života. Z kaučukových směsí se vyrábějí nejrůznější pryžové výrobky denní potřeby mající mnohostranné uplatnění, dlouhou životnost a jsou bezúdržbové.

2.1 Skladba směsi

Směs obsahuje většinou tyto základní složky:

1. Elastomer (přírodní nebo syntetický kaučuk, popř. regenerát),
2. Vulkanizační činidlo (síra, peroxidy, kysličníky kovů, reaktivní pryskyřice),
3. Urychlovač vulkanizace (nebo směs urychlovačů),
4. Aktivátor vulkanizace,
5. Ochranné látky proti stárnutí a únavě (tzv. antioxidanty),
6. Plniva (aktivní nebo neaktivní),
7. Změkčovadla.

Potom může ještě obsahovat pigmenty a nějaké zvláštní přísady. [2]

2.1.1 Elastomer

Základní složkou směsi je kaučuk, který dává pryži základní charakteristické vlastnosti. Dnes je možno volit z velkého počtu typů a druhů kaučuků a jejich kombinací. Jako další doplněk kaučuku v základní směsi může být regenerát. Jeho přítomnost má vliv na zpracovatelnost směsi, jako snadnější a kratší míchání, dobré tváření např. při lisování a je ekonomicky výhodný. [2]

2.1.2 Vulkanizační činidlo

Vulkanizaci a její stav umožňují vulkanizačního činidla. Mezi nejčastěji používané vulkanizační činidla patří síra, ale pro některé speciální kaučuky to mohou být i jiné, jako peroxidy, kysličníky kovů, reaktivní pryskyřice apod. [2]

2.1.3 Urychlovače vulkanizace

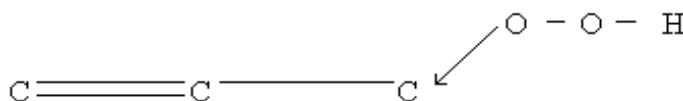
Naopak průběh a stupeň vulkanizace a do nemalé míry i mechanické vlastnosti pryže ovlivňují urychlovače. Dělí se na pomalé (guanidiny – tvrdá a potravinářská pryž), rychlé (thiazoly – technická pryž), velmi rychlé (thiuramy - pryž odolná proti zvýšeným teplotám) a ultraurychlovače (převážně latex a samovulkanizující roztoky). [2]

2.1.4 Aktivátory vulkanizace

Aby se plně využilo vulkanizačního činidla a urychlovače je nutná přítomnost aktivátoru, který je součástí vulkanizačního systému. Převážně se používá ve většině směsí jako aktivátor kysličník zinečnatý a organickou kyselinu, kvůli rozpustnosti zinku. [2]

2.1.5 Antioxidanty

Antioxidanty se přidávají do směsi, protože chrání a činí trvanlivějšími některé vlastnosti dané základními složkami. Chrání pryž proti přirozenému stárnutí a vnějšími vlivy (světlo, teplo, mechanické namáhání). Antioxidanty, se volí, podle toho proti jakým vlivům má být pryž chráněna, jako opakované deformace, povětrnostní vlivy, teplo, přirozenému stárnutí, proti ozónu, apod. Mezi nejdůležitější antioxidanty patří aminy a jejich deriváty. [2]



Obr. 1. Průběh oxidace

2.1.6 Změkčovadla

Změkčovadla (estery, asfalty, pryskyřice, smoly, uhlovodíková) se přidávají kvůli snadnějšímu zpracování pryže před vulkanizací. Jedná se o plasticitu, tvarovatelnost a lepi-vost. Změkčovadla pronikají mezi makromolekuly kaučuku, zvětšují jejich průměrnou vzdálenost, zmenšují jejich propletení, omezují vnitřní tření mezi molekulami a tak usnadňují přeskupování hmoty. Pryž lze pak třeba deformovat menší silou, je méně tuhá, má nižší teplotu křehnutí apod., ale při větším množství změkčovadla se zhoršují její mecha-nické vlastnosti (pevnost, opotřebení). Změkčovadla se volí podle chemické povahy a mo-lekulové hmotnosti. [2]

2.1.7 Plniva

Plniva (kaolin, křída, saze, křemičitany) rozdělujeme do dvou skupin, a to na aktivní (ztužovadla), které zlepšují některé mechanické vlastnosti a neaktivní. Plnivo se přidává do směsi ve větším množství a většinou v podobě prášku a mění skoro všechny vlastnosti pryže, jako je hustota, tvrdost, modul, elasticita, pevnost, tažnost apod. [2]

2.1.8 Pigmenty

Pigmenty se používají na vybarvení pryží. Bílý základní pigment je litopon, titanová či zinková běloba a k vybarvování se používá vulkánových barviv. [2]

2.2 Míchání směsi

Jeden z nejdůležitějších základních procesů v gumárenské technologii je míchání. Účelem míchání je zajistit co nejstejnější rozptýlení (disperzi) každé ze složek v kaučukové směsi, která plní svůj specifický úkol. Důležitým faktorem ovlivňujícím disperzi je stupeň plasticity a mezi další faktory patří postup míchání (přidávání složek do směsi v několika krocích) a použité strojní zařízení. Způsob míchání, doba a teplota míchání, doba odležení, způsob přepracování směsi, použité strojní zařízení (dvouválce, hnětací stroje), mají taky určitý vliv na celkovou disperzi složek ve směsi. [2]

2.3 Plastikace

Plastikací nazýváme postup, při němž se plasticita kaučuku zvýší na hodnotu nutnou pro míchání a další zpracování směsi. Je to schopnost materiálu podržet si tvar, který mu byl udělen deformací, i po odstranění deformační síly. Naopak nadměrnou plastikací se zhoršují mechanické vlastnosti vulkanizátu. Plastikace se nejčastěji provádí na dvouválcích nebo hnětacích strojích. Různé druhy kaučuků se plastikují při různých teplotách (za tepla nebo za studena). [2]

2.4 Vulkanizace

Jako poslední z technologického postupu při výrobě pryže je vulkanizace. Při níž se vytvářejí pevné chemické vazby mezi jednotlivými řetězovými molekulami kaučuku pomocí vulkanizačního činidla. Optimální hustotu síťové struktury zajišťují dva parametry na sobě nepřímo závislé a to je čas a teplota, která má vliv na rychlost vulkanizace a jakost výrobku a jejich vzájemný vztah vyjadřuje tzv. teplotní koeficient vulkanizace.

Jedním z hlavních činitelů ovlivňujících produktivitu výroby pryže je rychlost vulkanizace. Ta se řídí stejnými zákonitostmi jako ostatní chemické reakce a ovlivňována je pouze vlastní síťovací reakcí. Při síťovací reakci nastává pokles koncentrace vulkanizačního činidla a současně rychlé vytváření příčných vazeb.[2]

2.5 Vulkanizační optimum

S rostoucí dobou vulkanizace, při stejné teplotě se zvětšuje počet vazeb síry s kaučukem a zesíťování makromolekulárních řetězců kaučuku. Současně s tím se mění také mechanické vlastnosti pryže. Obvykle se sledují tyto změny mechanických vlastností podle časových úseků vulkanizace – vulkanizačních stupňů. Například pevnost v tahu se zvětšuje a dosahuje v určité době maxima. Při delší vulkanizační době opět klesá. Vyhodnocení vulkanizace je možno použít i jiné mechanické vlastnosti, jako je tvrdost, elasticita apod.

K vyhodnocení vulkanizačního optima se používá, tzv. postupné vulkanizace. Získávají se tak vzorky vulkanizované při určité teplotě a v prodlužujících se časových úsecích. Zhotoví se tělíska a ty se podrobují mechanickým zkouškám. Pak je tedy možno vyhodnotit vulkanizační optimum podle maximálních hodnot těchto zkoušek. Stanovení vulkanizačního optima má velký význam, protože všechny mechanické zkoušky pryže, by se měli provádět na zkušebních tělesech vulkanizovaných do optima.[9]

3 REGENERACE PRYŽE

S výrobou pryže se projevila snaha i o využití staré a odpadové pryže. Byla vyvinuta řada regeneračních postupů zpracovávajících starou pryž na regenerát. Kde při regeneraci se pouze stará pryž stává znovu zpracovatelnou a vulkanizovatelnou, ovšem s horšími vlastnostmi než u výchozího kaučuku.

3.1 Podstata regenerace

Regenerace je pochod, při kterém se stará pryž nebo vulkanizovaný odpad převádí působením mechanické a tepelné energie do stavu, v němž se může znovu mísit, zpracovávat a vulkanizovat. Podstatou regenerace je destrukce, při které dochází k trhání sítě, zkracování řetězců, kdy vznikají nové dvojné vazby, podporující opětovnou vulkanizaci.

3.2 Výroba regenerátu

Výroba regenerátu se skládá z těchto základních pochodů:

1. Úprava staré pryže k regeneraci

Základní surovina je měkká pryž všeho druhu, která se dělí do několika kategorií, jako pryž bez textilu, málo plněná pryž (pryžový odpad), dále pneumatiky všeho druhu a nakonec pryž s velkým obsahem textilu a plniv (klínové řemeny, obuv, hadice, dopravní pásy).

2. Vlastní regenerační pochody

Většina regeneračních metod vyžaduje, aby odpadní pryž byla před samotnou regenerací rozdrčena na velmi malé částice. Rozeznáváme tyto tři základní způsoby regenerace, a to parní (změkčování pryže párou), vařákový (pryžový drť v kapalném prostředí pod tlakem a s přímou nebo nepřímou párou) a mechanický (práce ve velmi krátkých intervalech).

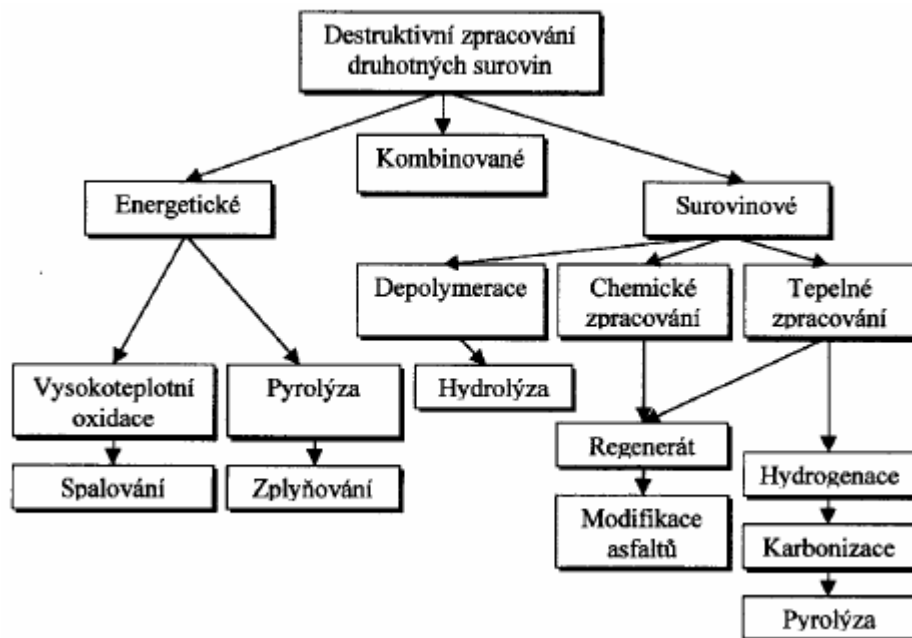
3. Zjemňování

Jedná se o konečnou úpravu, která se skládá z těchto kroků:

- homogenizace a mísení,
- předběžné zjemňování,
- čištění,
- konečné zjemňování.

3.3 Použití regenerátu

Použití regenerátu je velmi rozsáhlé a stejně tak jako řada směsí, do kterých se regenerát přidávat nemůže. V malé míře se používá do pneumatik pro osobní auta (bočnicová a běhounová směs, kostry radiálních a diagonálních pneumatik) a ve velkém množství se používá na různé spotřebitelské zboží jako je obuv, hadice, dopravní pásy, podlahoviny, těsnění a další.



Obr. 2. Destructivní zpracování pryžového odpadu

4 ROZDĚLENÍ PRYŽE

Rozdělit pryž podle jednotlivých kategorií jednoznačně nelze. Proto jsem zde pryž rozdělil na tyto tři kategorie. Podle druhu kaučuku, z něhož se vyrábí pryžové výrobky, podle množství vázané síry a podle průmyslového odvětví, ve kterém se vyrábí většina pryžových výrobků.

4.1 Podle použití kaučuku na pryžové výrobky

Dnes je možno volit z velkého počtu typů kaučuků na výrobu pryže. Syntetický kaučuk doplnil a v některých případech i nahradil kaučuk přírodní a to z důvodů technických i ekonomických. V dnešní době se pryžové výrobky dělají převážně ze syntetických kaučuků. Jsou zde uvedeny jen některé nejpoužívanější kaučuky.

4.1.1 Přírodní kaučuky a příklady použití

- *Air Dried Sheet* (SUŠENÝ NA VZDUHU: bílé bočnice, transparentní a chirurgická pryž, nafukovací hračky, máčené zboží, nátěry),
- *RSS 1 a 2* (UZENÝ: koupací čepice, náročná technická a tvrdá pryž, pneumatiky, světlá obuv),
- *RSS 3* (UZENÝ: pneumatiky, obuv),
- *Brown Crepe* (HNĚDÁ KREPA: technická pryž),
- *Blanket Crepe* (SVĚTLÁ KREPA: pneumatiky obuv) a další.

4.1.2 Syntetické kaučuky a příklady použití

- *SBR* (butadienstyrenový: pneumatiky, transportní pásy, technická pryž, kabely, manžety, hračky apod.),
- *IR* (isoprenový: technická pryž, obuv, pryžové výrobky používané v lékařství a v potravinářství apod.),
- *BR* (butadienový: pneumatiky, obuv, dopravní pásy, golfové míčky apod.),
- *NBR* (butadienakrylonitrilový: hnací řemeny, tlumící elementy, teplovzdorná a tvrdá pryž, ucpávky, těsnění, hadice apod.),

- IIR (isobutylenisoprenový: technická pryž, tlumiče, hadice, pružná uložení, vulkanizační membrány apod.) a další.

4.2 Podle množství vázané síry

Reakcí se sírou, 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 kaučuku či směsi. Na velikosti těchto změn má i vliv hmotnostní množství síry vázané na 100 hmotnostních dílů kaučuku, tzv. součinitel vulkanizace. [3]

4.2.1 Měkká pryž

Zahrnuje většinu výrobků gumárenského průmyslu (pneumatiky, dopravní pásy, řemeny, hadice, obuv atd.). Vulkanizační koeficient se pohybuje převážně mezi 2 až 3% vázané síry. Vlastnosti vulkanizátu se mění podle složení směsi. Elastické vlastnosti jsou vysoké stejně jako odolnost proti oděru a dynamickému namáhání. [3]

4.2.2 Polotvrdá pryž

Vulkanizační koeficient se u polotvrdé pryže pohybuje od 4 až do 25% vázané síry. Vulkanizáty mají špatné mechanické vlastnosti. S rostoucí tvrdostí klesá tažnost a elasticita. Uplatnění v praxi je pro tyto nevýhodné vlastnosti velmi malé. [3]

4.2.3 Tvrdá pryž

Vulkanizační koeficient se pohybuje nad 25% vázané síry, kde jeho mezní obsah je dán druhem použitého kaučuku. Vulkanizáty se vyznačují rohovitou konzistencí a na stanovení tvrdosti se používají přístroje stejné jako v metalurgii. Pevnost v tahu je zde podstatně vyšší než u měkké pryže, ale tažnost je minimální. Největší nevýhodou výrobků (desky, tyče, trubky, válce atd.) z tvrdé pryže je odolnost proti vyšší teplotě. [3]

4.3 Podle průmyslového odvětví na výrobu pryžových výrobků

Pryž patří v dnešní době k hojně používaným materiálům a to v různých odvětvích výroby. Z pryže se vyrábějí nejrůznější výrobky pro denní potřebu. Zde jsou uvedeny, asi tři největší základní odvětví, kde se pryž hojně vyrábí a používá, patří sem:

- *Automobilový průmysl* (pneumatiky osobních a nákladních automobilů, těsnící prvky, hadice, tlumící prvky-silentbloky, gufera a další),
- *Gumárenský průmysl* (nafukovací čluny, matrace, podušky, pláštěnky, oprýžovaný textil a další.),
- *Obuvnický průmysl* (gumové holínky, protiskluzové návleky, podešve, lezecké boty a další).



Obr. 3. Ukázka výrobků z pryže (hadice, hardy spojky, podlahovina, houby, těsnící kroužky)

5 SYNTETICKÉ KAUKČUKY

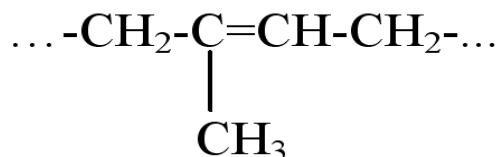
Některé syntetické kaučuky patří do skupiny pro všeobecné účely. To znamená, že svými zpracovatelskými a mechanickými vlastnostmi splňují požadavky hlavních aplikačních oblastí. Zde patří především polymery a kopolymery butadienu, isoprenu a styrenu (SBR, NR, BR, IR). Jedním z nejpoužívanějších syntetických kaučuků pro výrobu vulkanizátu je právě SBR, který se v kombinaci z NR kaučukem používá na bočnicové směsi v pneumatikářském průmyslu.

5.1 NR – Přírodní isoprenový kaučuk

Jedná se o syntetický kaučuk, nazývá se též natural rubber, který má s přírodním kaučukem obdobnou chemickou stavbu a fyzikální vlastnosti. Průmyslově vyráběné isopreny jsou schopny nahradit přírodní kaučuk jen s úpravou receptury. S použitím stereospecifických katalyzátorů se podařilo připravit syntetické isopreny s velkým obsahem struktury cis-1,4, které se ze všech průmyslově vyráběných kaučuků se nejvíce blíží přírodnímu kaučuku. [1]

5.1.1 Výroba NR

K průmyslové výrobě isoprenových kaučuků se používají dva druhy iniciačních systémů. Patří sem komplexní katalyzátory Zieglerova typu a alkyllithiové katalyzátory. Polymerace se provádí roztočovým způsobem a je v zásadě stejná jako roztočová polymerace SBR kaučuku. A také se používá emulzní radikálová a iontová polymerace. [1]



Obr. 4. Struktura řetězce NR

5.1.2 Vlastnosti NR

Syntetické isopreny mají menší lepivost než přírodní kaučuk a jejich nevulkanizované směsi mají menší pevnost, která se dá ovšem zvýšit úpravou receptury. Isoprenové pryže mají obecně nižší moduly a větší tažnost než přírodní kaučuk ve stejných směsích. Dále mají výborné hysterézní vlastnosti, větší odrazovou pružnost, naopak jejich odolnost proti opotřebení je menší. [1]

5.1.3 Použití NR

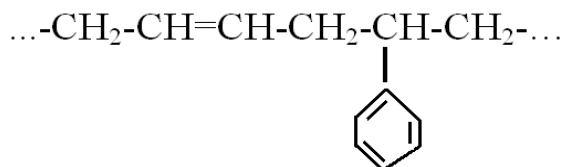
Největší část se používá na výrobu pneumatik. Další použití jako technické pryž, na obuv, na výrobky používané v lékařství a ve styku s potravinami. [1]

5.2 SBR – Butadienstyrenový kaučuk

Mezi nejdůležitější druhy syntetických kaučuků patří kaučuky butadienstyrenové. Jehož největším spotřebitelem je pneumatikářský průmysl. Byl vyvinut k doplnění a náhradě přírodního kaučuku. U nás je znám pod obchodním názvem Kralex. [1]

5.2.1 Výroba SBR

Výroba SBR kaučuku začala už před druhou světovou válkou. Byla umožněna zvládnutím emulzní polymerace. Výroba začala v Německu a následně se zavedla i v USA. V pozdějších letech se začal SBR vyrábět i pomocí roztokové polymerace. Tato metoda vedla k získání celé palety různých polymerů.[1]



Obr. 5. Struktura řetězce SBR

5.2.1.1 Výroba emulzního SBR

Emulzní kopolymerace butadienu se styrenem probíhá radikálovým mechanismem. Radikál vzniklý rozpadem iniciátoru pronikne do micely, sloučí se s monomerem a zahájí růst polymeračního řetězce. Monomery se emulgují ve vodném prostředí a kaučuk vzniká ve formě latexu, tedy ve stejné formě, v jaké se získává kaučuk přírodní. Hlavní předností emulzní polymerace je rychlé odvádění polymeračního tepla vodným prostředím malé viskozity, což usnadňuje udržování teploty. Reakce je dostatečně rychlá, dobře ovladatelná a lze jí snadno zastavit. [1]

5.2.1.2 Výroba roztokových SBR

Tyto typy se vyrábějí převážně s použitím alkyllithiových (butyllithium – při polymeraci chybí terminační mechanismus) a v malé míře i alfinových katalyzátorů. Aby se dosáhlo kaučukovitých vlastností, musí se potlačit tendence k blokové polymeraci a to pomocí přidání malého množství různých modifikačních činidel, jako jsou ethery, fosforitany anebo sulfidy, která mají i vliv na mikrostrukturu v řetězci. Jinou metodou na potlačení vzniku bloků, je kontinuální dávkování monomerů do reakční směsi. Kde rychlost přidávání monomerů musí být menší než rychlost polymerace. Polymerační systém je složený z monomerů, alkyllithiového katalyzátoru a alifatického rozpouštědla. [1]

5.2.1.3 Vulkanizace SBR

Všechny typy butadienstyrenového kaučuku vulkanizují účinkem stejných vulkanizačních činidel jako přírodní kaučuk. Síry se běžně přidává menší množství (vyšší odolnost proti stárnutí) než u přírodního kaučuku, oproti tomu dávkování urychlovačů je trošku vyšší. Při vulkanizaci SBR kaučuku nedochází k reverzi (ztráta pevnosti v tahu). [1]

5.2.2 Vlastnosti SBR

Moderní typy SBR se snadno míchají a vytlačují, nevýhodou je menší konfekční lepidlost. Emulzní SBR, lépe odolávají opotřebením a pomaleji stárnou, jsou odolnější proti vzniku trhlin a proti únavě při opakovaných malých deformacích. Mezi nevýhody patří menší strukturální pevnost, horší dynamické vlastnosti (odrazová pružnost). U roztočových typů SBR se vlastnosti mění s obsahem fenylových a vinylových substituentů na základním řetězci. [1]

5.2.3 Použití SBR

Největší spotřeba je v pneumatikářském průmyslu. Další aplikace jsou lisované a vytlačované technické výrobky, obuv, lehčené výrobky, hadice, izolace kabelů, dopravní pásy atd. [1]



Obr. 6. Pryžokovové výrobky – silentbloky

6 VLASTNOSTI PRYŽE

Vlastnosti vulkanizovaných kaučuků (pryže) jsou do značné míry určeny vlastnostmi polymerů, ze kterých jsou vyrobeny. Závisí na chemické konstituci a geometrické stavbě polymerních řetězců. Jsou zde uvedeny a popsány některé z vlastností pryže, a to fyzikálně - mechanické a tepelné.

6.1 Fyzikálně – mechanické vlastnosti

Žádný jiný materiál ještě nedosáhl takových elastických vlastností, jako má právě pryž a to způsobuje její nepostradatelnost v technické praxi. Díky těmto vlastnostem se pryži téměř žádný materiál nevyrovná.

Mechanické vlastnosti pryže závisí především na povaze kaučuku a jeho síťové hustotě. Pryž má menší trvalou deformaci, čím pevnější jsou příčné vazby. Mechanické chování pryže je dále závislé na teplotě. Při nízkých teplotách tuhost materiálu výrazně roste a může se přiblížit vlastnostem kovů. Při vysokých teplotách naopak dochází k velkému poklesu tuhosti. [2]

6.1.1 Elasticita

Elastická tělesa se účinkem vnější síly deformují (mění svůj tvar a objem) a přestane-li síla působit, vrací se do svého původního tvaru. Elasticita je tedy schopnost látek se deformovat vratně. [2]

6.1.2 Hyperelasticita

Eleastomery a tedy i pryže se vyznačují některými charakteristickými rysy, kterými se výrazně odlišují od většiny ostatních materiálů (ideálně elastických). Souhrn těchto vlastností je často označován jako hyperelasticita a tyto materiály pak považujeme za hyperelastické. Hlavními znaky hyperelasticity jsou:

1. Dosažitelné elastické (vratné) 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 silně nelineární. Tvar této závislosti má zpravidla charakteristický esovitý průběh.

3. Materiál se deformuje již účinkem malých sil. Poměr napětí a deformace v oblasti malých deformací je asi desettisíckrát menší než u ideálně elastických látek.
4. Objemová tuhost většiny elastomerů je velmi vysoká. Objemový modul pružnosti dosahuje hodnot řádově stovek až tisíců MPa, a s uvážením předchozího bodu (tj. malého poměru napětí k deformaci) se pak Poissonův poměr ν blíží hodnotě 0,5 (v závislosti na obsahu plniv). To znamená, že většinu těchto materiálů lze považovat za objemově nestlačitelné. [2]

6.1.3 Hyperelastické modely

Část hyperelastických modelů je založena na mikromechanických modelech vnitřní struktury elastomerů (např. *Neo-Hookean*, *Arruda-Boyce*). Materiálové konstanty v těchto modelech mají jednoznačný fyzikální význam. Další skupina modelů byla navržena pouze na základě pozorování deformačně napěťového chování elastomerů na makroskopické úrovni tak, aby model co nejlépe aproximoval toto pozorování. Takové modely (např. *Polynomický*, *Mooney-Rivlin*, *Ogden*, *Yeoh*, *Gent*) jsou nazývány fenomenologické a jejich materiálové konstanty často nemají konkrétní fyzikální význam. [2]

Dnes používané hyperelastické modely obecně formulují vztah pro hustotu deformačního potenciálu ve tvaru:

$$W = W(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3 \{M\}) \quad (1)$$

kde I_i jsou invarianty pravého Cauchy-Greenova tenzoru deformace, λ_i jsou hlavní protažení a $\{M\}$ je množina materiálových konstant.

Protažení λ_i je poměrem deformované délky l_i ve směru osy i ku původní délce l_{0i} .

$$\lambda_i = \frac{l_i}{l_{0i}} \quad (2)$$

Deformační invarianty I_i jsou definovány vztahy:

$$\begin{aligned} I_1 &= \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2 \\ I_2 &= \lambda_1^2 \lambda_2^2 + \lambda_2^2 \lambda_3^2 + \lambda_3^2 \lambda_1^2 \\ I_3 &= \lambda_1^2 \lambda_2^2 \lambda_3^2 \end{aligned} \quad (3)$$

Pro nestlačitelné materiály je invariant $I_3 = 1$.

Pokud známe funkci W , můžeme napětí vypočítat jako derivaci této funkce podle příslušné složky deformace.

$$S_{ij} = 2 \frac{\partial W}{\partial C_{ij}} \quad (4)$$

kde S_{ij} jsou složky 2. Piola-Kirchhoffova tenzoru napětí a C_{ij} jsou složky pravého Cauchy-Greenova deformačního tenzoru.

Pokud je souřadný systém zvolen tak, že je shodný s hlavními směry deformace, pak je pravý Cauchy-Greenův deformační tenzor definován takto:

$$[C] = \begin{bmatrix} \lambda_1^2 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_2^2 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_3^2 \end{bmatrix} \quad (5)$$

Z rovnice 4 lze tedy odvodit vztah pro složky Cauchyova tenzoru napětí (skutečné napětí).

$$\sigma_{ij} = -p \delta_{ij} + 2 \frac{\partial W}{\partial I_1} C_{ij} - 2 \frac{\partial W}{\partial I_2} C_{ij}^{-1} \quad (6)$$

kde p je nespécifikovaný tlak a δ_{ij} je Kronekerovo delta, pro které platí ($\delta_{ij} = 1, i = j; \delta_{ij} = 0, i \neq j$) [2]

6.1.4 Přehled hyperelastických modelů

Hyperelastické modely mají každý jinak definovanou funkci hustoty deformační energie, která se značí W . Jsou zde uvedeny některé dnes nejpoužívanější tvary funkce W , které jsou povětšinou pojmenovány po svých autorech.

6.1.4.1 Neo-Hookean

Model *Neo-Hookean* patří k nejstarším a nejjednodušším modelům. Je možné ho brát, jako podmnožinu *polynomické* formy pro $N = 1$, $c_{0I} = 0$, $c_{10} = \mu / 2$. Vychází z termodynamických principů a ze statistického přístupu k modelování vnitřní struktury elastomerů. Model není schopen věrohodně postihnout závěrečnou vyztužovací fázi napěťově deformační odezvy elastomerů. Dále model vykazuje lineární chování při smykové deformaci.

$$W = \frac{\mu}{2}(I_1 - 3) \quad (7)$$

kde μ je počáteční smykový modul.

$$\mu = nkT \quad (8)$$

kde n je počet polymerních řetězců v jednotkovém objemu, k je Boltzmanova konstanta a T je absolutní teplota. Model je použitelný pro deformaci do 40 % v jednoosém namáhání. [2]

6.1.4.2 Mooney-Rivlin

Ve čtyřicátých letech 20. stol. Mooney navrhl fenomenologický model se dvěma parametry založenými na předpokladu lineárního vztahu mezi zatížením a smykem během jednoduché smykové deformace. V padesátých letech Rivlin modifikoval Mooneyho model, aby obdržel obecné vyjádření funkce deformační energie vyjádřené pomocí deformačních invariantů.

Používají se dvou, tří, pěti a devíti-parametrové *Mooney-Rivlin* modely, které také můžeme považovat za speciální případy *polynomické* formy.

- Dvou-parametrový model je jeden z nejvíce používaných modelů. Je ekvivalentní *polynomické* formě s $N = 1$:

$$W = c_{10}(I_1 - 3) + c_{01}(I_2 - 3) \quad (9)$$

kde c_{10} , c_{01} jsou materiálové konstanty.

- Tří-parametrový model je shodný s *polynomickou* formou pro $N = 2$ a $c_{20} = c_{02} = 0$

$$W = c_{10}(I_1 - 3) + c_{01}(I_2 - 3) + c_{11}(I_1 - 3)(I_2 - 3) \quad (10)$$

de c_{10} , c_{01} , c_{11} jsou materiálové konstanty.

- Pěti-parametrový model je shodný s *polynomickou* formou pro $N = 2$:

$$W = c_{10}(I_1 - 3) + c_{01}(I_2 - 3) + c_{20}(I_1 - 3)^2 + c_{11}(I_1 - 3)(I_2 - 3) + c_{02}(I_2 - 3)^2 \quad (11)$$

kde c_{10} , c_{01} , c_{11} , c_{20} , c_{02} jsou materiálové konstanty.

- Devíti-parametrový model je shodný s *polynomickou* formou pro $N = 3$:

$$\begin{aligned} W = & c_{10}(I_1 - 3) + c_{01}(I_2 - 3) \\ & + c_{20}(I_1 - 3)^2 + c_{11}(I_1 - 3)(I_2 - 3) + c_{02}(I_2 - 3)^2 \\ & + c_{30}(I_1 - 3)^3 + c_{21}(I_1 - 3)^2(I_2 - 3) + c_{12}(I_1 - 3)(I_2 - 3)^2 + c_{03}(I_2 - 3)^3 \end{aligned} \quad (12)$$

kde c_{10} , c_{01} , c_{11} , c_{20} , c_{02} , c_{30} , c_{21} , c_{12} , c_{03} jsou materiálové konstanty.

Dvou-parametrový model je využíván do 90-100 % tahové deformace, ale nemusí být dobře charakterizováno chování materiálu při stlačení. Pěti nebo devíti-parametrové modely mohou být používány pro deformace až do 300 %.[2]

6.1.4.3 Ogden

Ogden navrhl funkci vyjádřenou v hodnotách hlavních protažení. Tento model je dnes široce používaný a poměrně dobře vystihuje chování elastomerů i při velkých deformacích.

$$W = \sum_{i=1}^N \frac{\mu_i}{\alpha_i} (\lambda_1^{\alpha_i} + \lambda_2^{\alpha_i} + \lambda_3^{\alpha_i}) \quad (13)$$

kde μ_i a α_i jsou materiálové konstanty bez konkrétního fyzikálního významu (μ_i mají však obecně význam počáteční tuhosti). Za N se dosazují hodnoty od jedné do nekonečna, ale obvykle není hodnota N vyšší než 3.

Pro $N = 1$ a $\alpha_i = 2$ se Ogden stává ekvivalentní k modelu *Neo-Hookean*. Pro $N = 2$, $\alpha_i = 2$ a $\alpha_i = -2$ *Ogden* přechází na dvou-parametrový Mooney-Rivlin model. *Ogden* může být obecně aplikován pro deformaci do 700 %.[2]

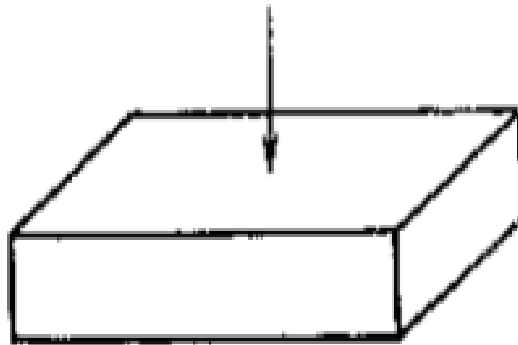
6.1.5 Deformační zkoušky

Fyzikálně – mechanické vlastnosti se zkouší pomocí deformačních zkoušek, protože, pryž bývá namáhána v praxi různými způsoby, např. ve smyku, v ohybu, v krutu apod., ale mezi nejdůležitější namáhání pryže patří smykové a tlakové, protože tlakové deformace jsou v praxi četnější než například tahové. Samozřejmě v praxi není pryž namáhána jen statickými silami, ale především silami dynamickými, kde na porušení výrobku stačí větší síly daleko menší než kritické anebo jsou pryžové výrobky namáhány kombinací statických a dynamických sil.

6.1.5.1 Deformace v tlaku

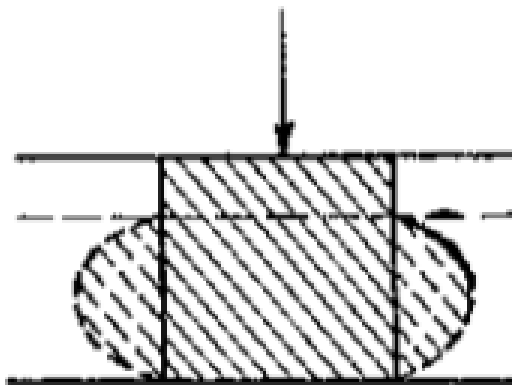
U pryže není závislost napětí na stlačení lineární. Při stanovení této závislosti je nutno rozlišovat dva mezní případy:

1. Zatěžované plochy zkušebního tělesa mají možnost skluzu po dosedací ploše, kdy při vhodné lubrikaci ploch je tření zanedbatelné. Průřez zkušebního tělesa se rovnoměrně zvětšuje se stlačením.



Obr. 7. Homogenní deformace

2. Zatěžované plochy jsou fixovány k dosedací ploše, čímž se zvětšuje odpor k dosedací ploše (z válečku soudek). Naměřené napětí je obecně při daném stlačení větší než v prvním případě a stejně tak je větší i modul pružnosti, než v prvním případě. Přičemž o poměru obou modulů rozhoduje tvarový faktor f . [2]



Obr. 8. Nehomogenní deformace

Z konstrukčního hlediska se jeví jako nejdůležitější modul pružnosti v tlaku E , který značí tlakové napětí způsobující jednotkovou pružnou deformaci. Předpokládá-li se platnost Hookeova zákona pro pružnou fázi deformace, je modul pružnosti konstantou úměrnosti mezi napětím a poměrným stlačením (platí pro velmi malá stlačení).

6.1.5.2 Měrné tlakové zatížení a poměrné stlačení

Měrné zatížení F při statické deformační tlakové zkoušce, je zatížení vztažené na počáteční průřez zkušební tělesa při daném stlačení.

$$\sigma = \frac{F}{S} \quad (14)$$

A poměrné stlačení ε se vypočítá podle vzorce:

$$\varepsilon = \frac{h - h_0}{h_0} \quad (15)$$

6.1.5.3 Pevnost v tlaku

Pevnost v tlaku σ je největší zatížení, které zkušební těleso snese při tlakové zkoušce, vztažené na původní průřez tělesa. Pevnost tlaku se vypočítá podle vzorce:

$$\sigma = \frac{F}{S} \quad (16)$$

6.1.5.4 Trvalá deformace v tlaku

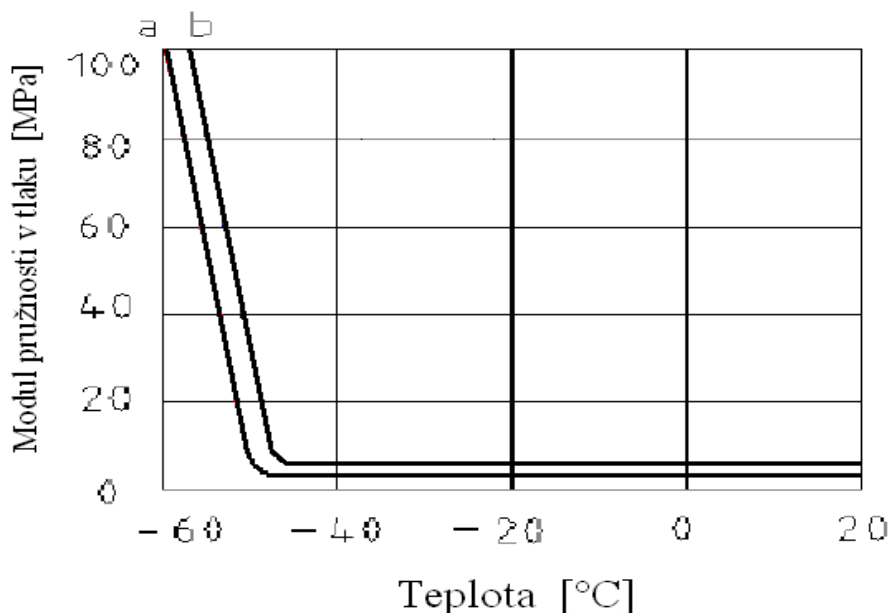
Trvalá deformace pryže v tlaku je změna výšky zkušební tělesa v procentech použité deformace. Zkušební těleso tvaru válce o výšce h_0 se vloží mezi paralelní plochy stlačovacího zařízení a zatíží se zvolenou deformací ($h_0 - v$) a těleso se po předepsanou dobu temperuje při stanovené teplotě. Po skončení zahřívacího cyklu se vyjmuté těleso ochladí na teplotu okolí a změří se jeho výška h . Potom, se trvalá deformace vypočte ze vztahu:

$$E = 100 \cdot \frac{h_0 - h}{h_0 - v} \quad (17)$$

Rozlišuje se trvalá deformace v tlaku za konstantního zatížení anebo trvalá deformace v tlaku za konstantního stlačení. U pryže, která je namáhána, je nutno přihlídnout i k vlivu času. Pryž na namáhání reaguje deformací, a to jak elastickou tak i plastickou. Elastická deformace po uvolnění vymizí. Rozeznáváme podle časového průběhu deformace ideálně elastické (dokonale vratné - časově nezávislé - okamžitá) a viskoelastické (vratná - časově závislá - zpožděná). Plastická deformace je deformace časově závislá a dokonale nevratná. Trvalá deformace nevymizí ani po dlouhé době. Dá se zrušit pouze přívodem energie do dílce. [10]

6.1.5.5 Modul pružnosti v tlaku

V gumárenství rozumíme pod pojmem „modul“ poměrné napětí, při kterém dosáhneme určitého předem zvoleného prodloužení zkušebního tělesa. Jestliže se omezíme jen na elastické deformace, užíváme pouze smluvního modulu pružnosti v tlaku $E = (3 - 7)G$. Kde pro modul pružnosti platí úměrnost, tj. že napětí je úměrné poměrné deformaci, kde konstantou úměrnosti je modul pružnosti. Na obr. 9. je znázorněna závislost modulu pružnosti na teplotě a vyplývá z něj, že i pro jiný materiál je stejný. [10]



Obr. 9. Modul pružnosti v tlaku v závislosti na teplotě pro

pryž s kaučuky a – NR, b - SBR

Modul zjištění při tlakovém namáhání na dílcích z pryžových výrobků není vlastně materiálovou konstantou, protože je kromě závislosti na teplotě silně závislý i na tvaru tělesa. Přitom musí být při tlakovém namáhání splněna důležitá podmínka, a to aby pryžové těleso mělo možnost deformace do stran. Je-li tato podmínka porušena, jde o prostorově uzavřené těleso, bez možnosti deformace do stran, pak zjišťujeme modul objemové pružnosti, který se označuje K . [10]

Pryže (vyjma vysoce plněných směsí) vykazují Poissonův poměr blížíící se hodnotě 0,5. Pro $\nu = 0,5$ by však teoreticky vzrůstal objemový modul pružnosti nade všechny meze – materiál by byl objemově nestlačitelný. Prakticky se sice hodnoty K elastomerů pohybují řádově v tisících, ale hodnoty modulu pružnosti E pouze v jednotkách. [6]

6.1.5.6 Tvarový faktor

Tvarový faktor je poměr zatížené plochy dílce k volné ploše tohoto dílce (neplatí pro složité tvary). Tvarový faktor má tedy velikost nula pro tenké, nekonečně dlouhé elastomerní vlákno zatížené v ose. Tvarový faktor má velikost ∞ pro nekonečně tenkou desku nekonečně rozlehlou, zatíženou kolmo na povrch. Vždy však musí být postaráno o to, aby elastomerní materiál neměl ve styčných plochách možnost pohybu (teda aby byl navulkánizován na podložku nebo jinak uchycen). [10]

Tvarový faktor f , závisí na tvaru zkušebního tělesa, tj. na poměru strany a výšky. Závisí též do jisté míry i na modulu pružnosti pryže. [10]

Při řešení tvarového faktoru se vychází ze dvou základních vzorečků pro výpočet napětí. Kde F je zatěžující síla, S je plocha, na kterou působí síla F , f je tvarový faktor, E je modul pružnosti v tlaku a ε je deformace zatížení.

$$\sigma = \frac{F}{f.S} \quad (18)$$

$$\sigma = f.E.\varepsilon \quad (19)$$

6.2 Tepelné vlastnosti

Tepelné vlastnosti obecně jsou určovány především samotnou strukturou materiálu. Nejlepší odolnost proti zvýšeným teplotám nemají pryže, které obsahují jako vulkanizační činidlo síru, ale pryže vulkanizované takovými činidly, které dávají nejpevnější příčné vazby, jako vazby uhlík – uhlík. [2]

6.2.1 Závislost modulu pružnosti na teplotě

Závislost modulu pružnosti na teplotě je možné rozdělit na tři charakteristické oblasti:

1. *Oblast kaučukovitá:* pryž tu má malý modul pružnosti ve smyku, který se mění s teplotou jen poměrně málo. Vysoká je tu hodnota tažnosti a časové efekty se zde projevují jen málo, a čím je vyšší teplota, tím je jejich vliv zanedbatelnější.
2. *Oblast přechodová:* při klesání teploty pod -30°C začíná modulu pružnosti vzrůstat a viskoelastický charakter deformace je stále výraznější. Časové efekty (relaxace, creep, hystereze) nabývají maximálního dosahu asi uprostřed přechodové oblasti (s poklesem teploty se uplatňují méně).
3. *Oblast sklovitá:* pod teplotou -70°C má pryž deformační chování charakteristické pro polymerní skla (přiblížení ideálně elastickému chování). Pryž je tvrdá, deformuje se vratně a nezávisle na čase a je zároveň křehká. Teplota, při které se pryž mění na sklovitou hmotu, se nazývá teplota zesklennění T_g . [2]

6.2.1.1 Teplota zesklennění

Teplota zesklennění má u pryže praktický význam pro posouzení mrazuvzdornosti. Je na rozhraní mezi sklovitou a přechodovou oblastí. Kde se vysoká hodnota modulu pružnosti začíná se zvyšující se teplotou rychle zmenšovat. Teplota zesklennění nemá povahu ostrého bodu, ale jde spíše o teplotní interval zesklennění. Vliv na změnu teploty zesklennění mají většinou pouze jen viskózní změkčovadla. [2]

6.2.1.2 Teplota tání

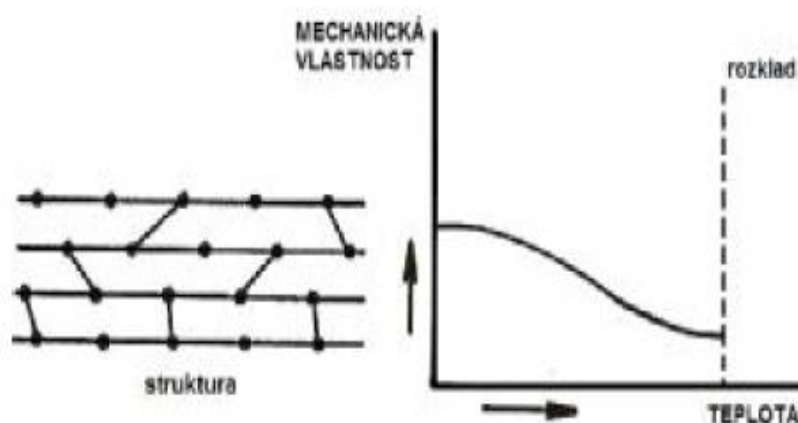
Teplota tání, označuje se T_m , je teplota, při které vymizí poslední zbytky krystalické fáze. Teplota tání závisí v podstatě na těch samých faktorech jako teplota zesklnění (ohebnost řetězců a jejich soudržnost), mimo jiné i na podmínkách krystalizace (krystalizace za nízkých teplot = menší krystaly = menší teplota tání a naopak). [2]

6.2.1.3 Trvalá tepelná odolnost

Lineární makromolekuly řídce zesíťované. Snadno se deformují a po uvolnění deformujícího napětí se opět vracejí do původního tvaru a rozměrů. Jsou to obvykle kaučuky, kaučukovité látky a pryže. [11]

6.2.1.4 Závislost mechanických vlastností na teplotě

Z hlediska zkušebnictví neexistuje žádná metoda, která by obecně hodnotila závislost mechanických vlastností na teplotě. Dosud vypracované metody jsou příliš jednostranné, to znamená, že zkouší sledovanou vlastnost po určité teplotě nebo po určité době tepelného namáhání při určité teplotě, určitém teplotním spádu apod. Fyzikálně mechanické vlastnosti se zjistí při řadě teplot a vynesou se do grafů v závislosti na teplotě. [11]



Obr. 10. Závislost mechanických vlastností pryže na teplotě

7 SLOŽENÉ SYSTÉMY

Pryž, jako konstrukční prvek, se většinou v praxi používá v kombinaci s jiným konstrukčním prvkem, a to především kovem. Jejich spojení se provádí několika různými způsoby, jako například lepením kovu s pryží, navulkanizováním pryže na kov apod.

7.1 Způsoby spojování pryže s různými materiály

7.1.1 Pomocí lepení

V moderní technice má lepení stále větší význam. Funkce mnoha pryžových výrobků závisí na dobré adhezi mezi vrstvami nebo dílci.

Lepením se rozumí technologický postup, při kterém se dosahuje trvalého spojení stejných nebo rozdílných materiálů pomocí tenké vrstvy lepidla. To je látka, která adhezi a vlastní soudržností spojuje povrchy, aniž mění povrch slepované hmoty. Lepidlo by se mělo volit podle druhu spojované hmoty a podle druhu spojení.

7.1.1.1 Rozdělení lepidel

Podle použití:

1. *Lepidla nevulkanizující*: po odpaření rozpouštědla se dosahuje pevnosti spoje bez jakýchkoliv chemických změn. Pevnost samotného pojiva, tj. nevulkanizovaného kaučuku nebo kaučukové směsi, je podstatně menší než pevnost vulkanizované směsi.
2. *Lepidla vulkanizující*: za vyšší nebo i běžné teploty, tzv. samovulkanizující lepidla, v jejichž hmotě při spojování dochází k chemickým změnám. Spoje jsou ohebné, vodovzdorné a dobře odolávají nízkým teplotám. Neodolávají působení olejům rozpouštědel a nesnášejí trvalé zatížení.

Podle lepícího média:

1. *Lepidla s těkavými rozpouštědly (roztoková):* předností je rychlé schnutí, nevýhodou hořlavost, toxicita některých rozpouštědel a i cena. Tyto lepidla se nazývají též někdy cementy a nanášejí se např. natíráním, máčením nebo stříkáním.
2. *Vodné disperze:* zde patří lepidla latexová, regenerátové disperze apod. Mediem je zde voda, tj. prostředí nehořlavé a nejedovaté. Schnutí je pomalejší a v některých případech je potřeba dosoušení.

Podle druhu spojování:

1. Spojování syrových směsí při konfekci,
2. Spojování směsi mezi sebou nebo s jinými materiály během vulkanizace (kaučukové směsi s kovem, textilem apod.),
3. Spojování vulkanizovaných kaučukových směsí (pryže) navzájem nebo s jinými materiály.

7.1.1.2 Aplikace lepidel

Při lepení je třeba dodržovat některé základní zásady:

1. Slepované plochy musí být suché a čisté. Pracovní prostředí by mělo být bezprašné.
2. Konstrukci spoje volit takovou, aby byl spoj namáhán v nejpříznivějším směru, tzn. dát přednost namáhání v tahu nebo smyku (větší plocha) před rozlepováním a štípaním.
3. Volba vhodného lepidla. Základním pravidlem je lepit podobné podobným (např. polární pryž polárním lepidlem). Při lepení pryže na kov je třeba volit vždy polární lepidlo.
4. Film spoje má být tenký (do jisté míry vyrovnává nerovnosti povrchu).
5. Dodržovat předpisy dané výrobcem při lepení.

7.2 Spojování pryže s kovovými materiály

Výroba pryžokovových výrobků (gumokov) je založena na principu spojování pryží s kovy. Spojování pryží s kovy lze rozdělit na:

- *spojování za vulkanizační teploty a tlaku (horké spojování)*
- *spojování za běžné teploty a bez tlaku (lepení za studena)*

V prvním případě se vytváří spoj mezi pryží a kovem během vulkanizace směsi ve formě zároveň s vloženou armaturou při vulkanizační teplotě a tlaku. Pojící vrstvu tvoří mosaz, ebonit nebo jiné druhy pojiv anebo je spojovací prostředek už obsažen v kaučukové směsi (samopojivo).

V druhém případě se tvoří spoj pryže s kovem za běžné teploty bez tlaku (nebo jen mírné přitlačení), přičemž se s kovem pojí předem připravený vulkanizát.

Před samotnou výrobou gumokovových výrobků by se měl nejprve povrch kovu, který má být spojen s pryží odmastit a zdrsňit. Na odmaštěné a zdrsňené kovové díly se pak nanáší vrstva pojiva, která umožňuje pevný pryžokovový spoj. Největší vliv na soudržnost pryže s kovy mají právě plniva (termoplastická, halogenové deriváty kaučuku, izokyanatany, mosaz).

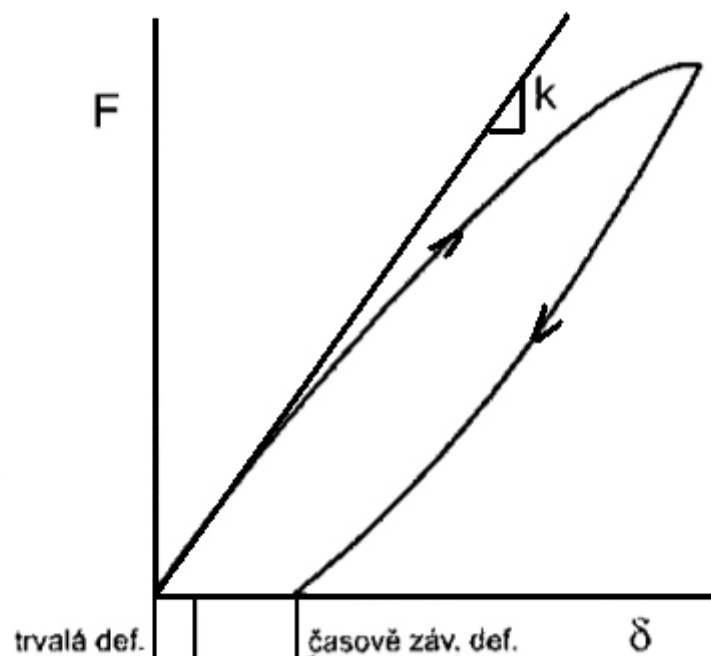
8 KONSTRUKČNÍ PRYŽOVÉ PRVKY

Samotná pryž se jako konstrukční prvek moc v praxi nepoužívá. Většinou je to ve spojení s kovovými součástmi, a to jsou tzv. pryžokovové konstrukční prvky. Tyto prvky jsou namáhány různým způsobem, jak staticky tak dynamicky. Mezi statické namáhání patří, například namáhání smykem, tahem, krutem, tlakem a jejich kombinace. V praxi má pryž převážně uplatnění v podobě tlakových pružin.

8.1 Pryžokovové pružné prvky – pružiny a pružná uložení

8.1.1 Charakteristika pružiny

Charakteristikou pružného prvku nazýváme závislost jeho zatížení na deformaci – obr. 11. Při větších deformacích jsou charakteristiky pryžových pružin obecně nelineární. Tato nelinearita je obecně způsobena nejen materiálovými, ale i geometrickými vlivy. Tuhost, nebo též konstanta pružiny je dána směrnicí charakteristiky v jejím počátku. [6]

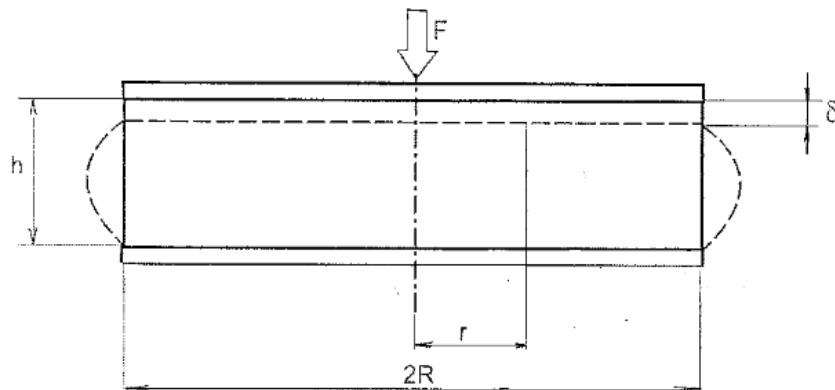


Obr.11. Závislost zatížení na deformaci

8.1.2 Tlaková pružina

Jako tlakovou pružinu uvažujeme cylindrický pryžokovový prvek o poloměru r a tloušťce h , zatížený osově symetrickou silou F . Prosté jednoosé kompresi pryžové části brání vazba s ocelovými plechy, k nimž je pryž přivulkanizována. Tuto vazbu (pokud nedochází k separaci), lze uvažovat jako totálně tuhou, vzhledem k značnému rozdílu tuhosti ocelí a pryže.

V porovnání se stlačováním volného válce jednoosým napětím σ_z se vliv tuhé vazby s ocelovými plechy projeví navenek vyšší tuhostí prvku, jako důsledek bránění volným radiálním deformacím v oblasti vazby. [6]



Obr. 12. Tlaková pružina

8.1.2.1 Výpočet napětí a deformace tlakové pružiny

Zjednodušeně myšleno, lze si představit nahrazení účinku ocelových částí smykovým napětím τ_{rz} . Tato napětí budou zřejmě přímo úměrná normálové složce a závislá na relativní radiální souřadnici r/h . Budeme-li považovat závislost r/h za lineární, bude:

$$\tau_{rz} \sim E (r/h) \quad (20)$$

Z přibližné rovnice rovnováhy elementu pryžového bloku v radiálním směru je zřejmé podle obr. 13., že:

$$\tau_{rz} \sim (h/2) dp(r) / dr \quad (21)$$

a kde $p(r)$ je hodnota normálového napětí – tlaku, charakterizujícího vytékání pryže. A je tedy v místě r :

$$p(r) = E (\delta/h^3) r^2 + C \quad (22)$$

V $r = R$ je $p(R) = 0$, takže

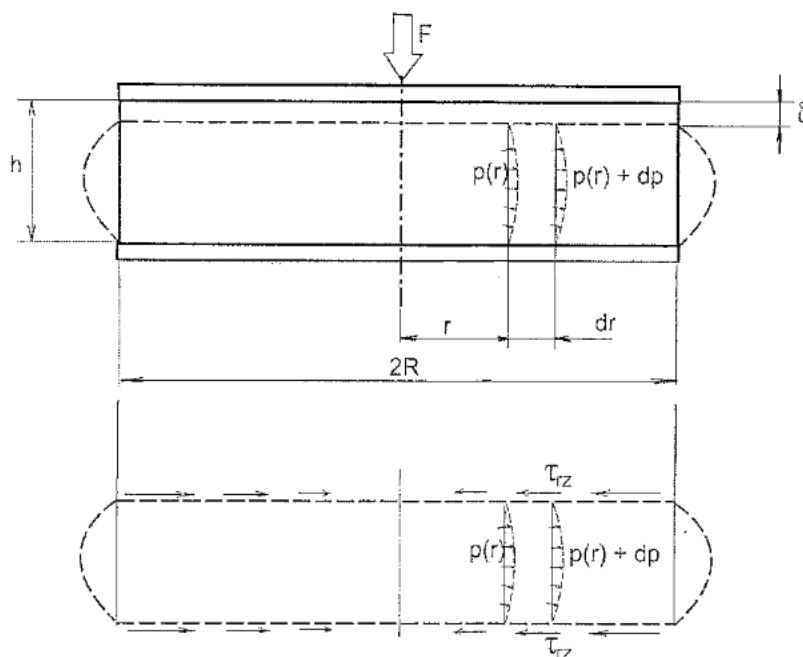
$$C = -E (\delta/h^3) R^2 \quad (23)$$

Odhadovaná závislost tlaku p na radiálních pořadnici r je tedy ve stavu

$$p(r) \sim E(\delta/h^3) (R^2 - r^2) \quad (24)$$

Celková síla F , potřebná ke stlačení pryžokovového cylindrického prvku je tak

$$F = F_o + F_p = \pi E (\delta/h) R^2 [1 + 2(R/2h)^2] \quad (25)$$



Obr. 13. Nahrazení účinků smykovým napětím

8.1.2.2 Tvarový faktor tlakové pružiny

Tvarový faktor f je definován jako podíl zatížení plochy a povrchu volné pryže tlakové pružiny a $\emptyset(f)$ je tvarová funkce tvarového faktoru. V daném případě cylindrické pružiny je

$$f = \pi R^2 / 2 \pi R = R/2h \quad (26)$$

a tvarová funkce

$$\emptyset(f) = 1 + 2f^2 \quad (27)$$

Tvarová funkce vyjadřuje poměrné zvýšení tuhosti pryžového prvku vlivem vazby na ocelovém plášti. Je-li konstanta nevázaného pryžového prvku $k_o = F_o / \delta$, konstanta pryžokovového prvku $k = F / \delta$, potom poměrné zvýšení tuhosti vlivem vazby na ocelové části činí

$$k / k_o = F / F_o = \emptyset(f) \quad (28)$$

Zatímco tvarový faktor f charakterizuje tvar v rámci určité geometrie – typu pryžokovového tlakového prvku, tvarová funkce $\emptyset(f)$ přísluší určité geometrii resp. typu pružiny. [6]

9 SHRnutí STUDIjNÍ ČástI

Teoretická část se zabývala problematikou pryže samotné. Bylo zde v několika kapitolách popsáno, co to pryž je, skladba směsi na výrobu pryže, způsob výroby, vulkanizace a recyklace pryže. Je zde základní rozdělení pryže a pryžových výrobků. Například podle druhu kaučuků, který se používá na pryžové výrobky, podle množství vázané síry a hlavních průmyslových odvětví kde se pryž nejvíce používá. Ve studijní části jsem ještě popsal dva druhy nejpoužívanějších syntetických kaučuků a to NR a SBR, z jejichž směsi jsem pak v praktické části dělal zkušební pryžové výrobky. Dále jsou v teoretické části uvedeny fyzikálně mechanické vlastnosti pryže, a to především její elastické vlastnosti, které jsou u pryže nejvyužívanější v praxi. Jako podkapitola je zde i deformační zkouška pryže, a to zkouška na tlak, se kterou souvisí i teoretický popis tvarového faktoru, který také využiji při vyhodnocování dat získaných v praktické části. Jako další vlastnosti pryže jsou popsány vlastnosti tepelné, patří sem závislost modulu pružnosti pryže na teplotě a významné teploty pro pryž, jako teplota zesklnění a tání. V poslední části jsou popsány složené systémy, kdy se pryž spojuje s různými materiály, a to převážně s kovovými. Buď lepením anebo vulkanizací. Poznátky z teoretické části budou využity i v části praktické.

II. PRAKTICKÁ ČÁST

10 STANOVENÍ CÍLŮ A METOD V PRAKTICKÉ ČÁSTI

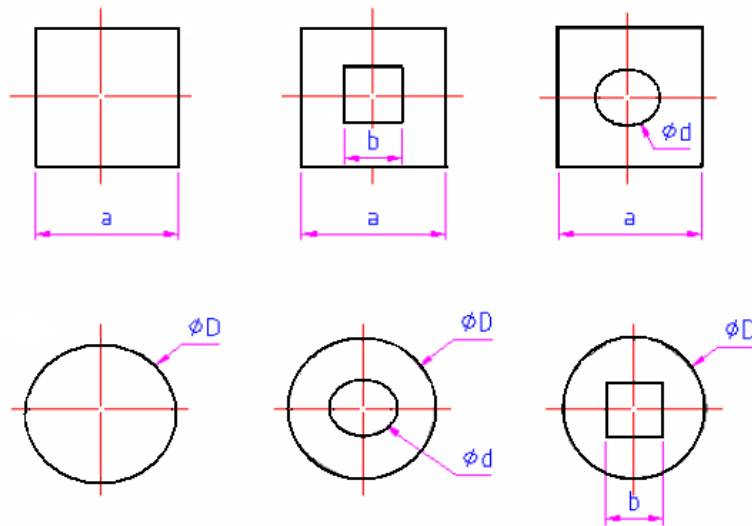
Cílem této diplomové práce je zjištění vlivu teploty a tvaru na mechanické vlastnosti pryžových výrobků.

V první fázi praktické části bude provedena výroba zkušebních pryžových vzorků o šesti různých tvarech, to je plný válec a hranol, válec s kruhovým a čtvercovým otvorem uprostřed a hranol s kruhovým a čtvercovým otvorem uprostřed, o třech výškách z běhounové směsi S 1234. Následuje příprava zkušebních vzorků na deformační zkoušku v tlaku. Ta bude provedena za teploty okolí $T_1 = 20^\circ\text{C}$ a v teplotní komoře za zvýšených teplot $T_2 = 60^\circ\text{C}$, $T_3 = 100^\circ\text{C}$. V druhé fázi praktické části bude v programu COSMOS a MSC. PATRAN vytvořen nelineární model jednoho ze zkušebních vzorků. Jedná se o plný válec a bude namodelována simulace zkoušky v tlaku při teplotě okolí T_1 .

Na závěr bude provedeno srovnání naměřených hodnot. Bude zkoumán vliv teploty na mechanické vlastnosti a zda do výsledků zasáhl i tvarový faktor zkušebních vzorků. Nakonec budou srovnány výsledky z modelu z programu COSMOS s výsledky naměřenými při deformační zkoušce.

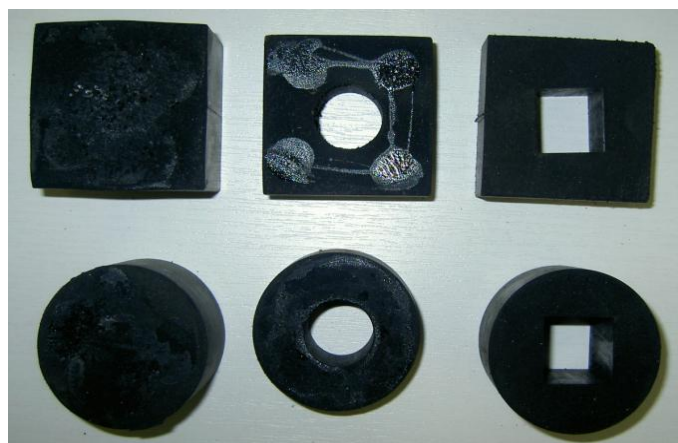
11 VÝROBA ZKUŠEBNÍCH TĚLES

Pro studium vlivu teploty na mechanické vlastnosti, bylo zapotřebí vyrobit v lisovací formě zkušební pryžové vzorky. Lisovací forma umožňovala výrobu šesti různých druhů tvarů pryžových vzorků. Pryžové vzorky byly vyrobeny všechny ze stejného materiálu, a to z běhounové směsi S 1234. Jedná se o tvary čtvercového a kruhového průřezu, buď plné, nebo s kruhovou či čtvercovou dírou uprostřed. Tyto tvary mají připomínat tlumící prvky, které se hojně používají v praxi, jako například silentbloky. Na samotné zkušební vzorky byly potom nalepeny ocelové plechy o rozměrech 55 x 55 x 2mm. Zkušební pryžový vzorek simuloval vázanou tlakovou pružinu.

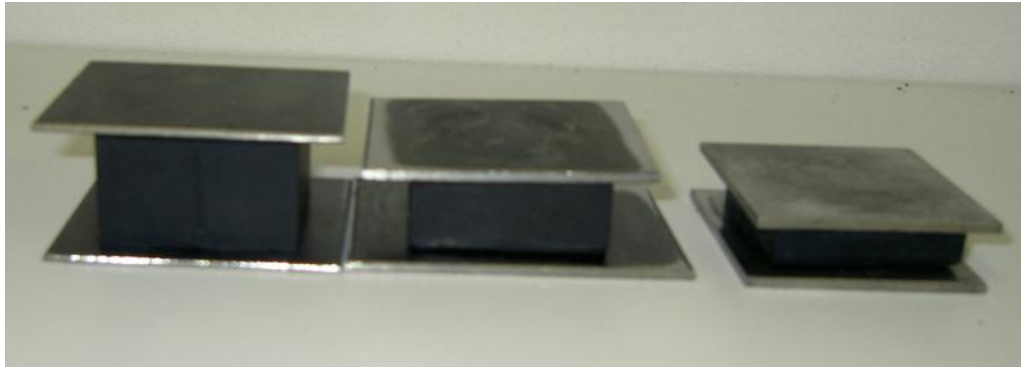


Obr. 14. Schéma zkušebních vzorků: $a = 49\text{mm}$,

$$b = 20\text{mm}, \phi D = 49\text{mm}, \phi d = 20\text{mm}$$



Obr. 15. Použité zkušební vzorky



Obr. 16. Výšky zkušebních vzorků: $h_1 = 10\text{mm}$, $h_2 = 20\text{mm}$, $h_3 = 30\text{mm}$

11.1 Lisovací forma

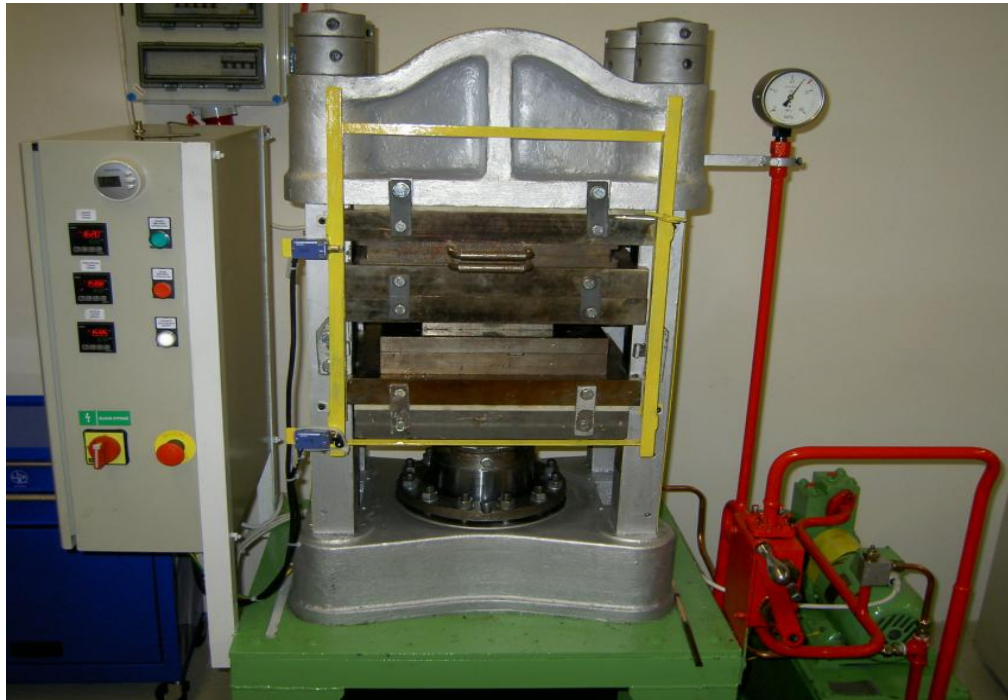
Zkušební vzorky byly vyrobeny ve formě, která byla zkonstruována a navržena formou stavebnice, takže bylo možno jednotlivé části formy měnit podle potřeby. Forma umožňuje vyrobit šest různých tvarů vzorků, ale umožňuje vyrobit vzorky pouze jednotné délky, které musely být posléze zkráceny na požadovaný rozměr (viz. Obr. 16.).



Obr. 17. Lisovací forma

11.2 Lisování zkušebních vzorků

Lisování všech vzorků proběhlo ve školních dílnách na hydraulickém etážovém lisu 400 x 400mm, elektricky vytápěném. Teplota lisu a čas lisování byl volen podle vulkanizační křivky a byl stanoven na $t = 20\text{min.}$ a $T = 170^\circ\text{C.}$



Obr. 18. Hydraulický etážový lis

11.3 Materiál zkušebních vzorků

Zkušební vzorky byly vyrobeny z pneumatikářské směsi. Jedná se o tzv. běhounovou směs S 1234. Tato směs se skládá z 50% kaučuku SBR a 50% kaučuku NR. Dodavatelem směsi byla firma BACO Otrokovice.

12 VÝPOČET TVAROVÉHO FAKTORU A TVAROVÉ FUNKCE

Tvarový faktor a tvarová funkce, zde byla počítána proto, aby se zjistilo, zda různý tvar zkušebních vzorků, měl vliv na naměřené hodnoty při tlakové zkoušce, buď při okolní teplotě anebo za zvýšených teplot.

12.1 Tvarový faktor

Tvarový faktor f , definovaný jako podíl zatížené plochy a volného povrchu zkušebního vzorku, byl zde spočítán pro všech šest různých tvarů a všechny tři výšky ($h_1 = 10\text{mm}$, $h_2 = 20\text{mm}$, $h_3 = 30\text{mm}$).

a) Plný pryžový válec o $\varnothing D = 49\text{mm}$ a výšky h_x ,

$$f_1 = \frac{\pi \cdot D^2}{4 \cdot \pi \cdot D \cdot h_x} = \frac{D}{4 \cdot h_x} \quad (29)$$

Tab. 1. Hodnoty tvarového faktoru f_1

Výška h_x [mm]	Tvarový faktor f_1
h_1	1,225
h_2	0,6125
h_3	0,4083

b) Plný pryžový hranol o rozměrech $a = 49\text{mm}$, výšky h_x ,

$$f_2 = \frac{a^2}{4 \cdot a \cdot h_x} = \frac{a}{4 \cdot h_x} \quad (30)$$

Tab. 2. Hodnoty tvarového faktoru f_2

Výška h_x [mm]	Tvarový faktor f_2
h_1	1,225
h_2	0,6125
h_3	0,4083

c) Pryžový válec o $\varnothing D = 49\text{mm}$ a výšky h_x s kruhovým otvorem uprostřed o $\varnothing d = 20\text{mm}$,

$$f_3 = \frac{\frac{\pi \cdot D^2}{4} - \frac{\pi \cdot d^2}{4}}{\pi \cdot D \cdot h_x + \pi \cdot d \cdot h_x} = \frac{D - d}{4 \cdot h_x} \quad (31)$$

Tab. 3. Hodnoty tvarového faktoru f_3

Výška h_x [mm]	Tvarový faktor f_3
h_1	0,725
h_2	0,3625
h_3	0,2417

d) Pryžový hranol o rozměrech $a = 49\text{mm}$, výšky h_x se čtvercovým otvorem uprostřed o rozměrech $b = 20\text{mm}$, výšky h_x ,

$$f_4 = \frac{a^2 - b^2}{4 \cdot x \cdot (a + b)} = \frac{a - b}{4 \cdot h_x} \quad (32)$$

Tab. 4. Hodnoty tvarového faktoru f_4

Výška h_x [mm]	Tvarový faktor f_4
h_1	0,725
h_2	0,3625
h_3	0,2417

e) Pryžový válec o $\varnothing D = 49\text{mm}$, výšky h_x se čtvercovým otvorem uprostřed o rozměrech

$b = 20\text{mm}$, výšky h_x

$$f_5 = \frac{\frac{\pi \cdot D^2}{4} - b^2}{\pi \cdot D \cdot h_x + 4 \cdot b \cdot h_x} \quad (33)$$

Tab. 5. Hodnoty tvarového faktoru f_5

Výška h_x [mm]	Tvarový faktor f_5
h_1	0,6351
h_2	0,3176
h_3	0,2117

f) Pryžový hranol o rozměrech $a = 49\text{mm}$, výšky h_x s kruhovým otvorem uprostřed o

$\varnothing d = 20\text{mm}$, výšky h_x .

$$f_6 = \frac{a^2 - \frac{\pi \cdot D^2}{4}}{(4 \cdot a + \pi \cdot d) \cdot h_x} \quad (34)$$

Tab. 6. Hodnoty tvarového faktoru f_6

Výška h_x [mm]	Tvarový faktor f_6
h_1	0,4152
h_2	0,0201
h_3	0,0138

Z vypočtených hodnot vyplývá, že s rostoucí výškou tělesa klesá tvarový faktor. To znamená, že se zatěžující plocha pryže zmenšuje oproti ploše volné.

12.2 Tvarová funkce

Vyjadřuje pro danou geometrii, poměrné zvýšení tuhosti pryžového zkušební vzorku vlivem vazby na ocelové části, již byly na zkušební vzorky přilepeny. Je zde opět spočítána pro všechny tvary zkušebních těles a pro všechny jejich výšky ($h_1 = 10\text{mm}$, $h_2 = 20\text{mm}$, $h_3 = 30\text{mm}$). A spočítá se jako funkce tvarového faktoru f :

$$\Phi(f_x) = 1 + 2 \cdot f_x \quad (35)$$

Tab. 7. Hodnoty tvarové funkce

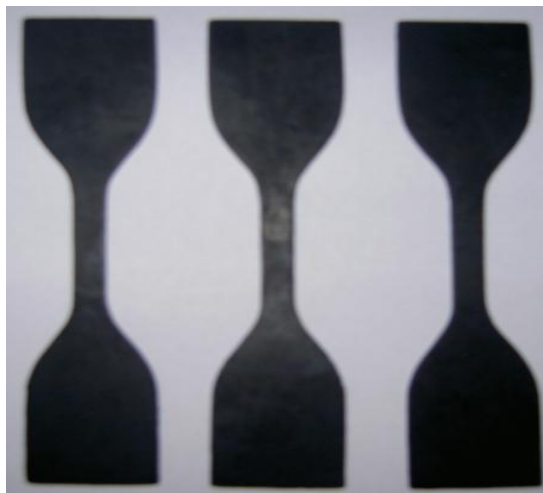
$\Phi(f_x)$	$\Phi(f_1)$	$\Phi(f_2)$	$\Phi(f_3)$	$\Phi(f_4)$	$\Phi(f_5)$	$\Phi(f_6)$
h_1	4,0013	4,0013	2,0513	2,0513	1,8067	1,0034
h_2	1,7503	1,7503	1,2628	1,2628	1,2017	1,0009
h_3	1,3335	1,3335	1,1168	1,1168	1,0896	1,0004

13 MODEL

Aby bylo možné srovnávat experimentálně naměřené hodnoty z deformační zkoušky v tlaku provedené na zkušebních stroji Zwick 1456, byl pro porovnání vytvořen nelineární model simulující tlakovou zkoušku zkušebního vzorku v programu COSMOS a MSC. PATRAN. Jedná se o plný pryžový válec o $\varnothing D = 49\text{mm}$ a výškách $h_1 = 10\text{mm}$, $h_3 = 30\text{mm}$. Hyperelastické konstanty potřebné pro vytvoření nelineárních modelů byly zjištěny pomocí programu MSC. PATRAN.

13.1 Tahová zkouška

Pro získání hodnot z programu MSC. PATRAN musela být provedena tahová zkouška. Vzorky, pro tahové zkoušky byly vyrobeny ze stejného materiálu, jako zkušební vzorky pro deformační zkoušku v tlaku, tj. z běhounové směsi S 1234. Byly vylisovány také ve školních dílnách v hydraulickém etážovém lisu (viz. Obr. 18.). Zkouška byla pro porovnání provedena nejprve na zkušebním stroji Zwick 1456, ale jelikož stroj nemá čelisti vhodné pro uchycení pryžových vzorků, tak byla zkouška v tahu provedena ještě na zkušebním stroji Tensometer 2000, který se používá pouze pro elastomerní materiály. Pro získání hyperelastických konstant z programu MSC.PATRAN byly použity naměřené hodnoty ze zkušebního stroje Tensometer 2000. Naměřené hodnoty jsou uvedeny v příloze P I.



Obr. 19. Zkušební vzorky



Obr. 20. Zkušební stroj ZWICK 1456



Obr. 21. Zkušební stroj T2000

13.2 Zkouška nafukováním

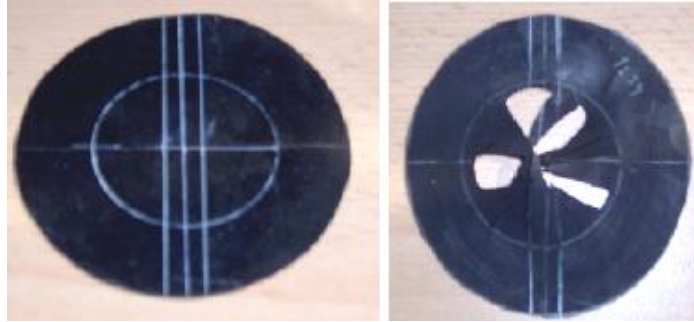
Zkušební tělesa pro tuto zkoušku byly opět vyrobeny ze stejného materiálu S 1234, jako vzorky na deformační zkoušku v tlaku. Hodnoty ze zkoušky nafukováním se opět použily pro získání hyperelastických konstant z programu MSC. PATRAN. Naměřené hodnoty jsou uvedeny v příloze P II.



Obr. 22. Začátek zkoušky nafukováním (hodnota tlaku na obrázku je v kPa)



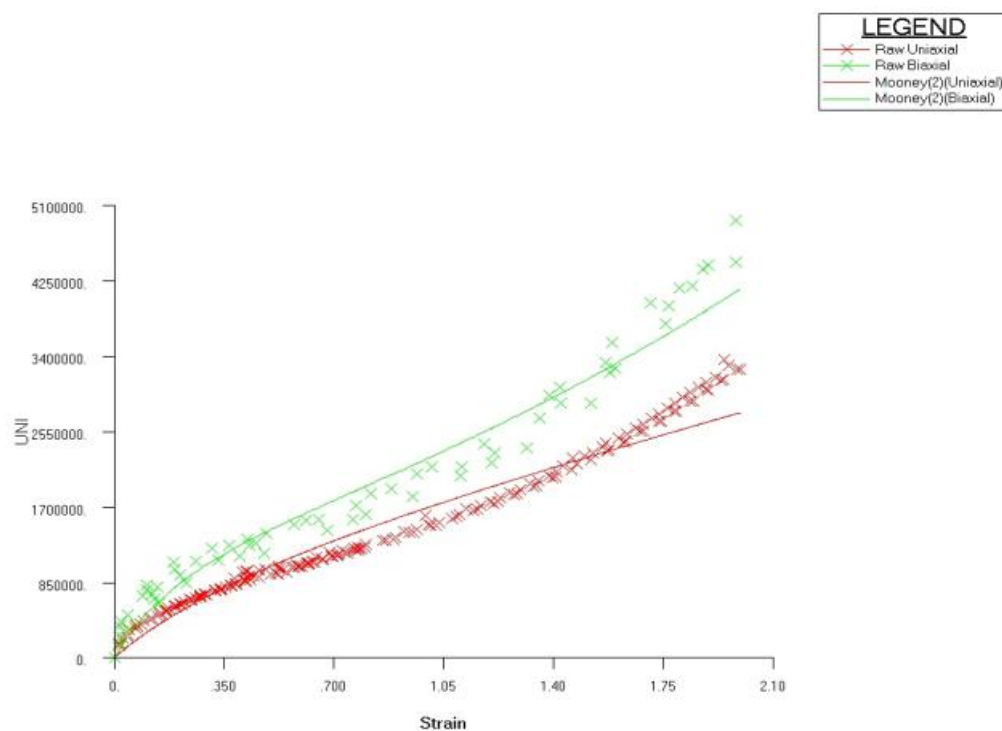
Obr. 23. Konec zkoušky nafukováním (hodnota tlaku na obrázku je v kPa)



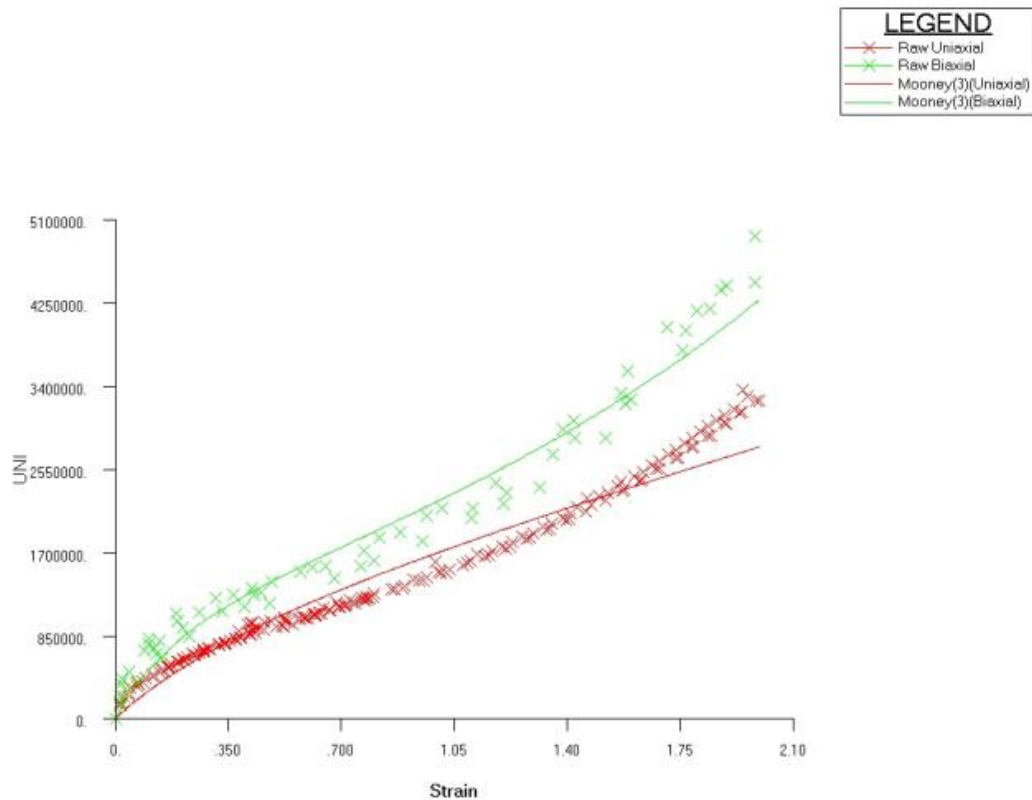
Obr. 24. Zkušební těleso před a po deformaci

13.3 Výpočtový program MSC. PATRAN

Jedná se o program, který umožňuje vytvářet geometrii tělesa, tzn. jeho detailní popis ve 3D (ve 2D), který je určen množinou bodů, které ho určují. Jedná se o preprocesor a postprocesor pro přípravu úloh a analýzu výsledků vhodný pro celou řadu systémů, vyznačujících se vysokou flexibilitou a vysokou úrovní integrace s CAD systémy. Program má své použití především v oblasti simulací pevnostních analýz mechanických konstrukcí. V tomto programu byly zjištěny konstanty dvou – parametrového hyperelastického modelu Mooney – Rivlin a vytvořen model pro plný válec výšky $h_1 = 10\text{mm}$ a $\phi D = 49\text{mm}$.



Obr. 25. Dvou-parametrový Mooney-Rivlin



Obr. 26. Tří-parametrový Mooney-Rivlin

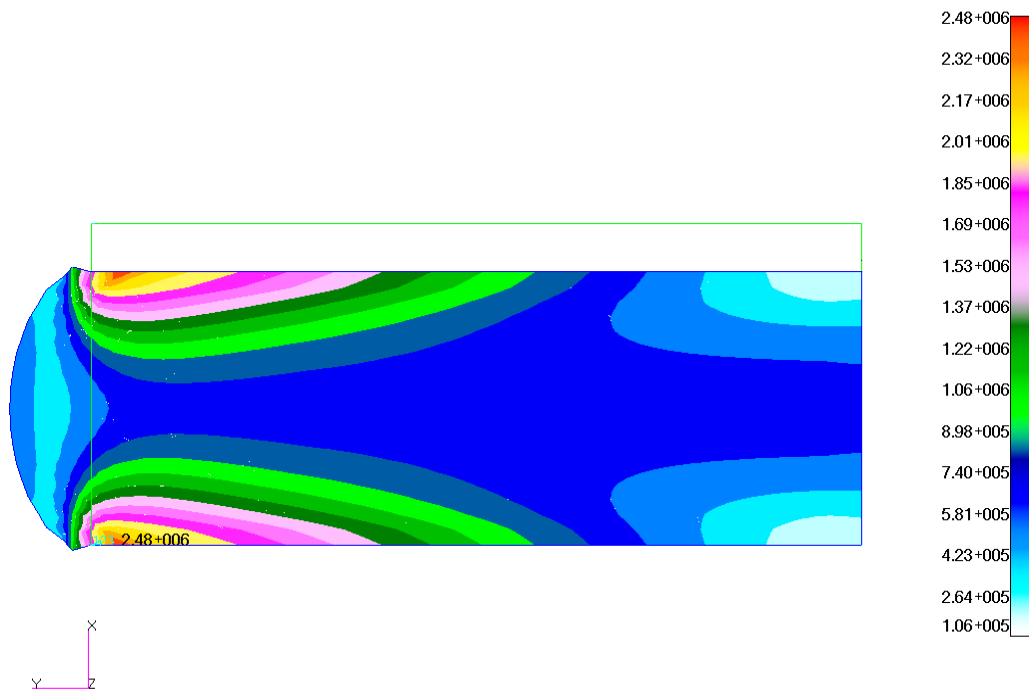
V programu MSC. PATRAN byly také zjištěny konstanty pro tři – parametrový hyperplastický model Mooney – Rivlin, ale jelikož se hodnoty výrazně neliší, nebyly použity pro tvorbu modelu v programu COSMOS.

13.4 Model z programu MSC. PATRAN

Pro plný válec $\varnothing D = 49\text{mm}$ a výšky $h_1 = 10\text{mm}$, byl vytvořen nelineární model v programu MSC. PATRAN. Model simuluje tlakovou zkoušku při teplotě $T_1 = 20^\circ\text{C}$. Pro zvolenou deformaci, která činí $\delta = 1,5\text{mm}$, vyšla v modelu maximální zatěžující síla $F = 4290\text{N}$ a největší napětí, které je na kraji v rozhraní kov - pryž $\sigma_{\text{Von Mises}} = 2,48 \cdot 10^6 \text{ Pa}$. Na obr. 27. je možno vidět těleso po deformaci, kde osa x je osou symetrie, tzn., že lze nakreslit do programu pouze polovinu tělesa a zelená čára naznačuje umístění kovového plechu, který simuluje vázanou tlakovou pružinu.



Obr. 27. Deformace tělesa



Obr. 28. Velikost napětí Von Mises

13.5 Výpočtový program COSMOS

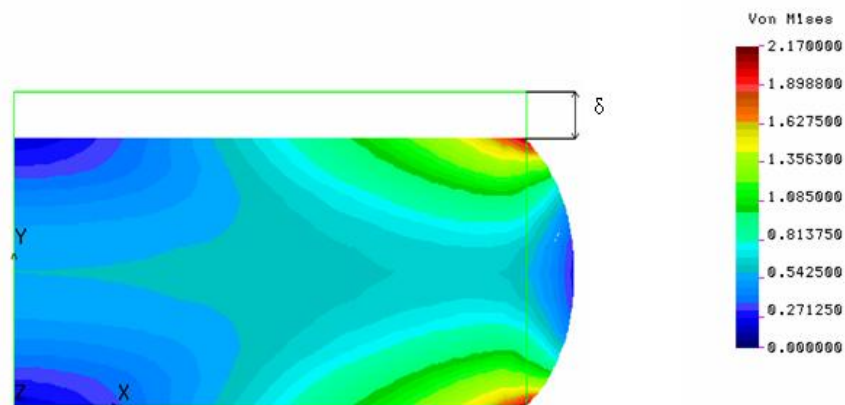
Je to modulární výpočetní systém založený na metodě konečných prvků vyvinutý firmou SRAC. Celý systém má rozsáhlé možnosti použití při výpočtech tepelných, mechanických, únavových, optimalizačních, elektromagnetických aj. analýz. Úplná modularita umožňuje získat a provozovat pouze potřebné moduly.

13.6 Model z programu COSMOS

Pomocí tohoto výpočtového programu byl vytvořen nelineární model, simulující tlakovou zkoušku zkušebního tělesa z materiálu S 1234. Model byl zhotoven pro plný válec o $\varnothing D = 49\text{mm}$ a výšky $h_1 = 10\text{mm}$, $h_3 = 30\text{mm}$.

13.6.1 Hodnoty z modelu pro výšku h_1

Zde jsou uvedeny hodnoty vypočtené pro těleso o výšce $h_1 = 10\text{mm}$, při teplotě $T_1 = 20^\circ\text{C}$. Na obr. 29. je vidět, jaká je v deformovaném tělese napjatost, a na kterých místech je při deformaci největší. Osa y je tzv. osou symetrie to znamená, že byla nakreslena v programu pouze polovina tělesa a zelená čára na obrázku naznačuje přilepený kovový plech na těleso, aby vznikla vázaná tlaková pružina. Největší napětí je na krajích v rozhraní pryž - kov a činí $\sigma_{\text{Von Mises}} = 2,17\text{ MPa}$. V porovnání s modelem z programu MSC. PATRAN se hodnoty výrazně neliší.

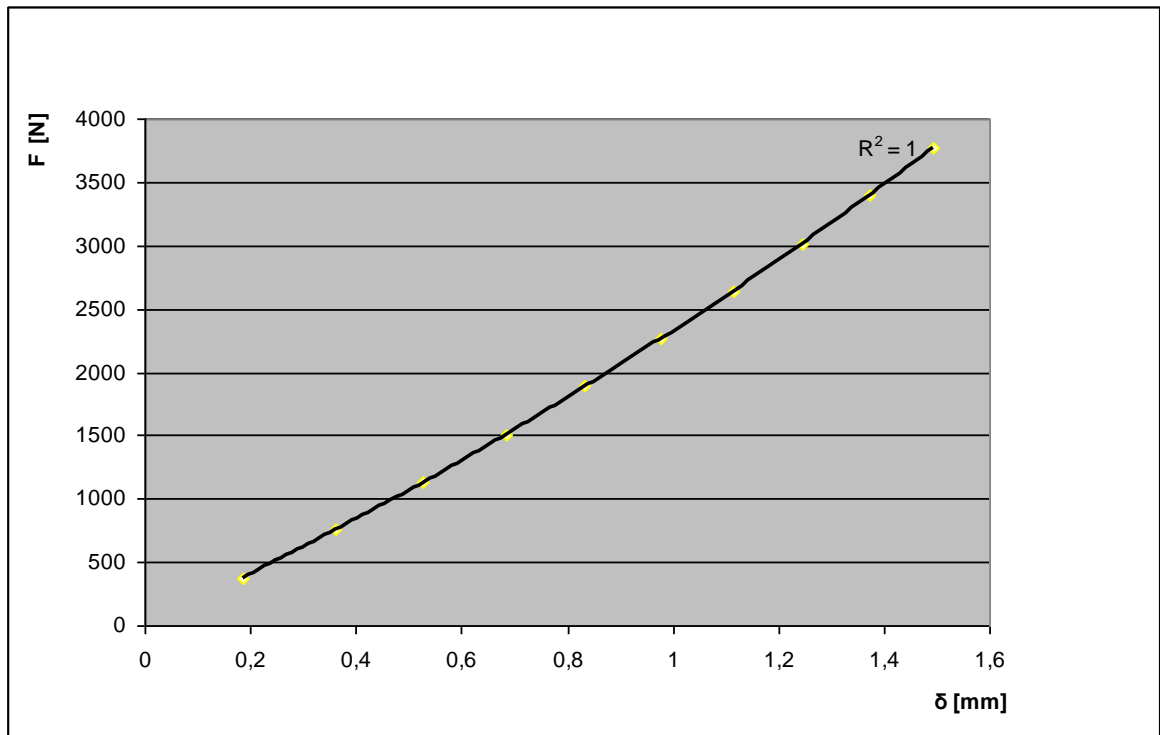


Obr. 29. Napětí Von Mises

Těleso bylo postupně zatěžováno až na tlak $p = 2\text{MPa}$ a deformace odpovídající tomuto tlaku činí $\delta = 1,495\text{mm}$. Ostatní hodnoty z programu jsou v tabulce. 8.

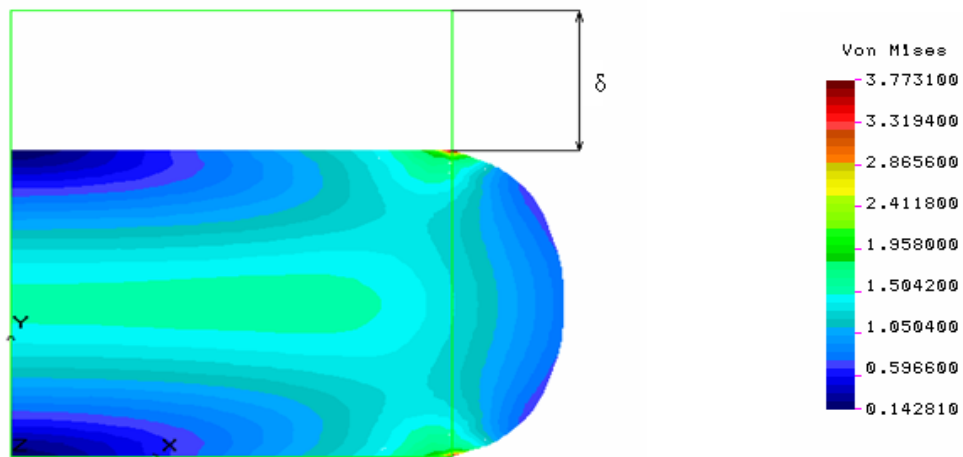
Tab. 8. Hodnoty vypočtené v programu COSMOS pro h_1

p [Mpa]	0,2	0,4	0,6	0,8	1	1,2	1,4	1,6	1,8	2
F [N]	377,15	754,29	1131,44	1508,59	1885,74	2262,89	2640,04	3017,19	3394,33	3771,48
δ [mm]	0,1856	0,3608	0,5267	0,6842	0,8343	0,9776	1,115	1,247	1,373	1,495

Obr. 30. Graf závislosti síly na deformaci modelu o výšce h_1

13.6.2 Hodnoty z modelu pro výšku h_3

Zde jsou uvedeny hodnoty vypočtené v programu COSMOS pro těleso o výšce $h_3 = 30\text{mm}$, při teplotě $T_1 = 20^\circ\text{C}$. Na obr. 31. je vidět jaká je v deformovaném tělese napjatost, a na kterých místech je při deformaci největší. Osa y je tzv. osou symetrie tzn., že byla nakreslena v programu pouze polovina tělesa a zelená čára na obrázku naznačuje přilepený kovový plech na těleso. Největší napětí je na krajích v rozhraní pryž - kov a činí $\sigma_{\text{Von Mises}} = 3,7731\text{ MPa}$.

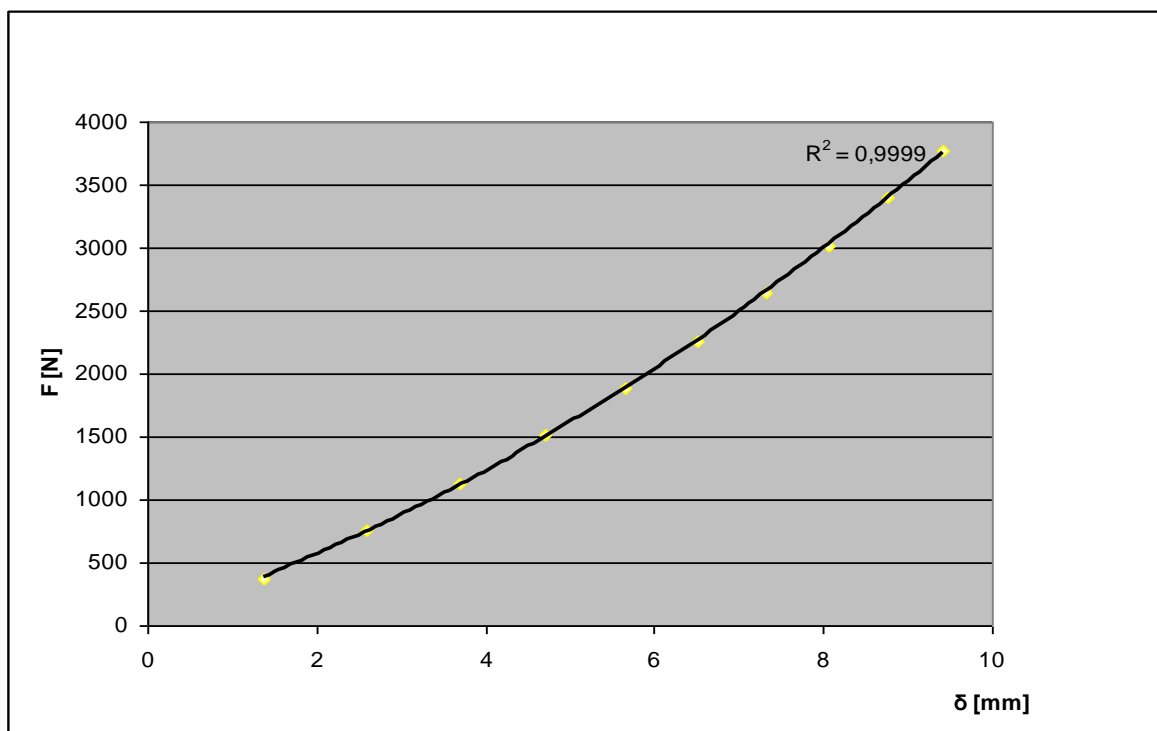


Obr. 31. Napětí Von Mises

Těleso bylo postupně zatěžováno až na tlak $p = 2\text{MPa}$ a deformace odpovídající tomuto tlaku činí $\delta = 9,4073\text{mm}$. Ostatní hodnoty z programu jsou v tabulce 9.

Tab. 9. Hodnoty vypočtené v programu COSMOS pro h_3

p [Mpa]	0,2	0,4	0,6	0,8	1	1,2	1,4	1,6	1,8	2
F [N]	377,15	754,29	1131,44	1508,59	1885,74	2262,89	2640,04	3017,19	3394,33	3771,48
δ [mm]	1,364	2,5898	3,7	4,714	5,6475	6,511	7,3142	8,0616	8,758	9,4073

Obr. 32. Graf závislosti síly na deformaci modelu o výšce h_3

14 DEFORMAČNÍ ZKOUŠKA V TLAKU

Tlakové zkoušky byly provedeny na zkušebním stroji Zwick 1456. Prováděli se za tří teplot, nejdříve šlo o teplotu okolí $T_1 = 20^\circ\text{C}$, pak o teploty zvýšené $T_2 = 60^\circ\text{C}$, $T_3 = 100^\circ\text{C}$, které byly nastaveny v teplotní komoře Zwick. Jednosým tlakem byla zatížena tělesa všech šesti tvarů o třech výškách (h_1, h_2, h_3). Byly zatíženy tak, aby deformace nepřesáhla $\varepsilon = 45\%$. Každé těleso bylo zatíženo pouze jednou.

14.1 Popis použitých zařízení

14.1.1 Zkušební stroj Zwick 1456

Slouží k měření mechanických vlastností materiálu. Lze na něm provádět zkoušky tlakem, tahem, ohybem a i cyklické zkoušky. Oblast použití je omezena pouze velikostí maximální snímané síly, která činí $F = 20\text{kN}$, proto se používá především pro polymerní materiály. S použitím teplotní komory Zwick lze měřit mechanické zkoušky v rozsahu teplot -80°C až $+250^\circ\text{C}$. Celý průběh zkoušky je okamžitě vyhodnocován na počítači.



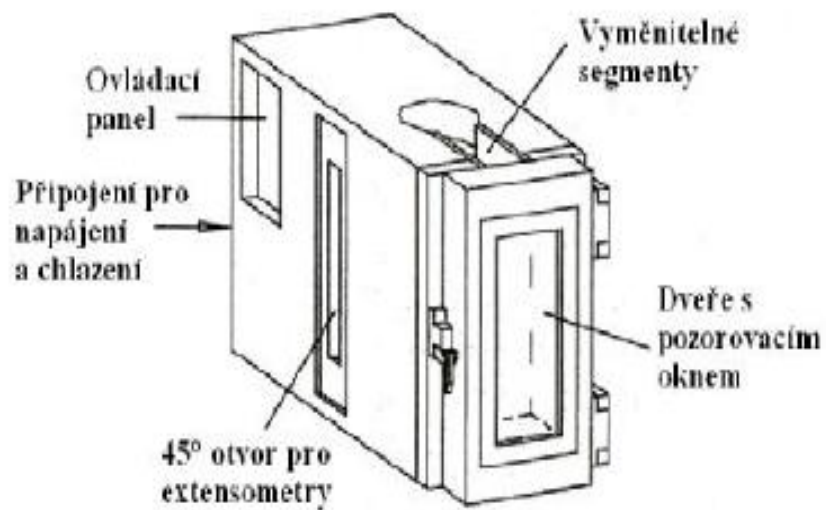
Obr. 33. Zkušební stroj Zwick 1456

14.1.2 Teplotní komora Zwick

Jedná se o standardní teplotní komoru Zwick W 91255 s rozmezím teplot od -80°C do $+250^{\circ}\text{C}$. Ke komoře může být připojen chladicí prostředek LN_2 . Komora je vybavena vnitřním osvětlením a rozhraním pro komunikaci s testovacím PC. Teplotní komora lze umístit na zkušební stroj Zwick 1456.



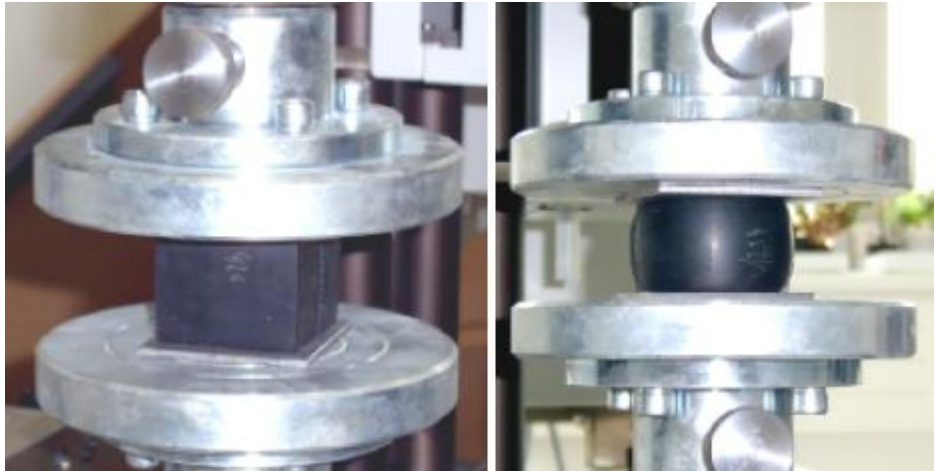
Obr. 34. Teplotní komora Zwick



Obr. 35. Popis teplotní komory

14.2 Tlaková zkouška

Tlaková zkouška probíhala ve třech fázích. V první fázi byla zkušební tělesa zatížena jednoosým tlakem při teplotě okolí $T_1 = 20^\circ\text{C}$. V druhé fázi byla tělesa v teplotní komoře napřed vytemperována na teplotu $T_2 = 60^\circ\text{C}$, po dobu $t = 20\text{min.}$ a poté zatížena jednoosým tlakem. V poslední třetí fázi byla tělesa vytemperována na teplotu $T_3 = 100^\circ\text{C}$, po dobu $t = 20\text{min.}$ a zatížena jednoosým tlakem.



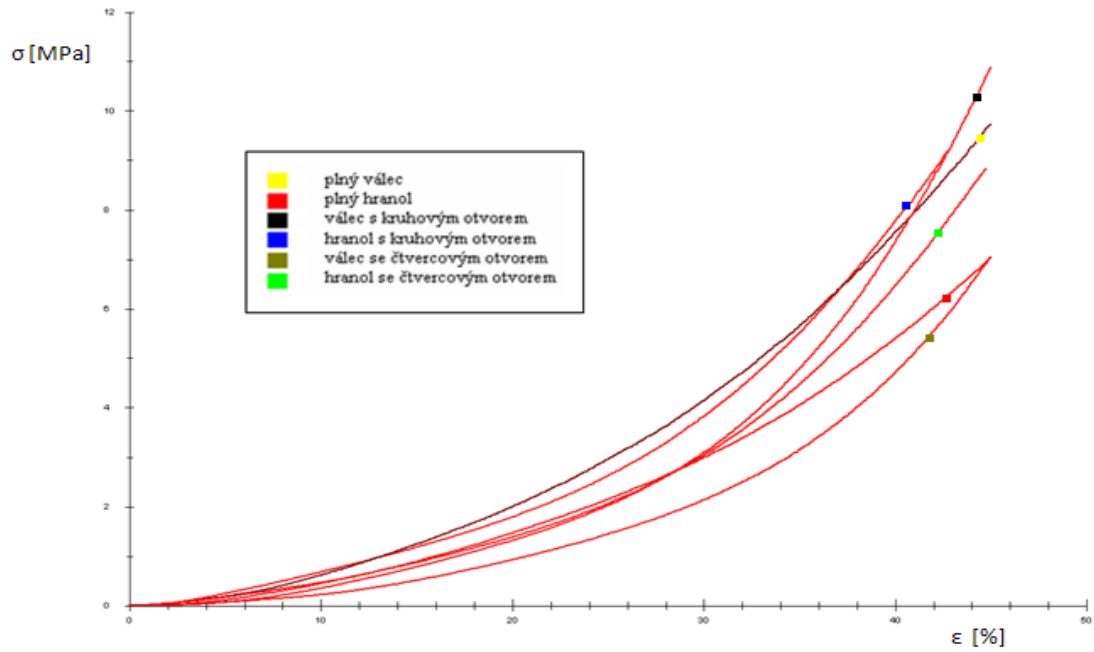
Obr. 36. Zatěžování zkušebních těles

14.2.1 Naměřené hodnoty

Naměřené hodnoty z deformační zkoušky tlakem, byly sestaveny do tabulek a do grafických závislostí dle teploty a výšky zkušebního vzorku. Všechny hodnoty jsou uvedeny v přílohách P III až PLIII.

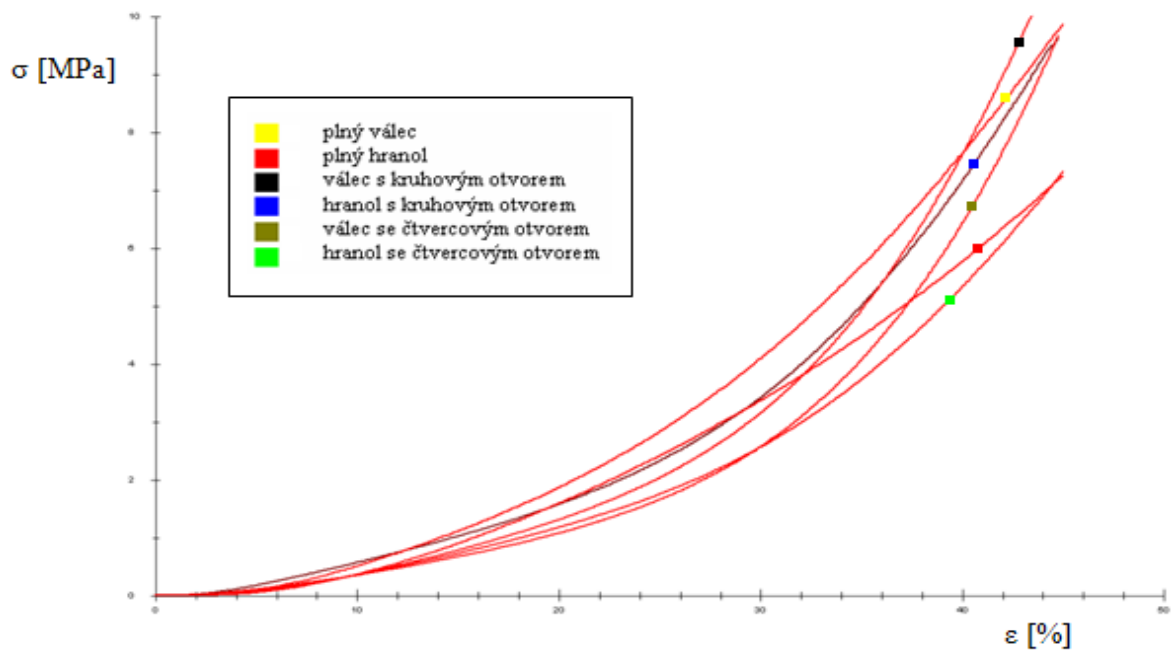
14.3 Srovnání vlivů teplot, tvarů a výšek z naměřených grafů závislosti napětí na poměrném stlačení

14.3.1 Srovnání při T_1 a h_1 , pro všechny tvary

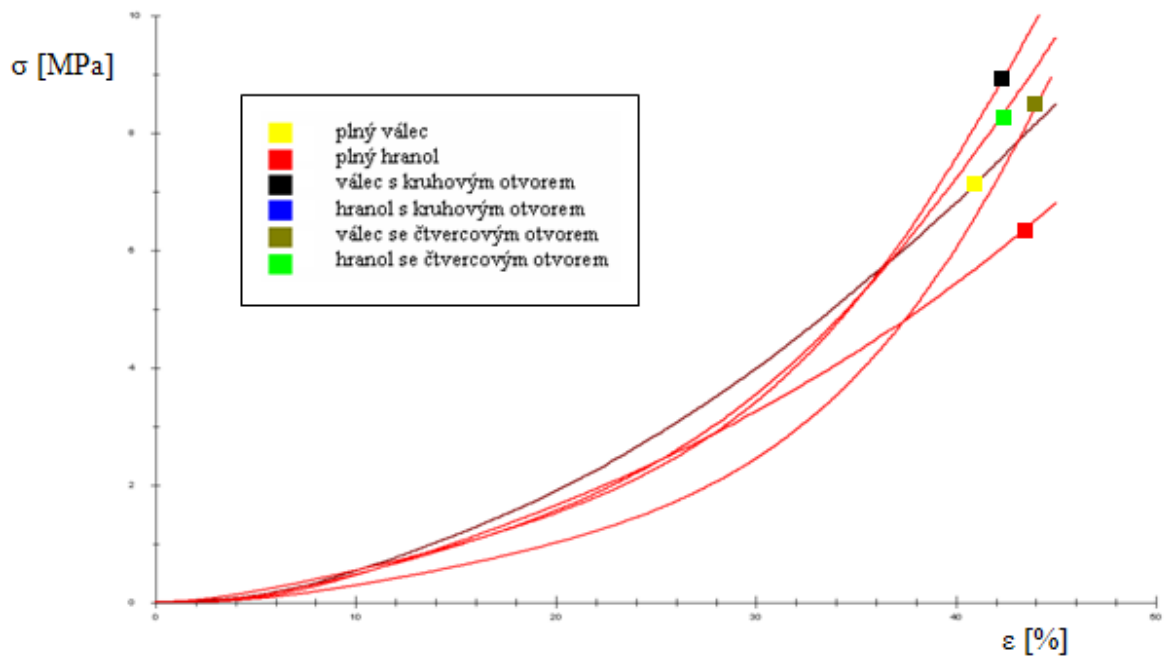


Obr. 37. Graf srovnání všech tvarů při okolní teplotě 20°C a výškách 10mm

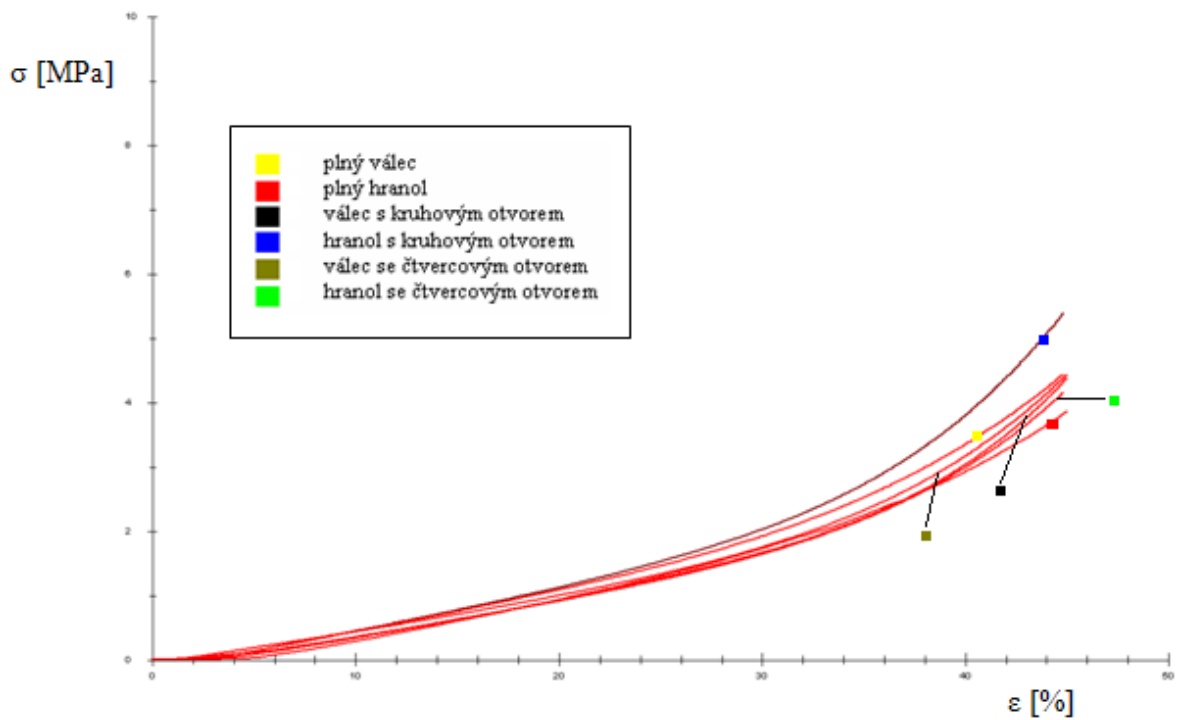
14.3.2 Srovnání T_2 a h_1 , pro všechny tvary



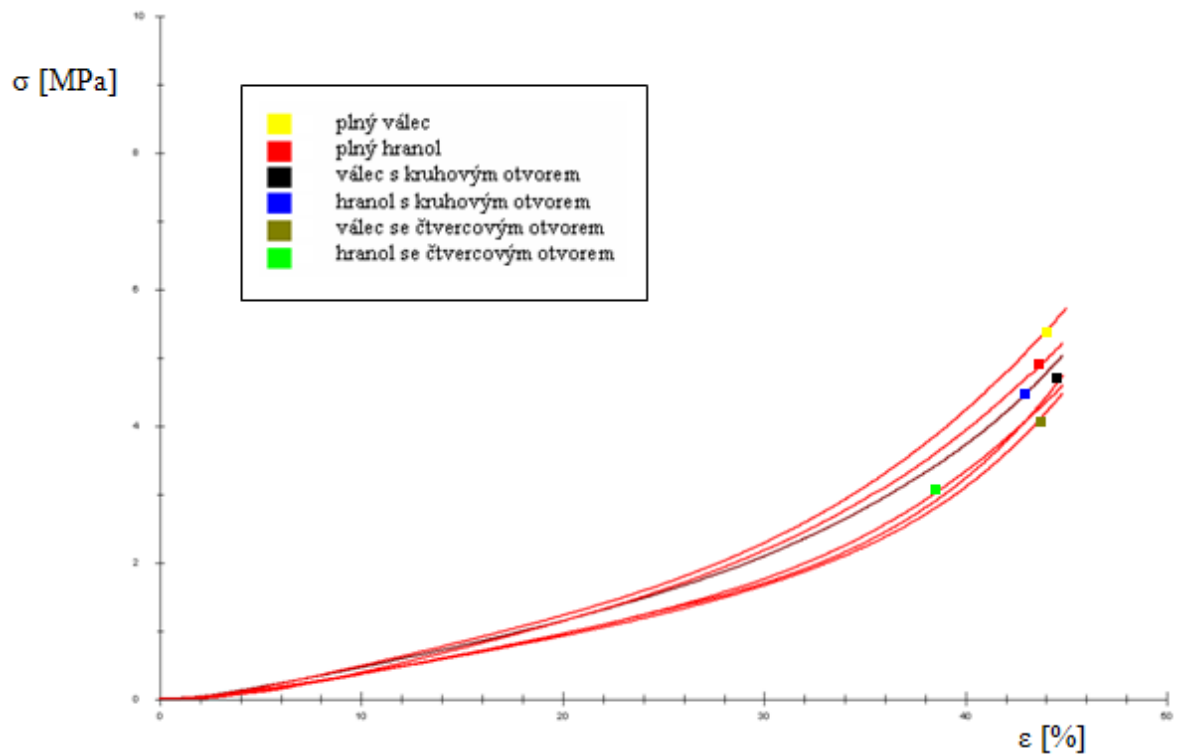
Obr. 38. Graf srovnání všech tvarů při teplotě 60°C a výškách 10mm

14.3.3 Srovnání T_3 a h_1 , pro všechny tvary

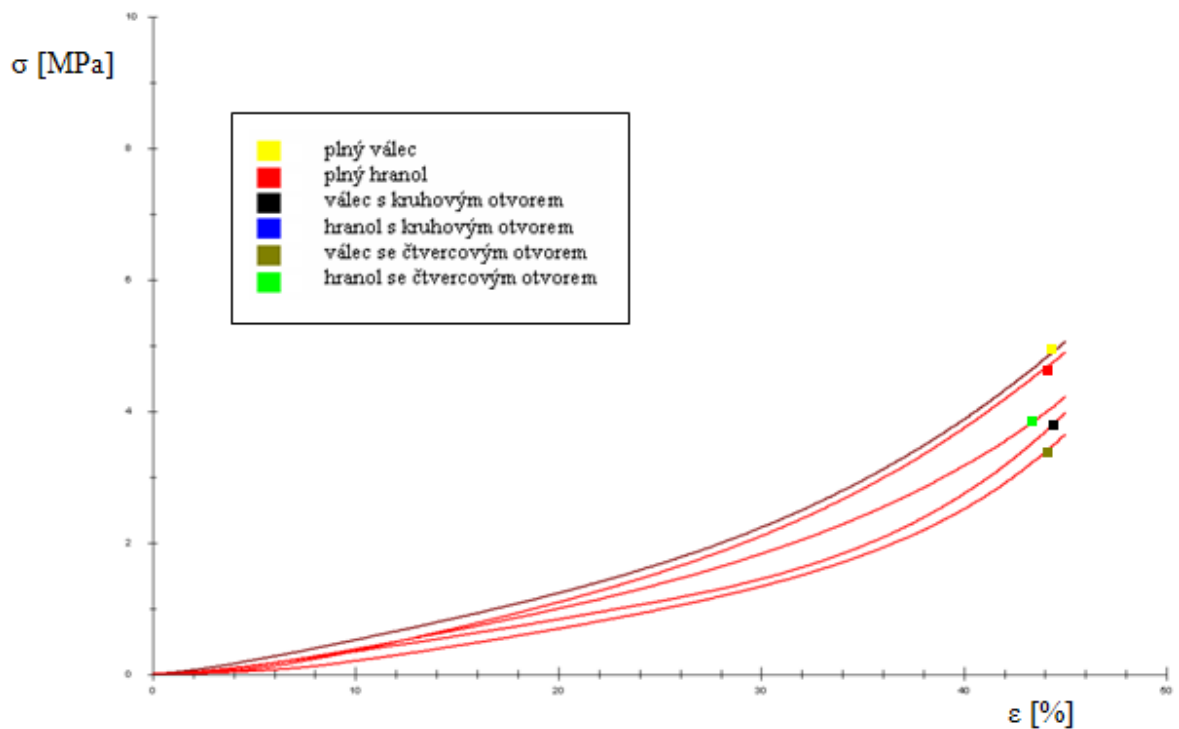
Obr. 39. Graf srovnání všech tvarů při teplotě 100°C a výškách 10mm

14.3.4 Srovnání T_1 a h_2 , pro všechny tvary

Obr.40. Graf srovnání všech tvarů při okolní teplotě 20°C a výškách 20mm

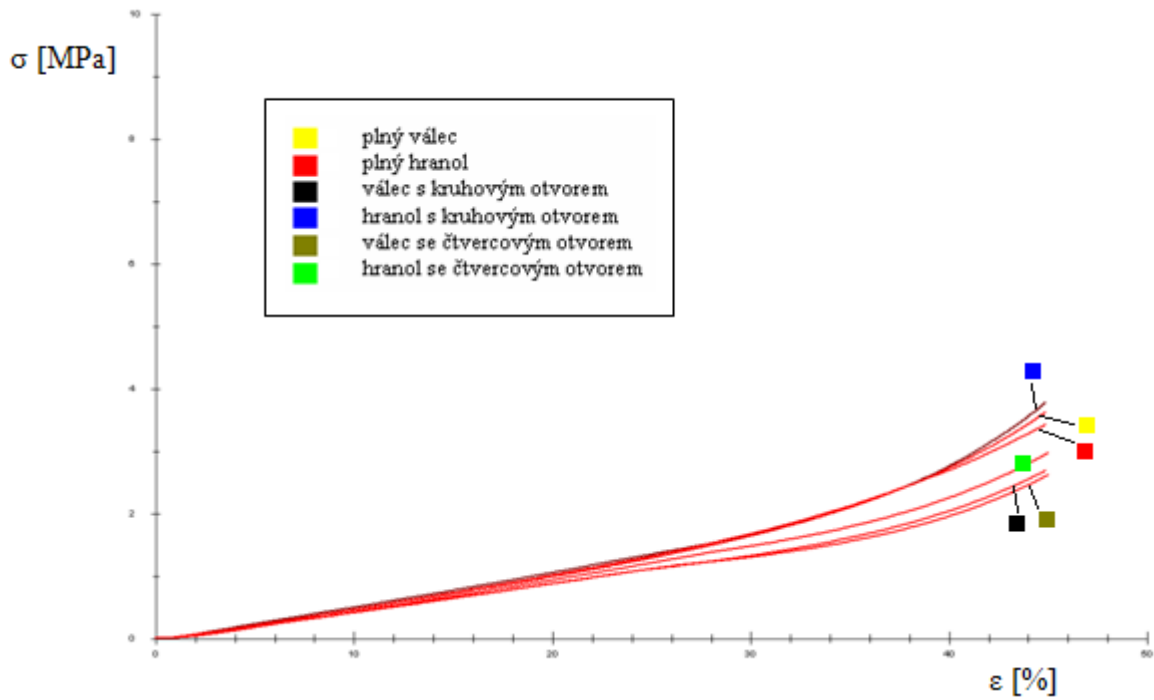
14.3.5 Srovnání T_2 a h_2 , pro všechny tvary

Obr. 41. Graf srovnání všech tvarů při teplotě 60°C a výškách 20mm

14.3.6 Srovnání T_3 a h_2 , pro všechny tvary

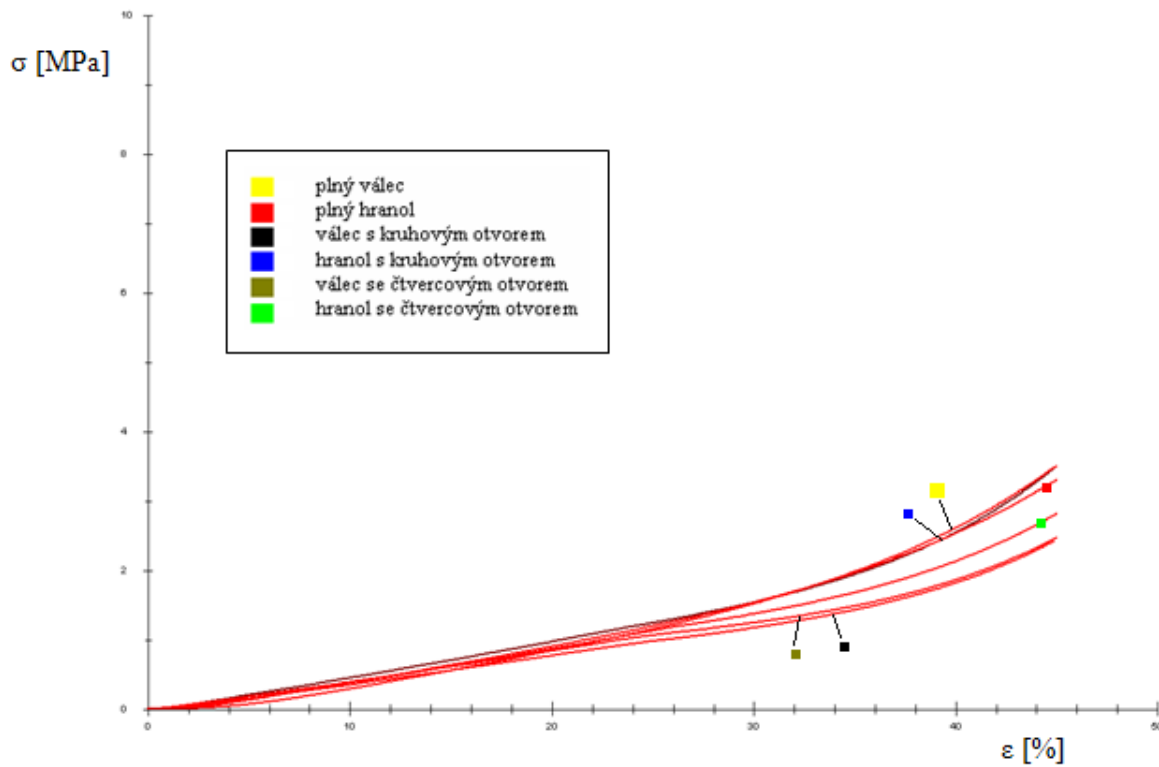
Obr. 42. Graf srovnání všech tvarů při teplotě 100°C a výškách 20mm

14.3.7 Srovnání T_1 a h_3 , pro všechny tvary



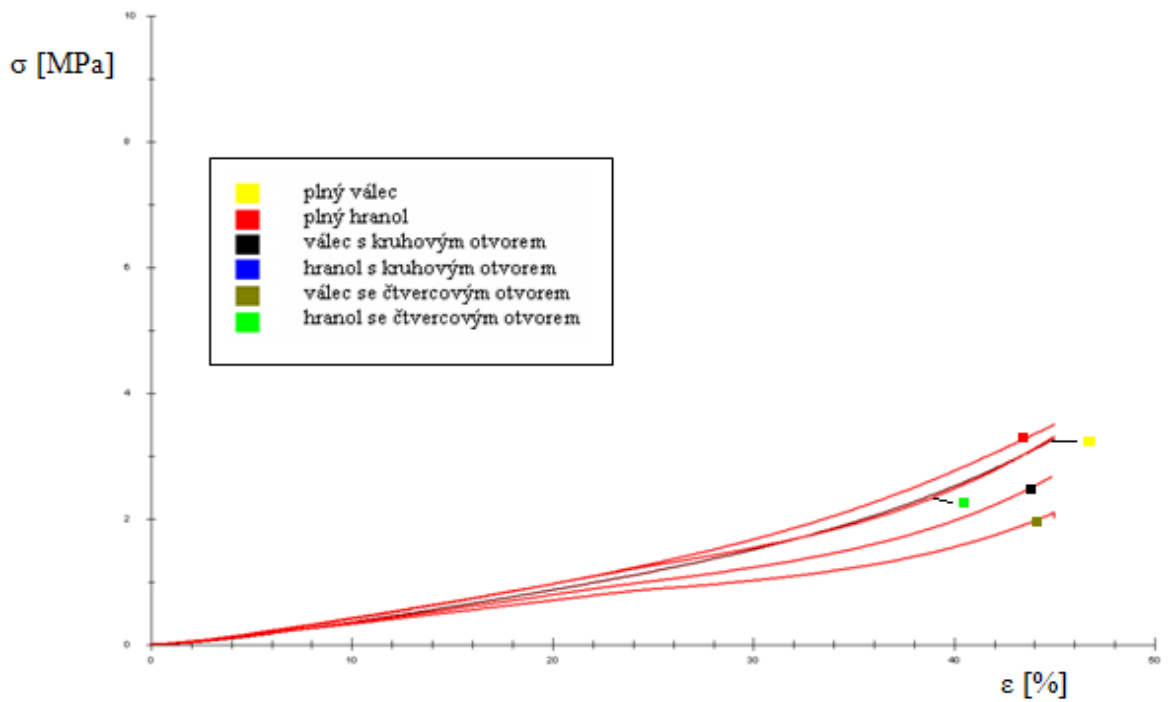
Obr. 43. Graf srovnání všech tvarů při okolní teplotě 20°C a výškách 30mm

14.3.8 Srovnání T_2 a h_3 , pro všechny tvary



Obr.44. Graf 10. Srovnání všech tvarů při teplotě 60°C a výškách 30mm

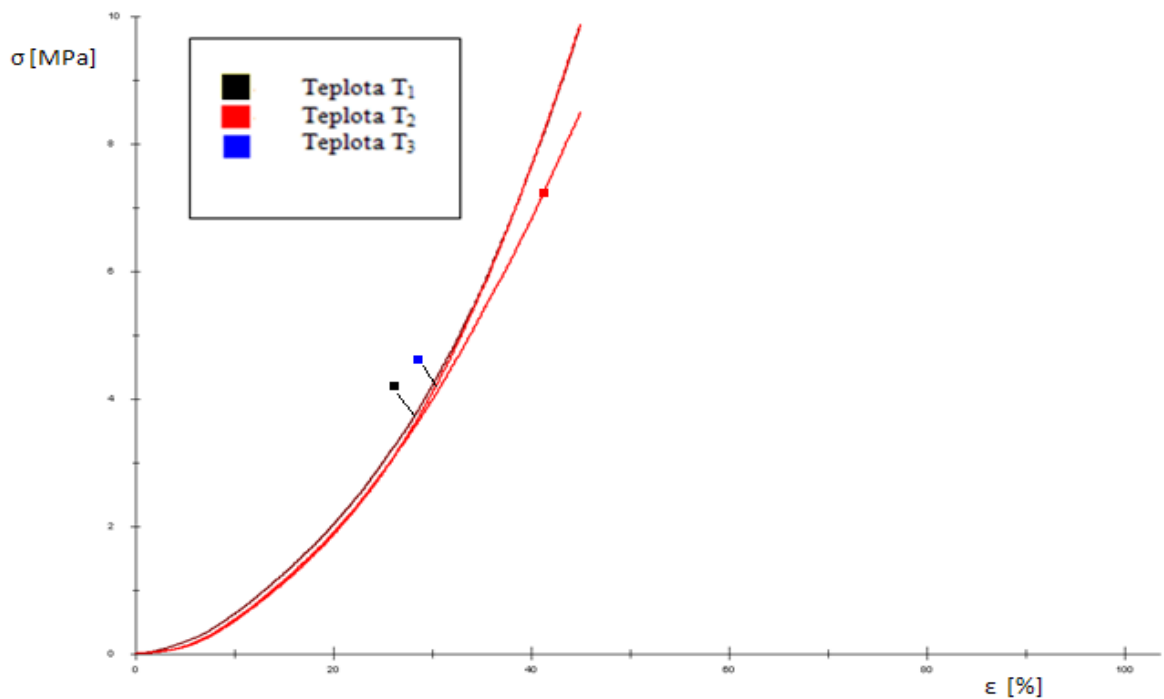
14.3.9 Srovnání T_3 a h_3 , pro všechny tvary



Obr. 45. Graf srovnání všech tvarů při teplotě 100°C a výškách 30mm

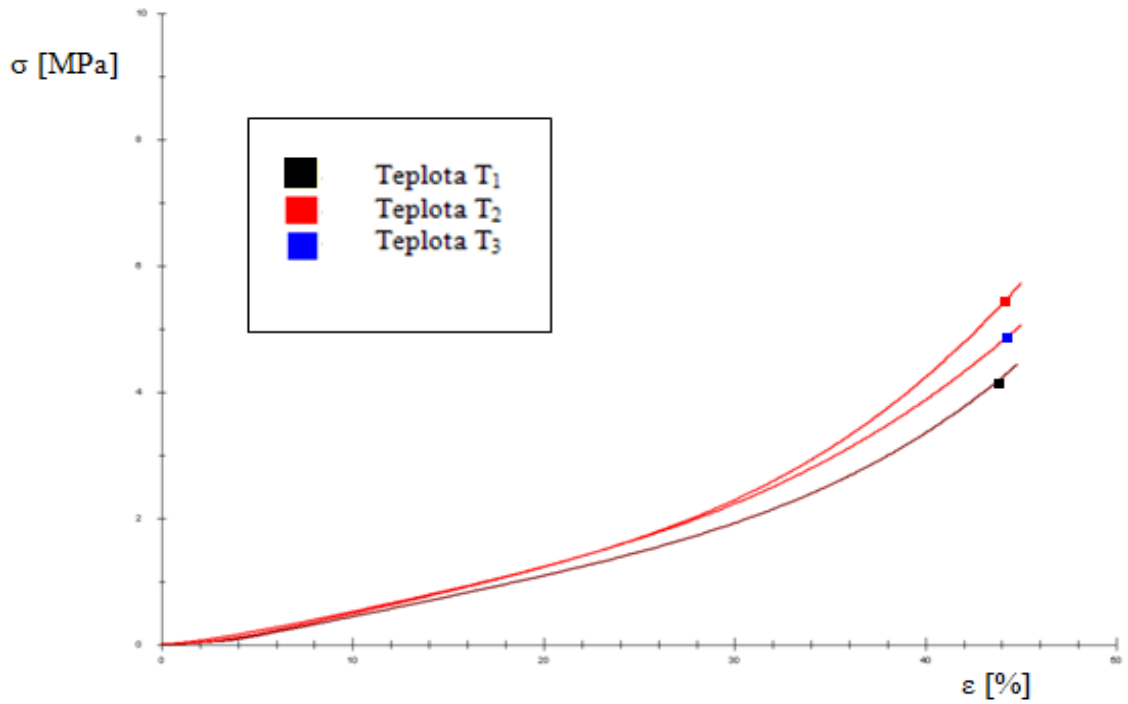
14.3.10 Plný váleček: srovnání výšky h_x při všech teplotách

a) Srovnání h_1 při T_1, T_2, T_3



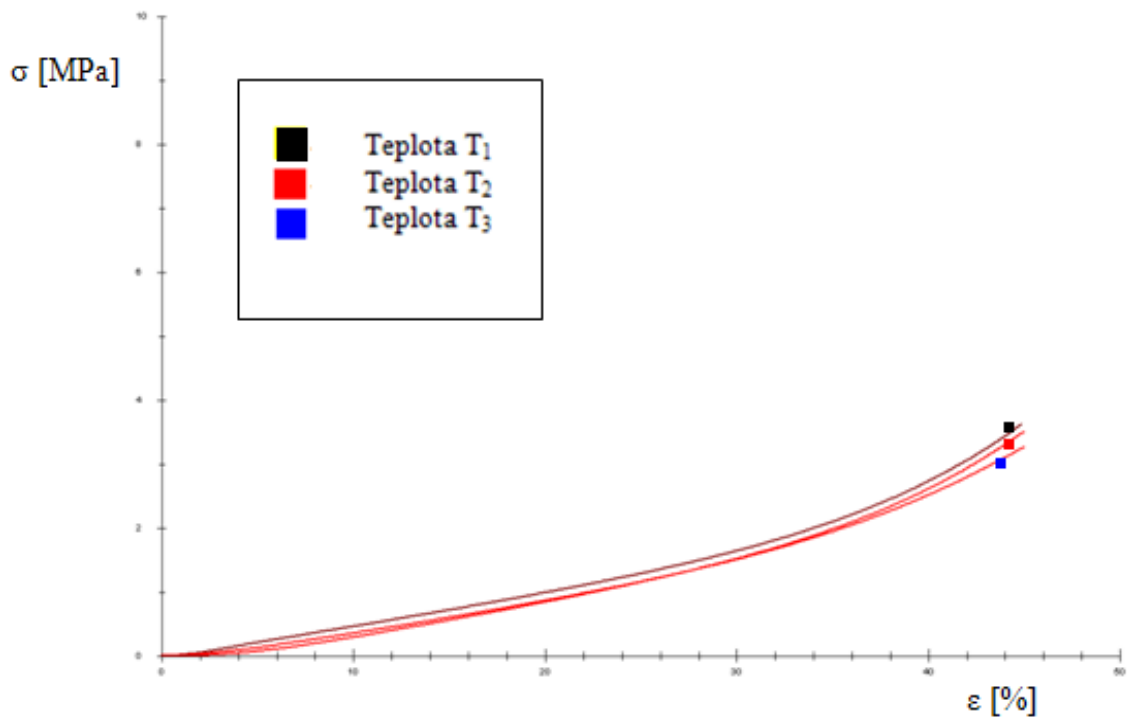
Obr. 46. Graf srovnání všech teplot (20, 60, 100°C) při výškách 10mm

b) Srovnání h_2 při T_1, T_2, T_3

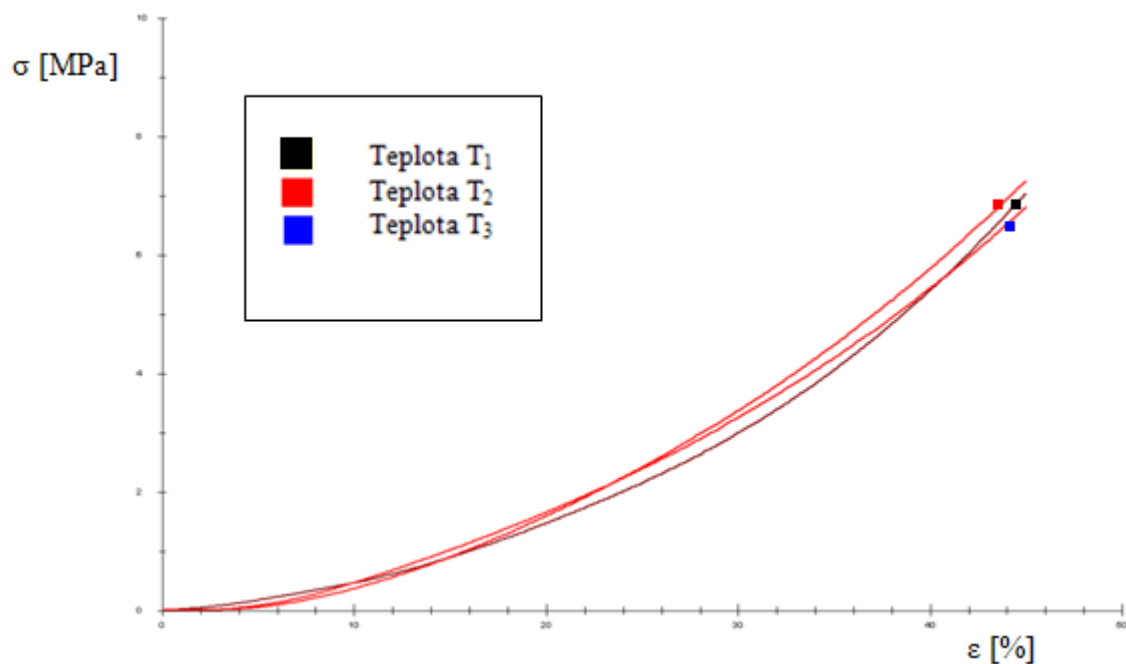


Obr. 47. Graf srovnání všech teplot (20, 60, 100°C) při výškách 20mm

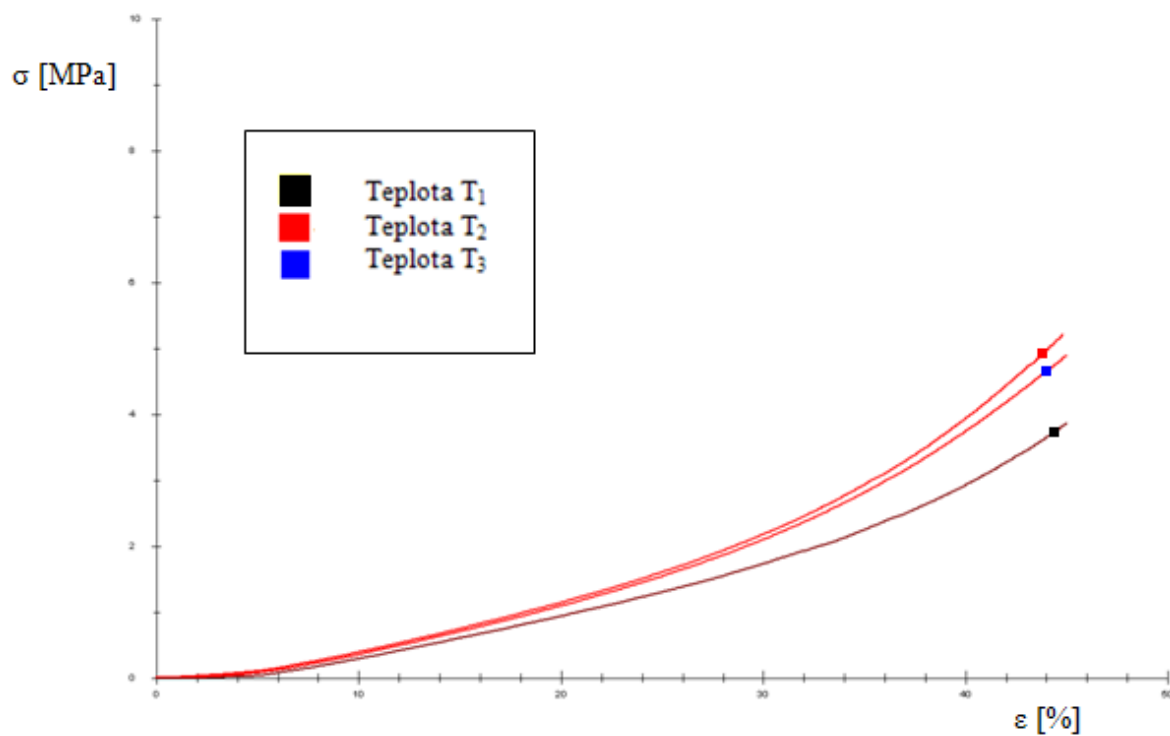
c) Srovnání h_3 při T_1, T_2, T_3



Obr. 48. Graf srovnání všech teplot (20, 60, 100°C) při výškách 30mm

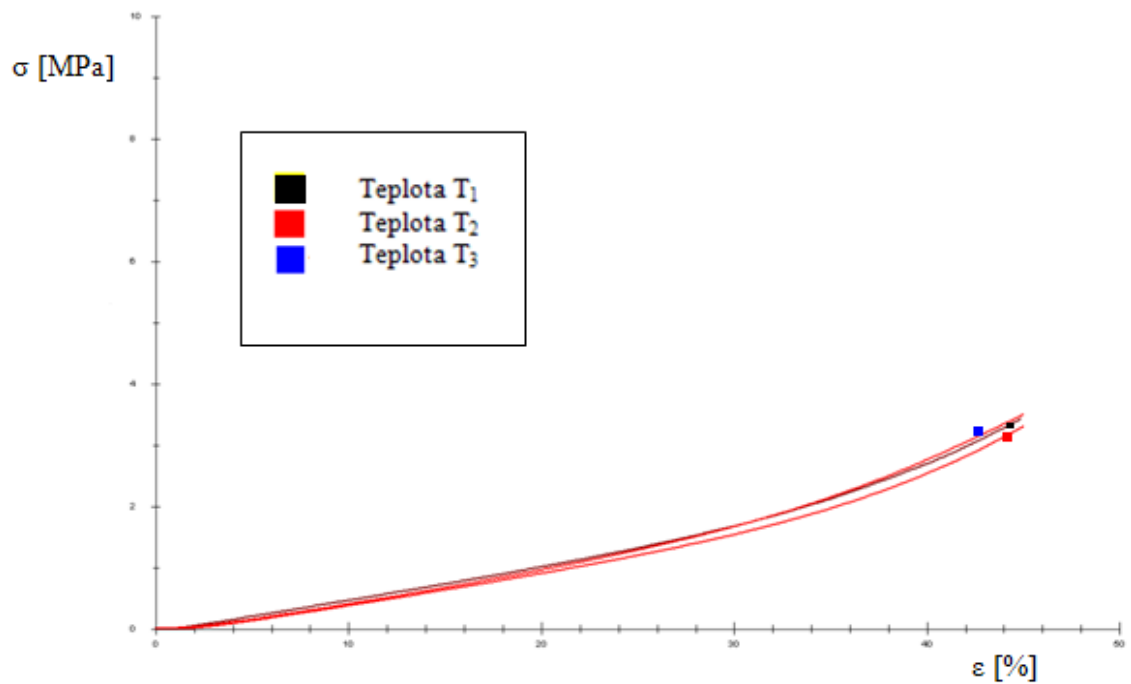
14.3.11 Plný hranol: srovnání výšky h_x při všech teplotácha) Srovnání h_1 při T_1, T_2, T_3 

Obr.49. Graf srovnání všech teplot (20, 60, 100°C) při výškách 10mm

b) Srovnání h_2 při T_1, T_2, T_3 

Obr. 50. Graf srovnání všech teplot (20, 60, 100°C) při výškách 20mm

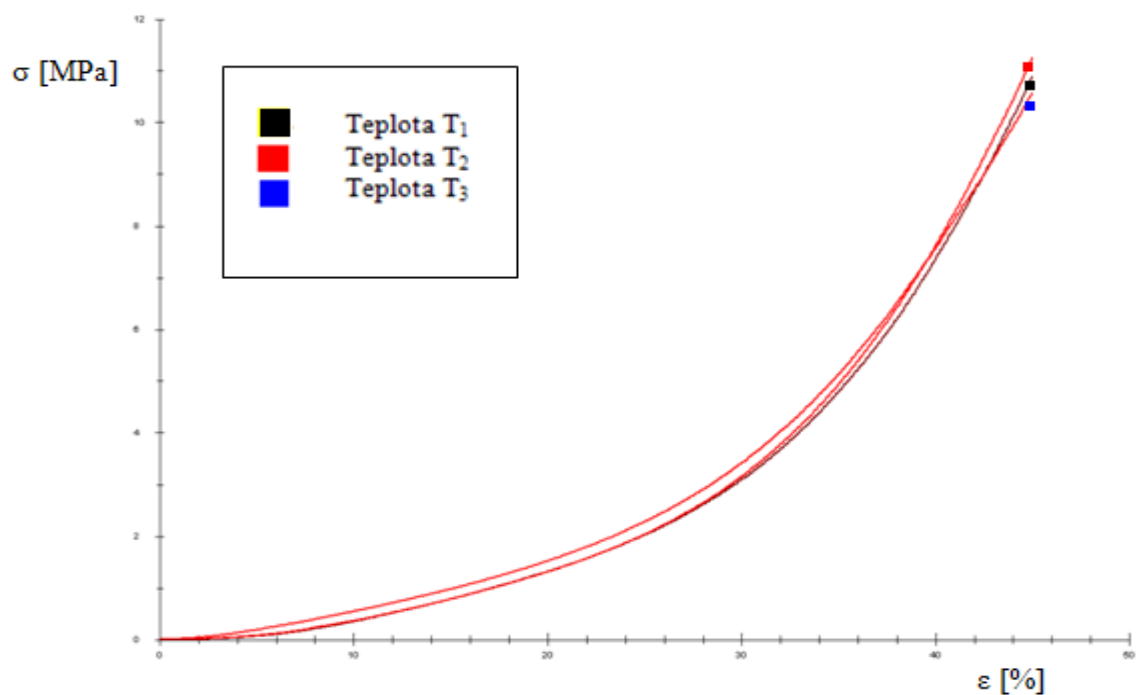
c) Srovnání h_3 při T_1, T_2, T_3



Obr. 51. Graf srovnání všech teplot (20, 60, 100°C) při výškách 30mm

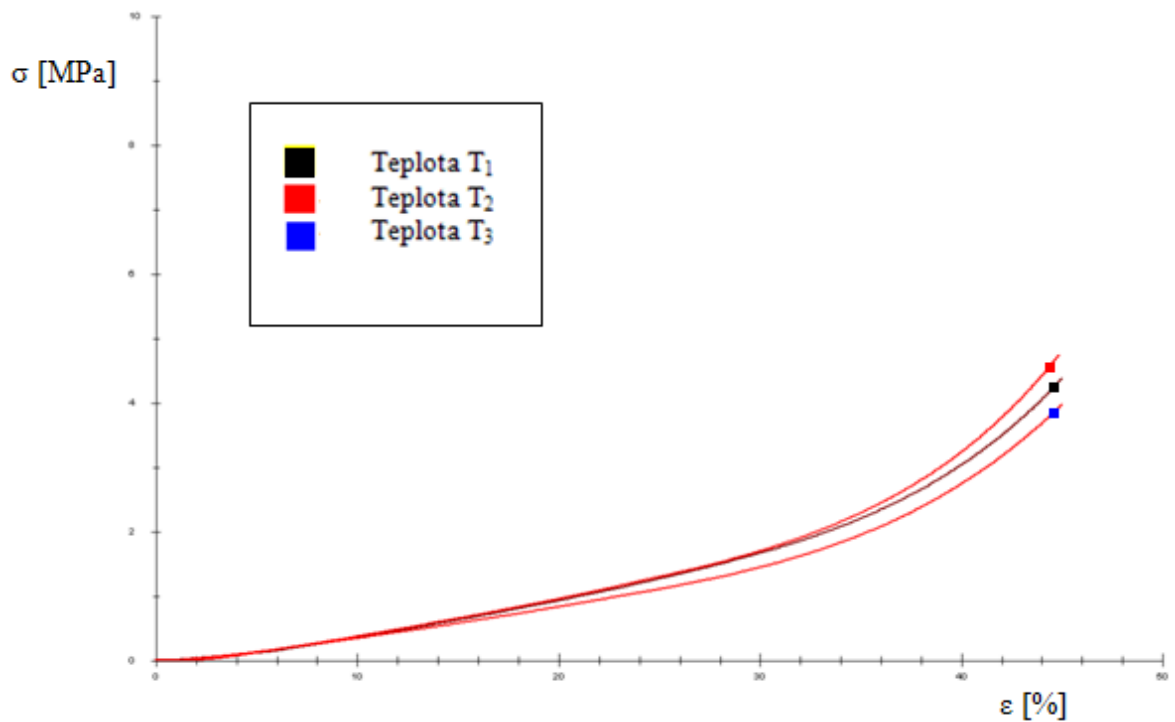
14.3.12 Válec s kulatým otvorem: srovnání výšky h_x při všech teplotách

a) Srovnání h_1 při T_1, T_2, T_3



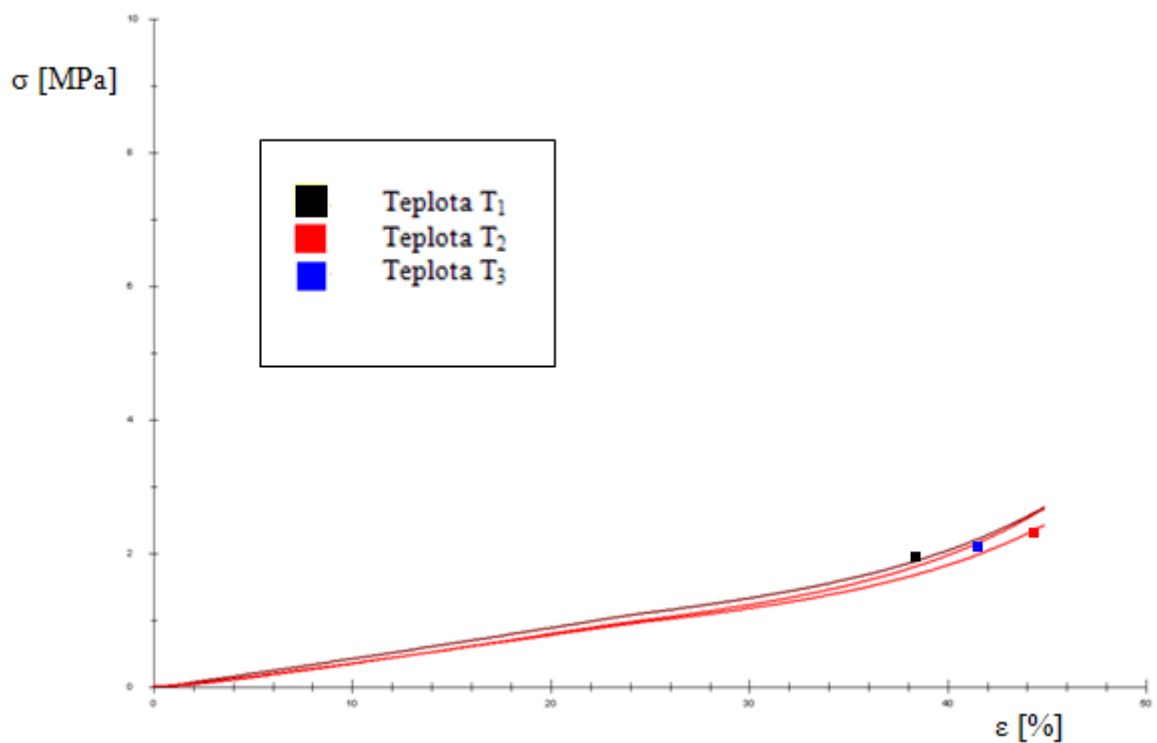
Obr. 52. Graf srovnání všech teplot (20, 60, 100°C) při výškách 10mm

b) Srovnání h_2 při T_1, T_2, T_3

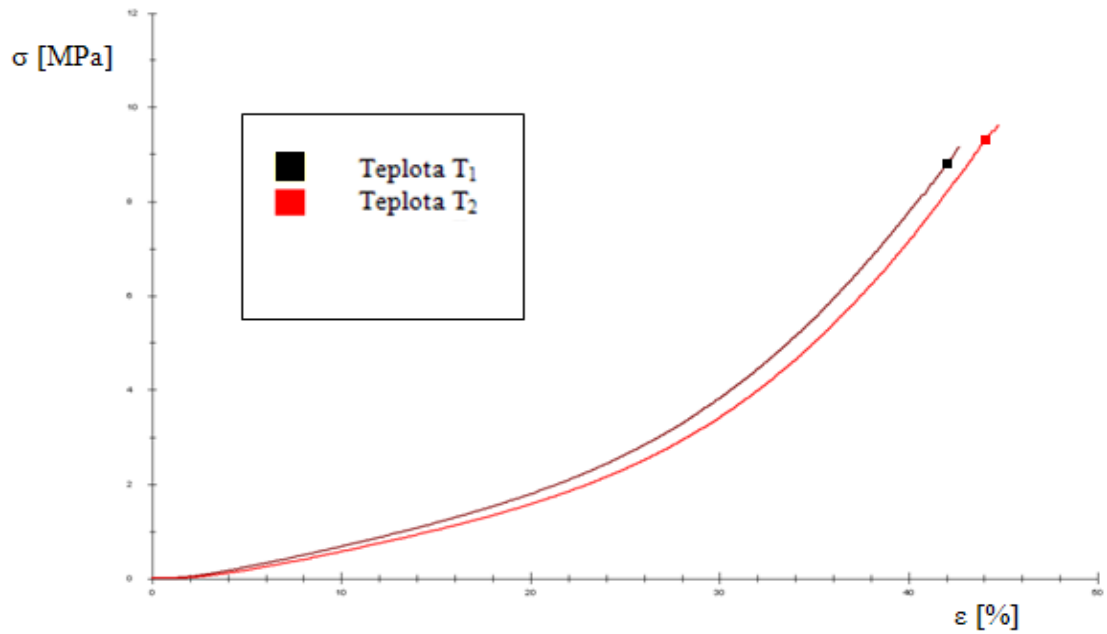
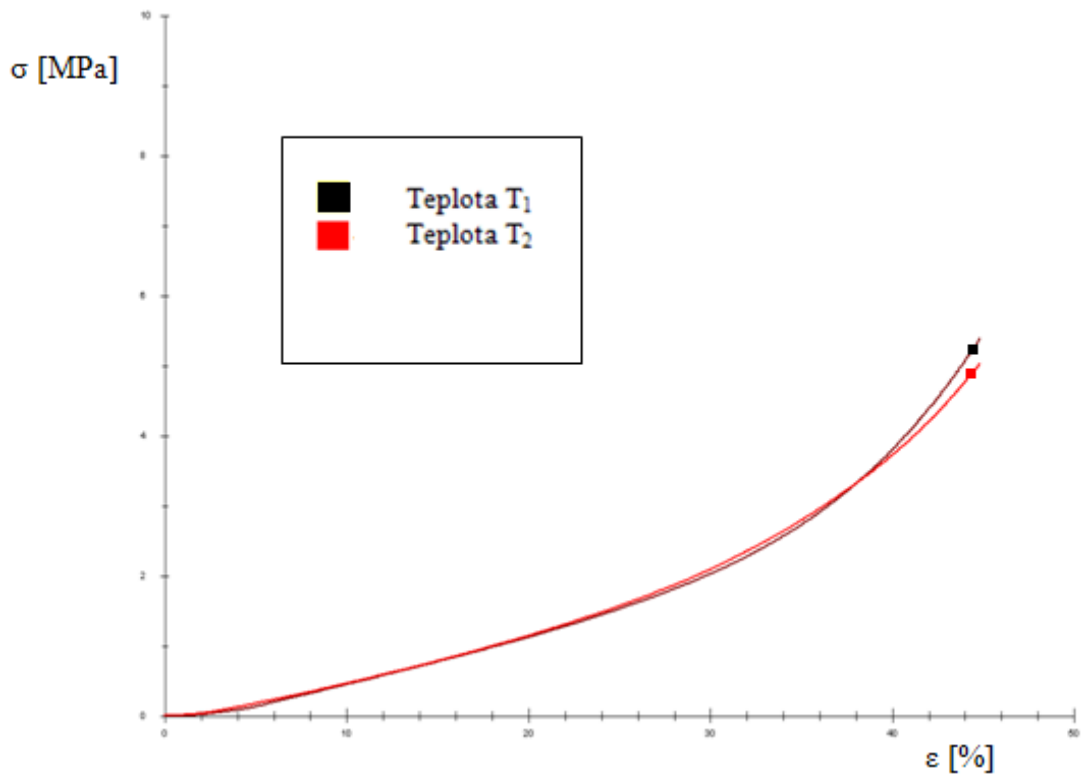


Obr. 53. Graf srovnání všech teplot (20, 60, 100°C) při výškách 20mm

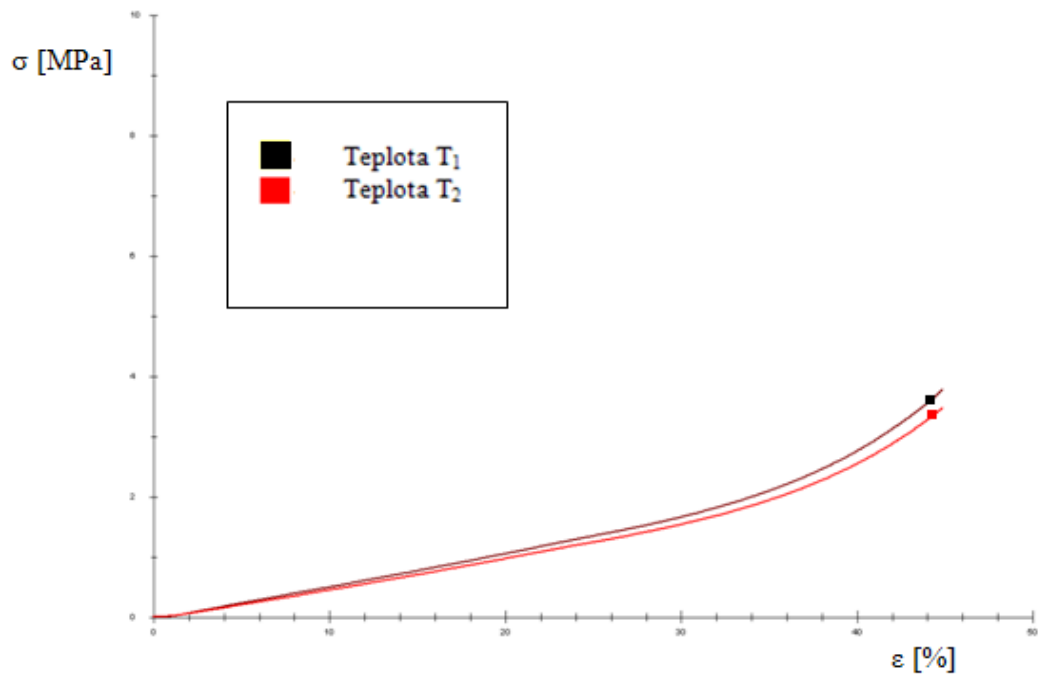
c) Srovnání h_3 při T_1, T_2, T_3



Obr. 54. Graf srovnání všech teplot (20, 60, 100°C) při výškách 30mm

14.3.13 Hranol s kulatým otvorem: srovnání výšky h_x při všech teplotácha) Srovnání h_1 při T_1, T_2 *Obr. 55. Graf srovnání všech teplot (20, 60°C) při výškách 10mm*b) Srovnání h_2 při T_1, T_2 *Obr. 56. Graf srovnání všech teplot (20, 60°C) při výškách 20mm*

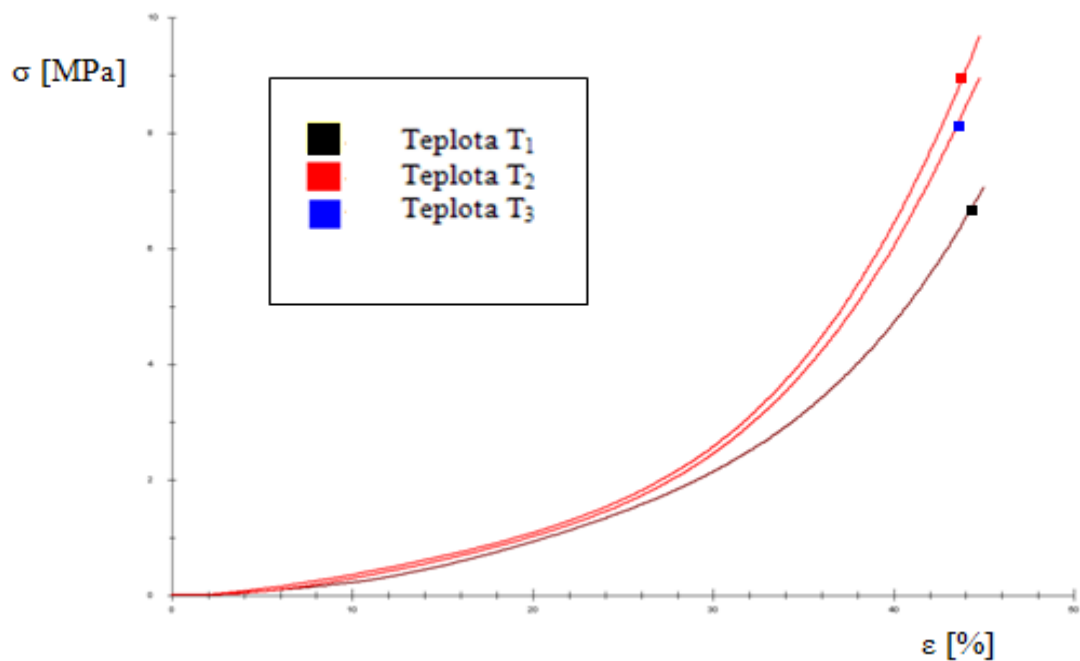
c) Srovnání h_3 při T_1, T_2



Obr. 57. Graf srovnání všech teplot (20, 60°C) při výškách 30mm

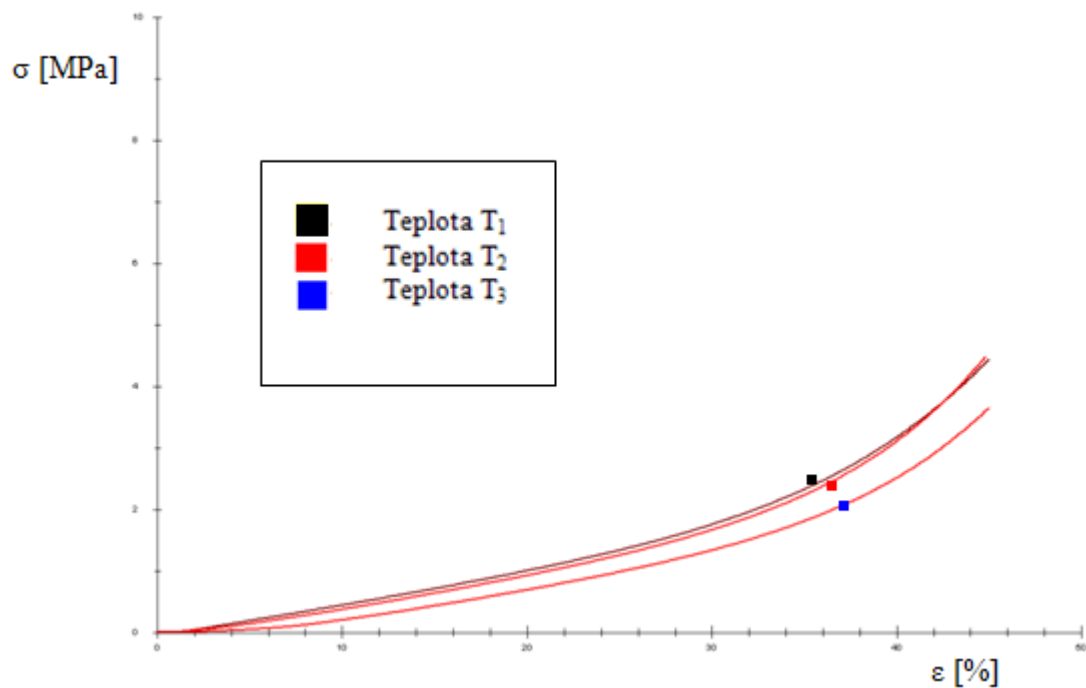
14.3.14 Válec se čtvercovým otvorem: srovnání výšky h_x při všech teplotách

a) Srovnání h_1 při T_1, T_2, T_3



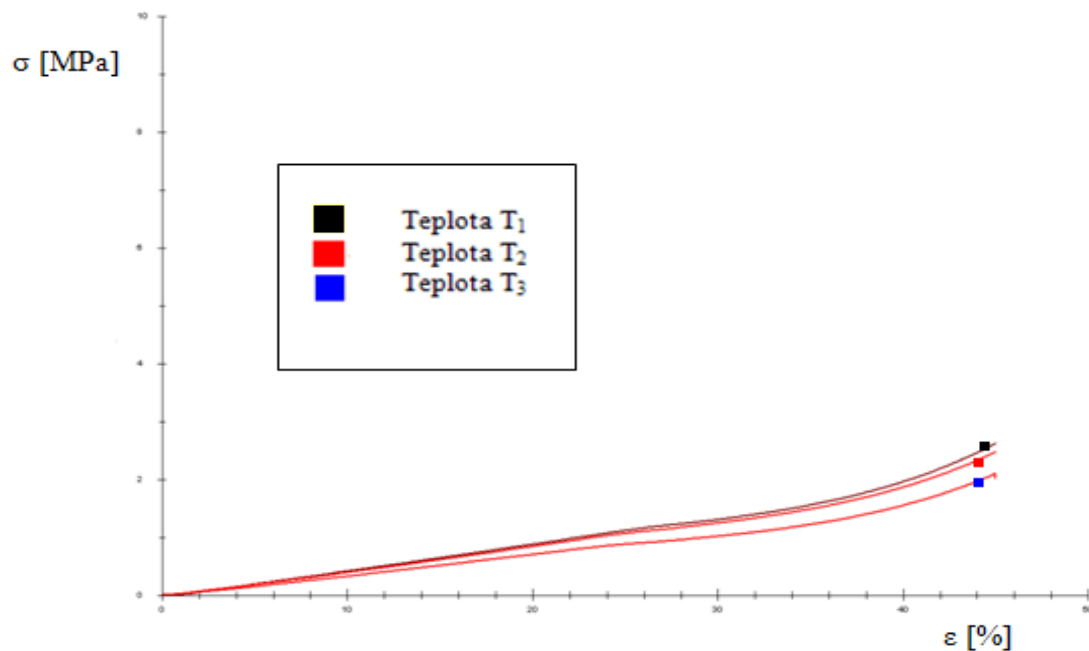
Obr. 58. Graf srovnání všech teplot (20, 60, 100°C) při výškách 10mm

b) Srovnání h_2 při T_1, T_2, T_3

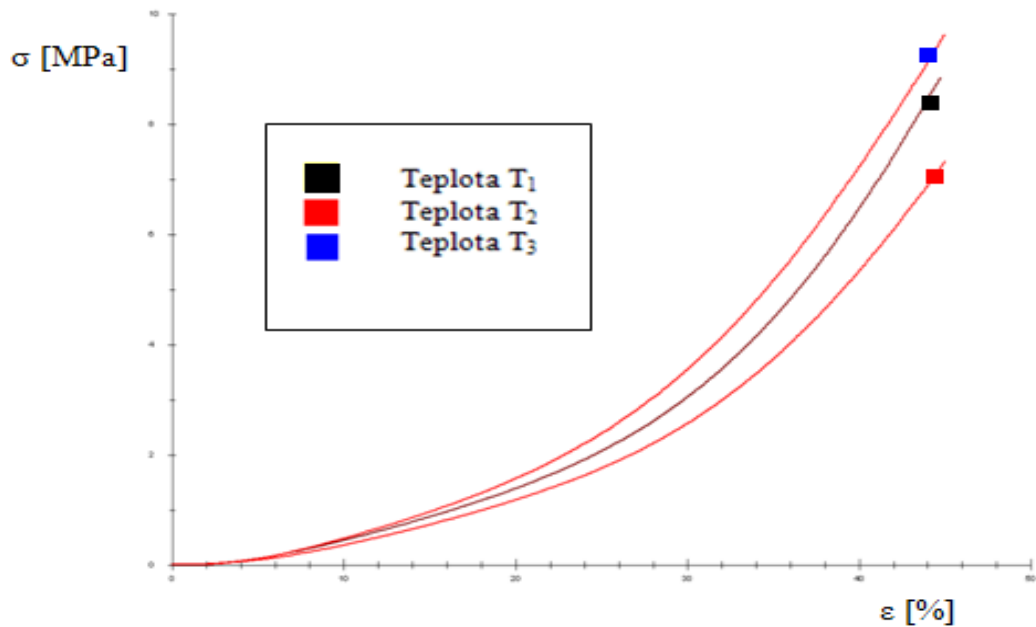


Obr. 59. Graf srovnání všech teplot (20, 60, 100°C) při výškách 20mm

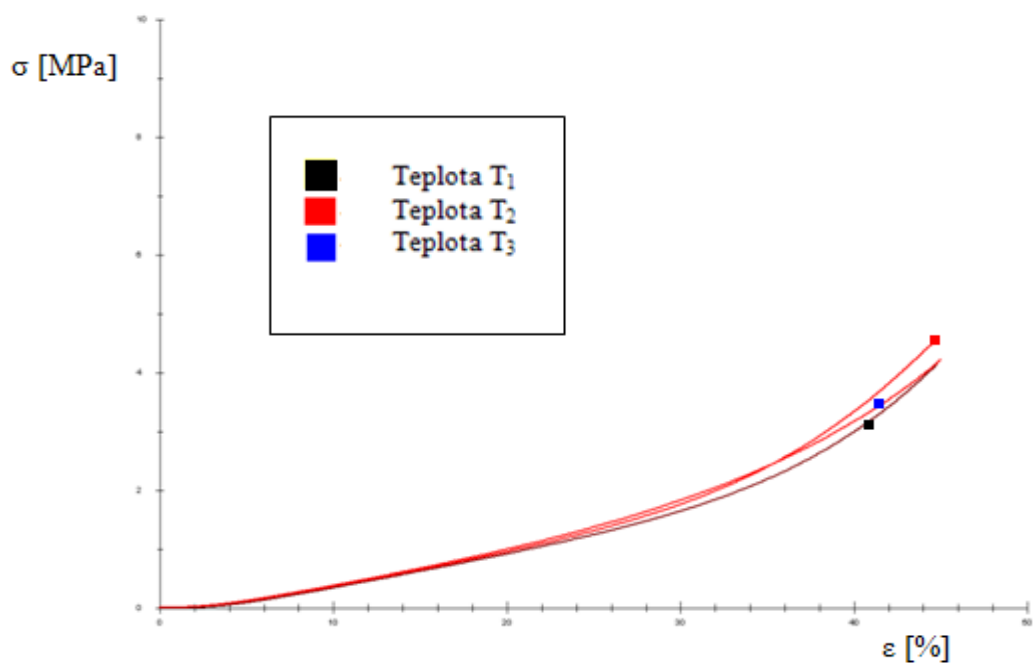
c) Srovnání h_3 při T_1, T_2, T_3



Obr. 60. Graf srovnání všech teplot (20, 60, 100°C) při výškách 30mm

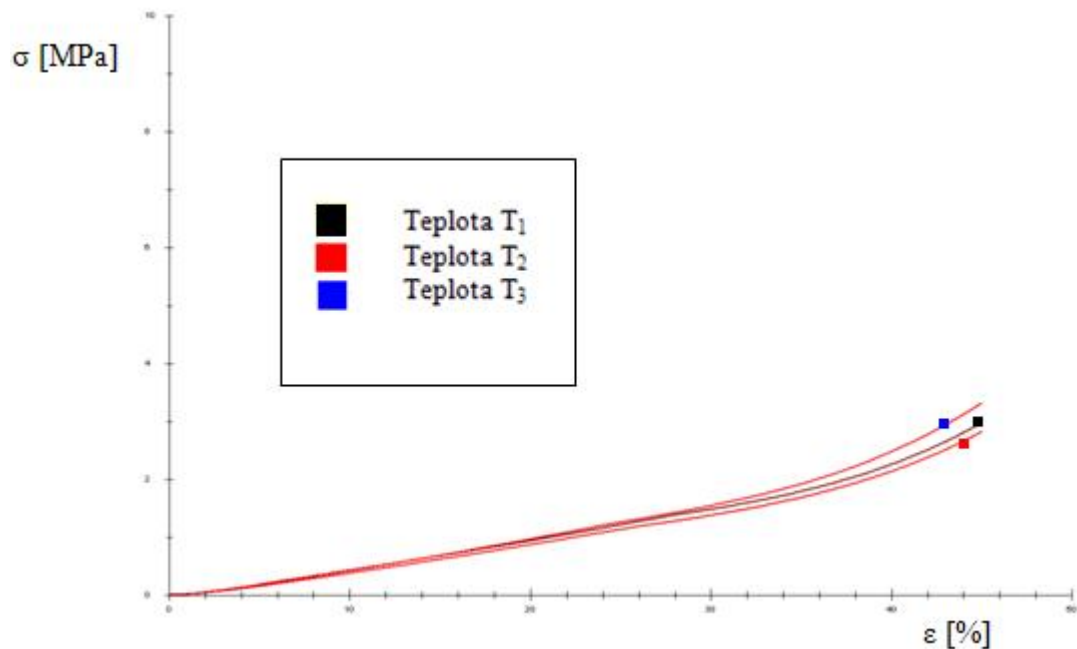
14.3.15 Hranol se čtvercovým otvorem: srovnání výšky h_x při všech teplotácha) Srovnání h_1 při T_1, T_2, T_3 

Obr. 61. Graf srovnání všech teplot (20, 60, 100°C) při výškách 10mm

b) Srovnání h_2 při T_1, T_2, T_3 

Obr. 62. Graf srovnání všech teplot (20, 60, 100°C) při výškách 20mm

c) Srovnání h_3 při T_1, T_2, T_3



Obr. 63. Graf srovnání všech teplot (20, 60, 100°C) při výškách 30mm

Z uspořádání srovnávacích grafů je možno pozorovat vliv tvaru zkušebních těles a vliv teploty.

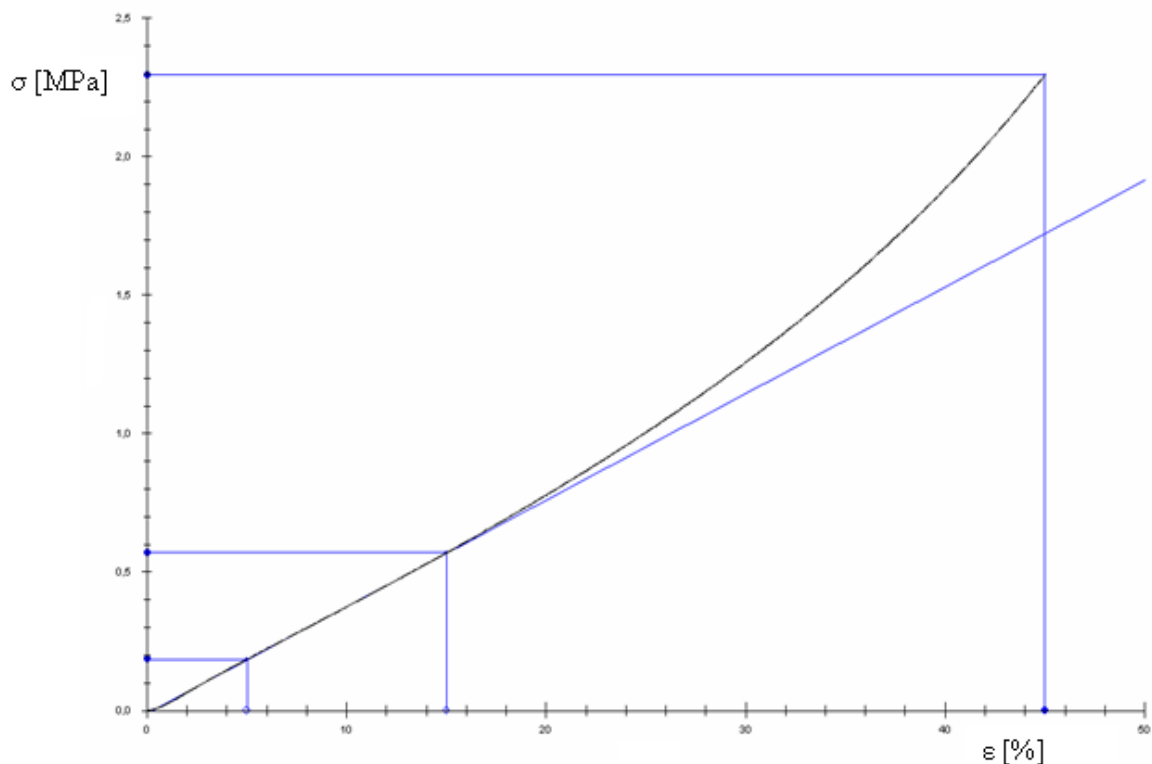
Na obr. 37 až 39 lze vidět výrazný vliv tvaru na zjišťovanou závislost σ, ε . Velká hodnota tvarového faktoru zapříčinila největší rozdíly mezi naměřenými závislostmi pro výšku těles h_1 při teplotě T_1 , kde se jako nejvíce tuhý jeví plný válec. U těles s výškou 20mm, tzn. s nižším tvarovým faktorem, lze pozorovat na obr. 40 až 42 menší rozdíly mezi naměřenými závislostmi a nejméně měl tvar těles vliv na naměřené závislosti na obr. 43 až 45, kde pro tělesa s výškou 30mm, byla hodnota tvarového faktoru nejmenší.

Vliv teploty lze sledovat na obr. 46 až 63, které ukazují, že na mechanické zkoušky byl vliv teploty nevýrazný. V některých případech lze pozorovat zvýšení tuhosti s rostoucí teplotou, ale to můžeme přisuzovat zřejmě i jiným vlivům, jako např. kvalita spojení pryžkov, nerovnost povrchu těles nebo jejich špatná homogenita.

Všechny grafické závislosti byly naměřeny při kladných teplotách. Vliv záporných teplot nebyl v tomto případě zkoumán a mohl by se stát námětem pro další práci.

15 POROVNÁNÍ VÝLEDKŮ Z MODELU A EXPERIMENTÁLNÍHO MĚŘENÍ PRO PLNÝ VÁLEC

Zde jsou srovnány naměřené výsledky z tlakové zkoušky na zkušebním stroji Zwick 1456 s výsledky z programu COSMOS, pro plný válec $\varnothing D = 49\text{mm}$ a výšky h_1, h_3 . Modul pružnosti v tlaku byl pro potřebné výpočty určen z grafu na obr. 64. a jeho hodnota činí $E = 3,85\text{MPa}$. Výška zkušebního tělesa pro určení modulu E byla $h = 60\text{mm}$ a šlo o nevázanou tlakovou pružinu kruhového průřezu s nalubrikovanými zatěžovanými plochami, aby bylo zabráněno tření.

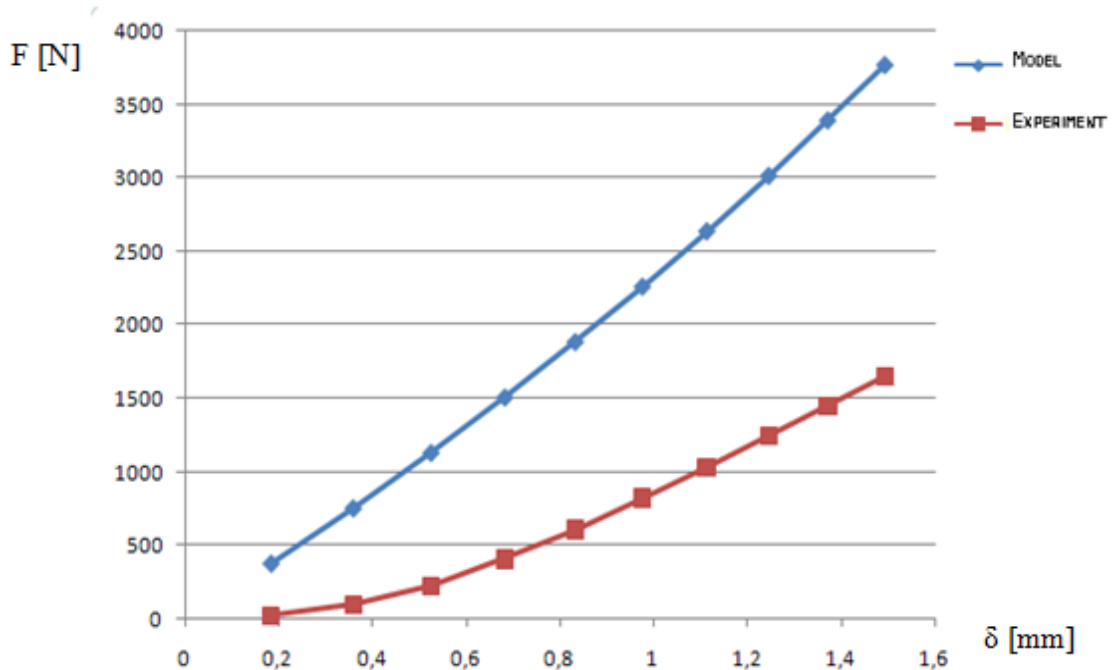


Obr. 64. Graf pro určení modulu pružnosti tlaku

15.1 Srovnání model – experiment pro plný válec výšky h_1

Obr. 65. ukazuje závislosti sil F_M vypočtených z modelu a sil F_E odečtených z experimentálního měření, pro dané deformace δ . To, že se od sebe křivky výrazně liší, může způsobovat několik faktorů. Nejpravděpodobněji se jeví rozdíl v Poissonově poměru ν . V modelu byl použit Poissonův poměr blížíící se $\nu = 0.5$, ale Poissonův poměr zkušebních materiálů nebyl změřen. Byly známy pouze konstanty hyperelastického modelu Money – Rivlin. Malé rozdíly ν zapříčiňují velké rozdíly ve výpočtu deformací.

Dále může být jednou z příčin samotný tvarový faktor zkušebního tělesa. To znamená, že s rostoucím tvarovým faktorem, se modelové výsledky výrazně liší od výsledků reálných. Ale nejednoznačnost výsledků by bylo potřeba ještě prověřit.



Obr. 65. Graf srovnání závislosti síly na deformaci pro h_1

Tab. 10. Srovnávací tabulka s hodnotami síly a deformace pro h_1

F_M [N]	377,15	754,29	1131,44	1508,59	1885,74	2262,89	2640,04	3017,19	3394,33	3771,48
F_E [N]	29,53	105,09	232,94	413,56	614,59	826,88	1038,07	1249,63	1454,26	1653,15
δ [mm]	0,1856	0,3608	0,5267	0,6842	0,8343	0,9776	1,115	1,247	1,373	1,495

15.1.1 Srovnání tuhostí model – experiment pro výšku h_1 podle zvolené síly

Pro srovnání tuhostí obou tlakových pružin model – experiment byla zvolena jedna síla jejichž hodnota činí $F = 3771,48\text{N}$ a k této síle byly vyhledány deformace, pro model je hodnota deformace $\delta_1 = 1,495\text{mm}$ a pro experiment $\delta_2 = 3,65\text{mm}$. Tuhost pružiny se spočítá podle vztahu:

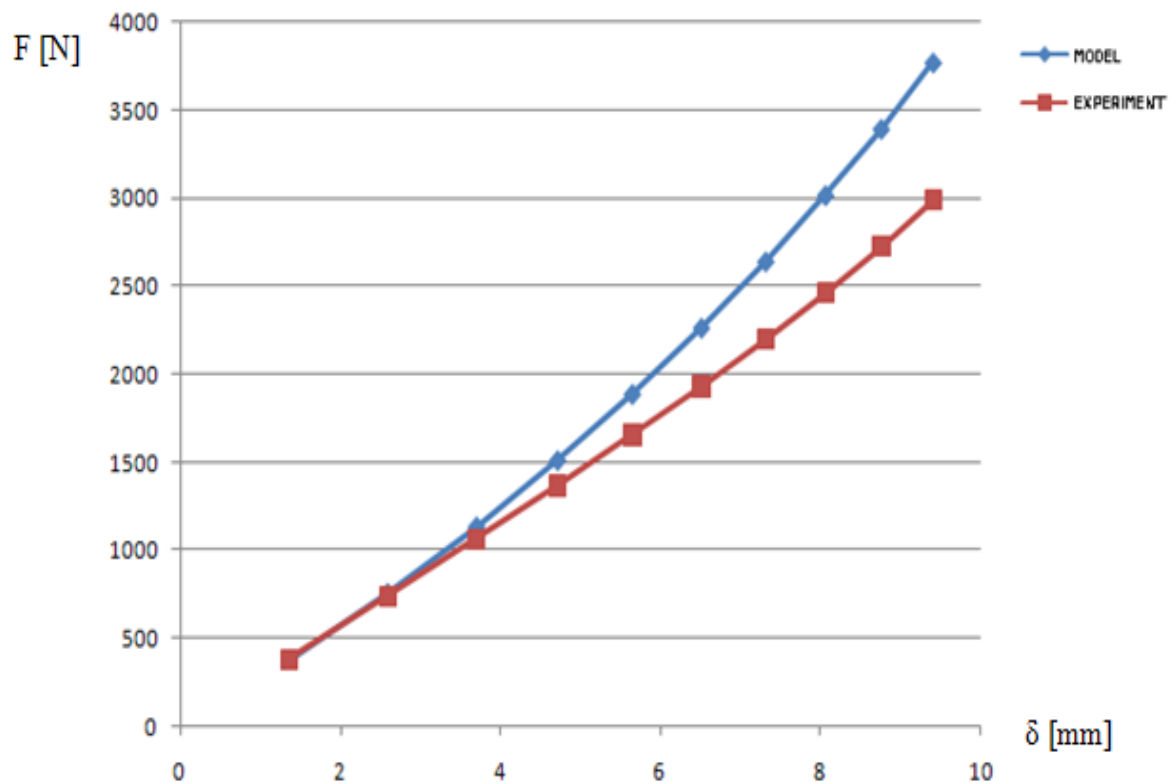
$$K_x = \frac{F}{\delta_x} \quad (36)$$

Tab. 11. Srovnávací tabulka tuhostí pro výšku h_1

Model – K_1 [N/mm]	Experiment – K_2 [N/mm]
2522,73	1033,28

15.2 Srovnání model – experiment pro plný válec výšky h_3

Obr. 66. ukazuje závislosti sil F_M vypočtených z modelu a sil F_E odečtených z experimentálního měření, pro dané deformace δ . Křivky se od sebe liší jen nepatrně. Z toho vyplývá, že u těles s malým tvarovým faktorem se reálné výsledky výrazně neliší od výsledků modelových, a kdyby se tvarový faktor dále zmenšoval, rozdíl by se zřejmě ještě více snížil. Teoreticky je rozdíl zřejmě zapříčiněn Poissonovým poměrem ν jako v předešlém případě.

Obr. 66. Graf srovnání závislosti síly na deformaci pro h_3

Tab. 12. Srovnávací tabulka s hodnotami síly a deformace pro h_3

F_M [N]	377,15	754,29	1131,44	1508,59	1885,74	2262,89	2640,04	3017,19	3394,33	3771,48
F_E [N]	384,16	742,53	1065,9	1369,6	1657,73	1932,53	2200,62	2464,48	2726,65	2990,93
δ [mm]	1,364	2,5898	3,7	4,714	5,6475	6,511	7,3142	8,0616	8,758	9,4073

15.2.1 Srovnání tuhostí model – experiment pro výšku h_3 podle zvolené síly

Pro srovnání tuhostí obou pružin model – experiment byla zvolena jedna síla jejichž hodnota činí $F = 3771,48\text{N}$ a k této síle byly vyhledány deformace, pro model je hodnota deformace $\delta_1 = 9,4073\text{mm}$ a pro experiment $\delta_2 = 11,2\text{mm}$. Tuhost pružiny se spočítá podle vztahu:

$$K_x = \frac{F}{\delta_x} \quad (37)$$

Tab. 13. Srovnávací tabulka tuhostí pro výšku h_3

Model – K_1 [N/mm]	Experiment – K_2 [N/mm]
400,91	336,74

15.3 Srovnání tuhostí model – experiment z hlediska tvaru

Zde se při porovnání tuhostí, tlakových pružin o $\varnothing D = 49\text{mm}$ a výšky h_1, h_2 , model – experiment počítá s tvarovým faktorem f tělesa (tab. 1 až 6), kde se přes tvarovou funkci $\varnothing(f)$ (tab. 7) spočítá celková zatěžující síla F pro zvolenou deformaci δ .

15.3.1 Výpočet tuhostí model – experiment pro výšku h_1 a h_3

Nejprve se spočítá síla F_o , kterou zatěžují, při jednoosém tlaku nevázanou válcovou pružinu, kde za δ pro výšku $h_1 = 10\text{mm}$ dosadím v případě modelu $\delta = 1,495\text{mm}$ a experimentu $\delta = 3,65\text{mm}$ a pro výšku $h_3 = 30\text{mm}$ je pro model $\delta = 9,4073\text{mm}$, pro experiment $\delta = 11,2\text{mm}$:

$$F_o = \frac{\pi \cdot E \cdot \delta \cdot R^2}{h_x} \quad (38)$$

Pak celková síla F potřebná na stlačení pryžkovového válcového prvku se spočítá podle vztahu:

$$F = \phi(f) \cdot F_o \quad (39)$$

A tuhost jednotlivých pružin se spočítá jako poměr celkové síly ku jednotlivé deformaci:

$$K = \frac{F}{\delta} \quad (40)$$

Tab. 14. Srovnávací tabulka tuhostí pružin

Model		Experiment	
h_1	h_3	h_1	h_3
K [N/mm]			
2904,96	322,68	2904,96	322,68

Vypočtené tuhosti v tomto případě nevykazují žádný rozdíl.

ZÁVĚR

Teoretická část byla věnována studiu pryže. Bylo v ní popsáno co to pryž je, jak se vyrábí, recykluje a její rozdělení. Dále jsou popsány nejpoužívanější kaučuky pro pryžové výrobky a co je to tvarový faktor. Jsou zde popsány mechanické a tepelné vlastnosti a na závěr teoretické části jsou uvedeny složené systémy a konstrukční pryžové prvky.

Praktická část diplomové práce se zabývala vlivem teploty a tvaru na mechanické vlastnosti pryžových těles. Ty byly zatěžovány jednoosým tlakem při třech různých teplotách. Jednalo se o teplotu okolí $T_1 = 20^\circ\text{C}$ a teploty zvýšené $T_2 = 60^\circ\text{C}$, $T_3 = 100^\circ\text{C}$, které byly nastaveny v teplotní komoře.

V první části je popsána výroba pryžových zkušebních těles, které byly zhotoveny ve školních dílnách v lisovací formě. Forma umožňovala vyrobit šestici různých jednoduchých tvarů, které by co nejvíce připomínaly v praxi hojně používané pryžokovové prvky, tzv. silentbloky. Forma umožňovala vyrobit tělesa pouze jednotné délky, které se pak musely upravit na požadované výšky $h_1 = 10\text{mm}$, $h_2 = 20\text{mm}$, $h_3 = 30\text{mm}$. Na ně byly nalepeny kovové plechy, aby se vytvořila podobnost s vázanou tlakovou pružinou. Potom byl spočítán jejich tvarový faktor a tvarová funkce, aby se zjistil jejich případný vliv při tlakové zkoušce.

V druhé části byl vytvořen model v programu COSMOS a MSC. PATRAN. Byla simulována zkouška v tlaku pro plný válec o $\varnothing D = 49\text{mm}$, výšek h_1 a h_3 , při teplotě okolí T_1 . Po srovnání obou modelů, bylo zjištěno, že vypočtené hodnoty se výrazně neliší. Při porovnání výsledků s experimentálním měřením byl použit model z programu COSMOS.

V další části je popsán průběh samotné deformační zkoušky v tlaku. Zkouška probíhala pouze za kladných teplot T_1 , T_2 a T_3 a bylo zjištěno, že rozsah zvolených teplot měl na mechanické vlastnosti těles pouze nevýrazný vliv. Naopak tvarový faktor měl největší vliv u těles nejmenší výšky, kde byly mezi naměřenými závislostmi σ , ε největší rozdíly.

V poslední části byly porovnány výsledky z modelu a experimentálního měření. Bylo zjištěn zajímavý fakt, že s rostoucím tvarovým faktorem se výrazně lišily reálné výsledky od modelových.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] Franta, I. Gumárenská technologie I. SNTL, Praha, 1979.
- [2] Franta, I. Gumárenská technologie II. SNTL, Praha, 1969.
- [3] Štěpán, M. Gumárenská technologie III. SNTL, Praha, 1956.
- [4] Holub, J. Gumárenská technologie VII. SNTL, Praha, 1967.
- [5] R. Peremský, M. Samec. Gumárenská technologie VIII. SNTL, Praha, 1968.
- [6] Šuba, O. Dimenzování a navrhování výrobků z polymeru, UTB Zlín, 2006, ISBN 80-7318-413-3.
- [7] Zámorský, Z. Nauka o polymerech II. VUT Brno, 1980.
- [8] Mahlovský, J. Černý, J. Kobylík, L. Příručka pro gumárenskou praxi, Praha, 1974.
- [9] Kubík, J. Zytka, A. Zkušební metody v gumárenství, SNTL, Praha, 1962.
- [10] Ovsík, M. Studie tvarového faktoru elastomerních prvků [diplomová práce], UTB, FT Zlín, 2007.
- [11] Lutonský, Z. Vliv teploty na mechanické chování polymerů a kompozitů [diplomová práce], UTB, FT Zlín, 2007.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

σ_t	napětí v tahu [MPa]
σ_d	napětí v tlaku [MPa]
F	velikost zatěžující síly [N]
S	průřez tělesa [mm ²]
ε	poměrná deformace [%]
h	výška tělesa [mm]
E	modul pružnosti v tlaku/tahu [MPa]
ν	Poissonův poměr [-]
f	tvarový faktor [-]
τ	smykové napětí [MPa]
p	tlak [MPa]
δ	deformace [mm]
R	poloměr tělesa [mm]
K	tuhost vázané tlakové pružiny [N/mm]
T	teplota [°C]
t	čas [s]
D	průměr tělesa [mm]
LN ₂	tekutý dusík (liquid nitrogen)
G	modul pružnosti ve smyku [MPa]

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1. Průběh oxidace

Obr. 2. Destruktivní zpracování pryžového odpadu

Obr. 3. Ukázka výrobků z pryže (hadice, hardy spojky, podlahovina ,houby ,těsnící kroužky)

Obr. 4. Struktura řetězce NR

Obr. 5. Struktura řetězce SBR

Obr. 6. Pryžokovové výrobky – silentbloky

Obr. 7. Homogenní deformace

Obr. 8. Nehomogenní deformace

Obr. 9. Modul pružnosti v tlaku v závislosti na teplotě pro pryž s kaučuky a – NR, b - SBR

Obr. 10. Závislost mechanických vlastností pryže na teplotě

Obr.11. Závislost zatížení na deformaci

Obr. 12. Tlaková pružina

Obr. 13. Nahrazení účinků smykovým napětím

Obr. 14. Schéma zkušebních vzorků: $a = 49\text{mm}$, $b = 20\text{mm}$, $\varnothing D = 49\text{mm}$, $\varnothing d = 20\text{mm}$

Obr. 15. Použité zkušební vzorky

Obr. 16. Výšky zkušebních vzorků: $h_1 = 10\text{mm}$, $h_2 = 20\text{mm}$, $h_3 = 30\text{mm}$

Obr. 17. Lisovací forma

Obr. 18. Hydraulický etážový lis

Obr. 19. Zkušební vzorky

Obr. 20. Zkušební stroj ZWICK 1456

Obr. 21. Zkušební stroj T2000

Obr. 22. Začátek zkoušky nafukováním (hodnota tlaku na obrázku je v kPa)

Obr. 23. Konec zkoušky nafukováním (hodnota tlaku na obrázku je v kPa)

Obr. 24. Zkušební těleso před a po deformaci

- Obr. 25. Dvou-parametrový Mooney-Rivlin
- Obr. 26. Tří-parametrový Mooney-Rivlin
- Obr. 27. Deformace tělesa
- Obr. 28. Velikost napětí Von Mises
- Obr. 29. Napětí Von Mises
- Obr. 30. Graf závislosti síly na deformaci modelu o výšce h_1
- Obr. 31. Napětí Von Mises
- Obr. 33. Zkušební stroj Zwick 1456
- Obr. 34. Teplotní komora Zwick
- Obr. 35. Popis teplotní komory
- Obr. 36. Zatěžování zkušebních těles
- Obr. 37. Graf srovnání všech tvarů při okolní teplotě 20°C a výškách 10mm
- Obr. 38. Graf srovnání všech tvarů při teplotě 60°C a výškách 10mm
- Obr. 39. Graf srovnání všech tvarů při teplotě 100°C a výškách 10mm
- Obr.40. Graf srovnání všech tvarů při okolní teplotě 20°C a výškách 20mm
- Obr. 41. Graf srovnání všech tvarů při teplotě 60°C a výškách 20mm
- Obr. 42. Graf srovnání všech tvarů při teplotě 100°C a výškách 20mm
- Obr. 43. Graf srovnání všech tvarů při okolní teplotě 20°C a výškách 30mm
- Obr.44. Graf 10. Srovnání všech tvarů při teplotě 60°C a výškách 30mm
- Obr. 45. Graf srovnání všech tvarů při teplotě 100°C a výškách 30mm
- Obr. 46. Graf srovnání všech teplot (20, 60, 100°C) při výškách 10mm
- Obr. 47. Graf srovnání všech teplot (20, 60, 100°C) při výškách 20mm
- Obr. 48. Graf srovnání všech teplot (20, 60, 100°C) při výškách 30mm
- Obr.49. Graf srovnání všech teplot (20, 60, 100°C) při výškách 10mm
- Obr. 50. Graf srovnání všech teplot (20, 60, 100°C) při výškách 20mm
- Obr. 51. Graf srovnání všech teplot (20, 60, 100°C) při výškách 30mm

Obr. 52. Graf srovnání všech teplot (20, 60, 100°C) při výškách 10mm

Obr. 53. Graf srovnání všech teplot (20, 60, 100°C) při výškách 20mm

Obr. 54. Graf srovnání všech teplot (20, 60, 100°C) při výškách 30mm

Obr. 55. Graf srovnání všech teplot (20, 60°C) při výškách 10mm

Obr. 56. Graf srovnání všech teplot (20, 60°C) při výškách 20mm

Obr. 57. Graf srovnání všech teplot (20, 60°C) při výškách 30mm

Obr. 58. Graf srovnání všech teplot (20, 60, 100°C) při výškách 10mm

Obr. 59. Graf srovnání všech teplot (20, 60, 100°C) při výškách 20mm

Obr. 60. Graf srovnání všech teplot (20, 60, 100°C) při výškách 30mm

Obr. 61. Graf srovnání všech teplot (20, 60, 100°C) při výškách 10mm

Obr. 62. Graf srovnání všech teplot (20, 60, 100°C) při výškách 20mm

Obr. 63. Graf srovnání všech teplot (20, 60, 100°C) při výškách 30mm

Obr. 64. Graf pro určení modulu pružnosti tlaku

Obr. 65. Graf srovnání závislostí síly na deformaci pro h_1

Obr. 66. Graf srovnání závislostí síly na deformaci pro h_3

SEZNAM TABULEK

Tab. 1. Hodnoty tvarového faktoru f_1

Tab. 2. Hodnoty tvarového faktoru f_2

Tab. 3. Hodnoty tvarového faktoru f_3

Tab. 4. Hodnoty tvarového faktoru f_4

Tab. 5. Hodnoty tvarového faktoru f_5

Tab. 6. Hodnoty tvarového faktoru f_6

Tab. 7. Hodnoty tvarové funkce

Tab. 8. Hodnoty vypočtené v programu COSMOS pro h_1

Tab. 9. Hodnoty vypočtené v programu COSMOS pro h_3

Tab. 10. Srovnávací tabulka s hodnotami síly a deformace pro h_1

Tab. 11. Srovnávací tabulka tuhostí pro výšku h_1

Tab. 12. Srovnávací tabulka s hodnotami síly a deformace pro h_3

Tab. 13. Srovnávací tabulka tuhostí pro výšku h_3

Tab. 14. Srovnávací tabulka tuhostí pružin

SEZNAM PŘÍLOH

PŘÍLOHA P I: TAHOVÁ ZKOUŠKA, MATERIÁL S 1234

PŘÍLOHA P II: ZKOUŠKA NAFUKOVÁNÍM, MATERIÁL S 1234

PŘÍLOHA P III AŽ PŘÍLOHA P LIII: TLAKOVÁ ZKOUŠKA, NAMĚŘENÉ HODNOTY

PŘÍLOHA P I: TAHOVÁ ZKOUŠKA, MATERIÁL S 1234

Vzorek 1		Vzorek 2		Vzorek 3		Vzorek 4	
ε [-]	σ [Pa]	ε [-]	σ [Pa]	ε [-]	σ [Pa]	ε [-]	σ [Pa]
0	0	0	0	0	0	0	0
0,015	133286	0,024	220433	0,016	155707	0,017	161311
0,041	230481	0,043	252725	0,042	255118	0,045	303503
0,071	369105	0,073	339597	0,072	337934	0,066	335395
0,113	429892	0,083	374329	0,087	366315	0,095	408981
0,145	493069	0,12	436392	0,118	437345	0,115	435893
0,172	556326	0,138	468684	0,149	501241	0,147	499679
0,195	561185	0,167	523263	0,165	524891	0,162	526591
0,223	619503	0,196	577924	0,197	569867	0,194	580575
0,243	641412	0,214	602733	0,217	593517	0,21	600177
0,273	682760	0,243	649911	0,248	643223	0,241	654081
0,293	702199	0,274	699528	0,26	671604	0,274	690874
0,32	755656	0,291	714414	0,295	702388	0,289	710476
0,34	755656	0,322	749227	0,323	747364	0,321	747269
0,355	784815	0,341	766553	0,34	768688	0,339	761970
0,387	821303	0,373	808769	0,373	804125	0,372	801253
0,418	855402	0,388	823654	0,383	896480	0,39	820855
0,433	872371	0,418	868310	0,445	910670	0,419	852667
0,46	903999	0,425	898162	0,482	993486	0,431	918862
0,497	933158	0,411	955263	0,573	1010000	0,42	967947
0,515	950207	0,425	972588	0,591	1021870	0,462	975257
0,526	989085	0,522	937856	0,619	1050250	0,549	963046
0,522	1013380	0,537	982512	0,632	1073900	0,568	1016950
0,526	1023100	0,565	1019770	0,663	1099950	0,588	1026750
0,597	1030430	0,581	1037170	0,686	1185170	0,621	1056150

PŘÍLOHA P II: ZKOUŠKA NAFUKOVÁNÍM, MATERIÁL S 1234

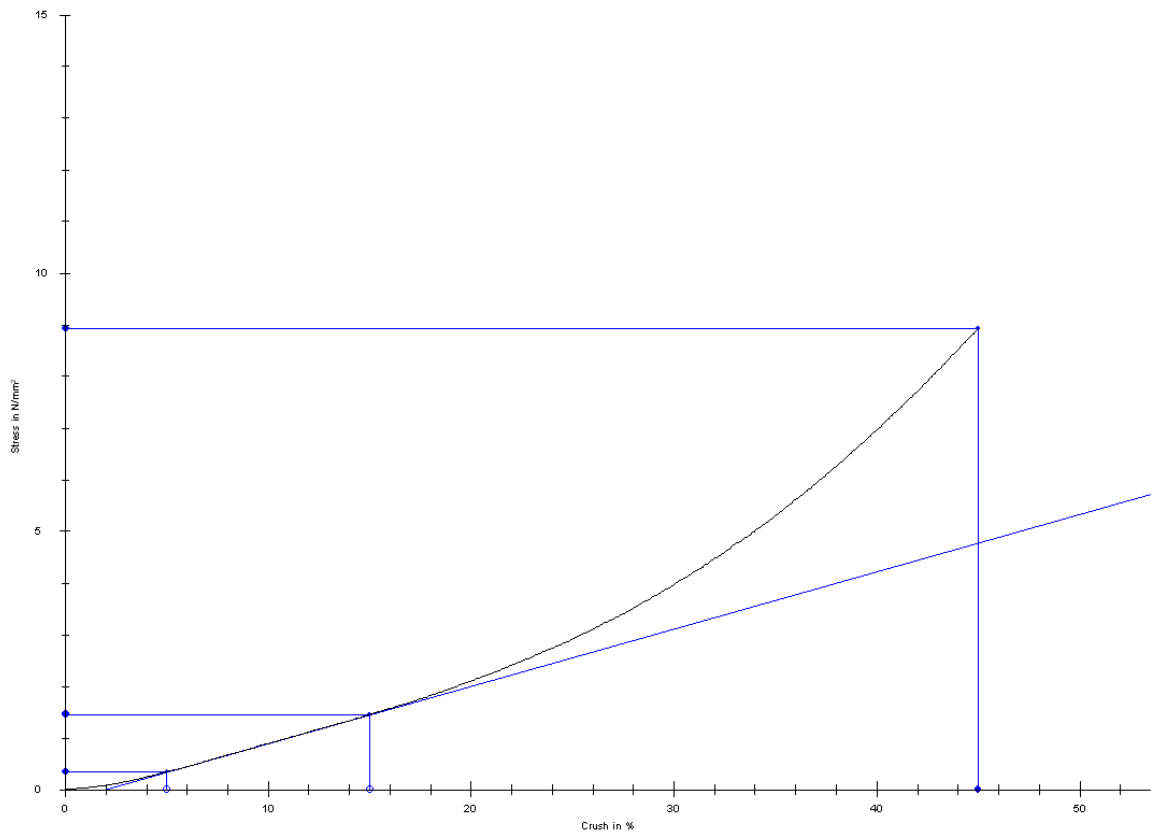
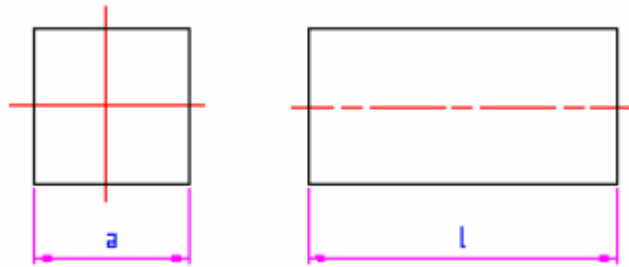
Tlak: p [Mpa]	Poloměr: R [mm]	Délka oblouku: L [mm]
0	27,206	14,2383
20	54,199	14,8351
31	48,6562	14,7712
47	65,8501	15,6257
61	24,7864	16,0395
70	44,0252	16,4893
85	38,0711	17,7049
89	35,9133	18,2539
95	31,8105	18,8396
100	26,8372	19,12
104	32,0374	20,3336
108	27,5259	20,7228
111	27,5219	22,3109
115	28,2172	23,4395
118	29,3884	24,7207
122	31,1665	26,3965
126	30,3615	28,1636
128	34,0645	28,8149
131	33,5229	30,2891
134	35,7388	30,4731
138	35,5648	32,2842
140	36,224	33,0264
142	36,4726	34,4396
145	39,4442	34,4369
149	34,4255	34,9031
153	41,6039	36,2957
156	38,3597	37,1018
161	43,6073	38,1586
167	43,675	39,8764
172	45,2205	41,158
177	45,9053	43,2334
181	46,036	44,4956
186	50,3371	45,2543
192	47,9161	47,2288
197	51,2981	49,5393
202	51,819	49,7779
207	55,112	52,0905
209	56,9509	52,7539
212	60,0041	54,4885
231	57,6594	56,7219
237	62,0112	57,4766
239	67,2383	58,9921
240	77,7001	65,2508

PŘÍLOHA P III: TLAKOVÁ ZKOUŠKA, NAMĚŘENÉ HODNOTY

Materiál: S 1234

Teplota: 20 °C

Těleso: a = 49mm, l = 10mm



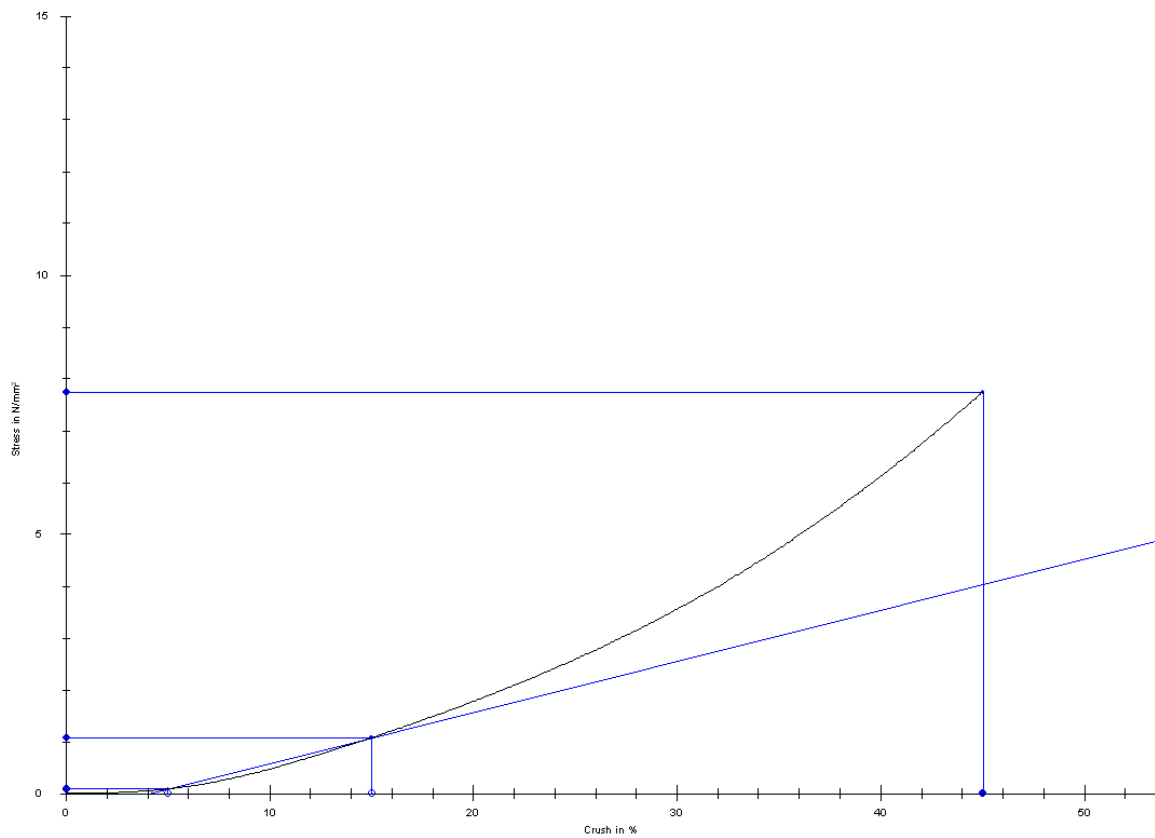
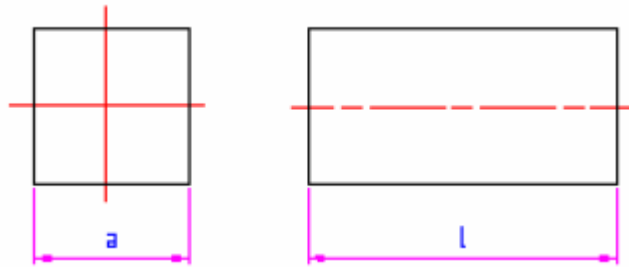
σ	F	ϵ	δ	E
Mpa	N	%	mm	N/mm ²
8,78	21074,84	45	6,93	11,09

PŘÍLOHA P IV: TLAKOVÁ ZKOUŠKA, NAMĚŘENÉ HODNOTY

Materiál: S 1234

Teplota: 60 °C

Těleso: $a = 49\text{mm}$, $l = 10\text{mm}$



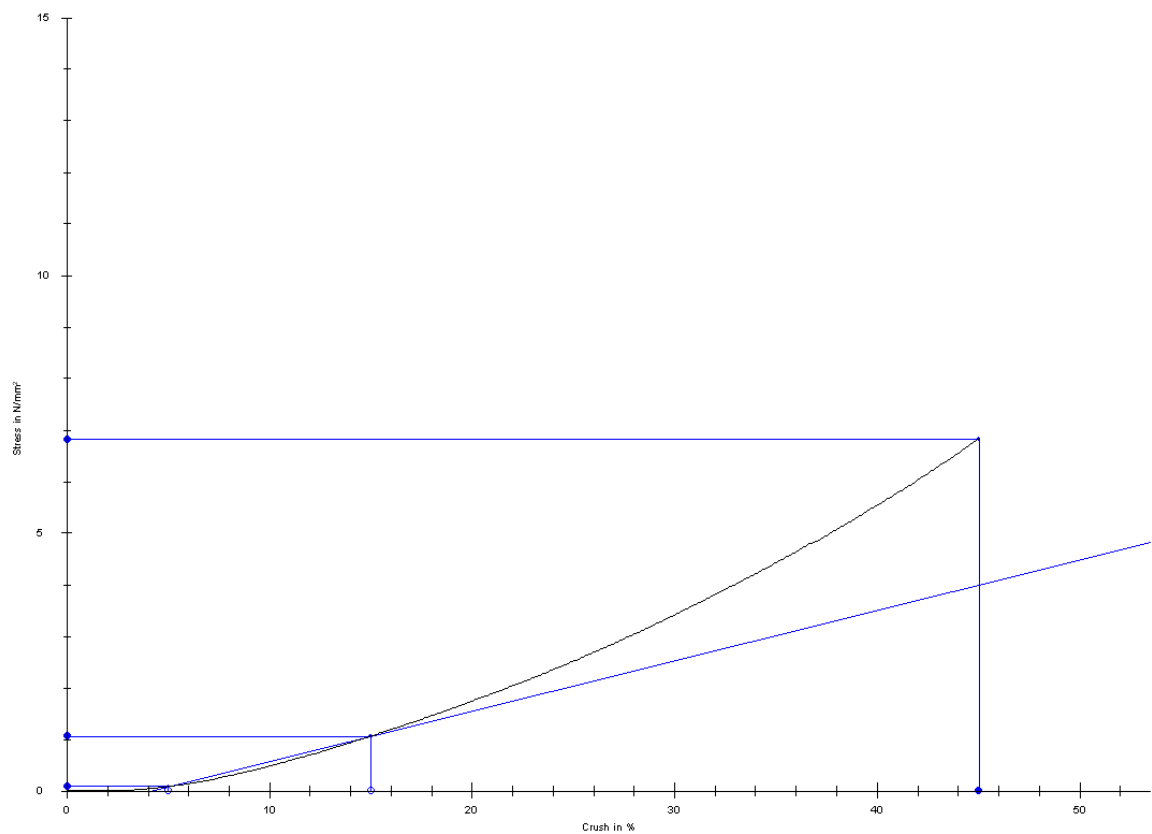
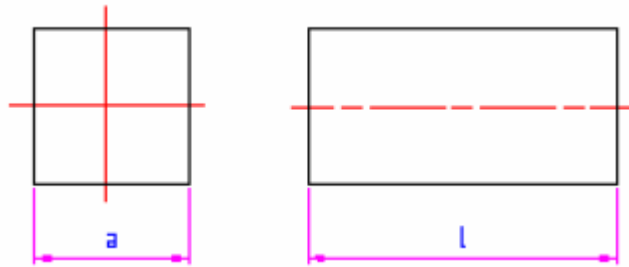
σ	F	ϵ	δ	E
Mpa	N	%	mm	N/mm ²
7,62	18285,84	45	6,89	9,86

PŘÍLOHA P V: TLAKOVÁ ZKOUŠKA, NAMĚŘENÉ HODNOTY

Materiál: S 1234

Teplota: 100 °C

Těleso: $a = 49\text{mm}$, $l = 10\text{mm}$



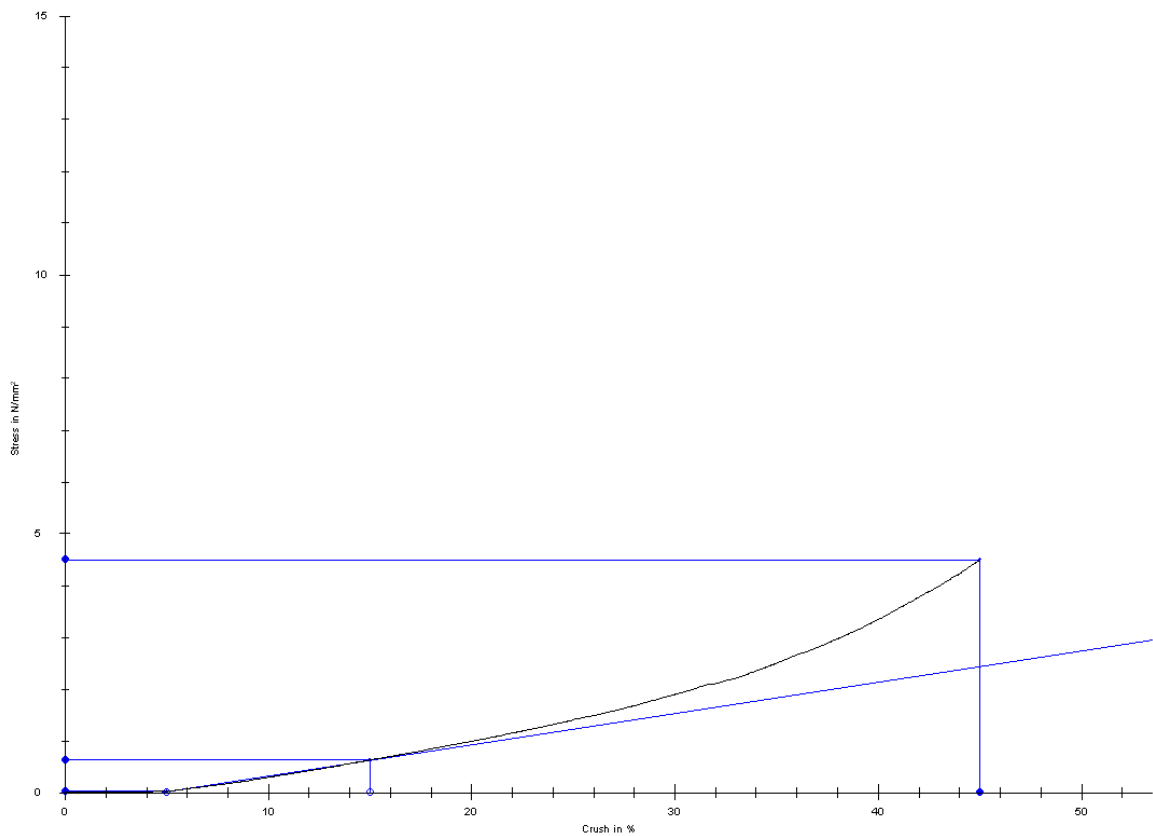
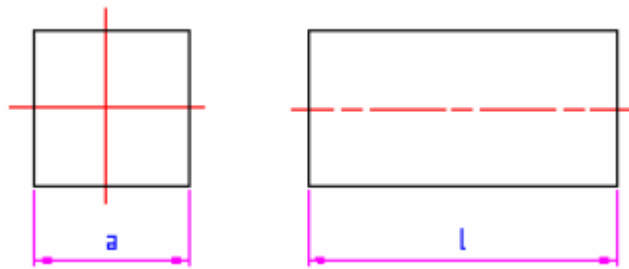
σ	F	ϵ	δ	E
MPa	N	%	mm	N/mm ²
6,71	16111,75	45	7,31	9,77

PŘÍLOHA P VI: TLAKOVÁ ZKOUŠKA, NAMĚŘENÉ HODNOTY

Materiál: S 1234

Teplota: 20 °C

Těleso: a = 49mm, l = 20mm



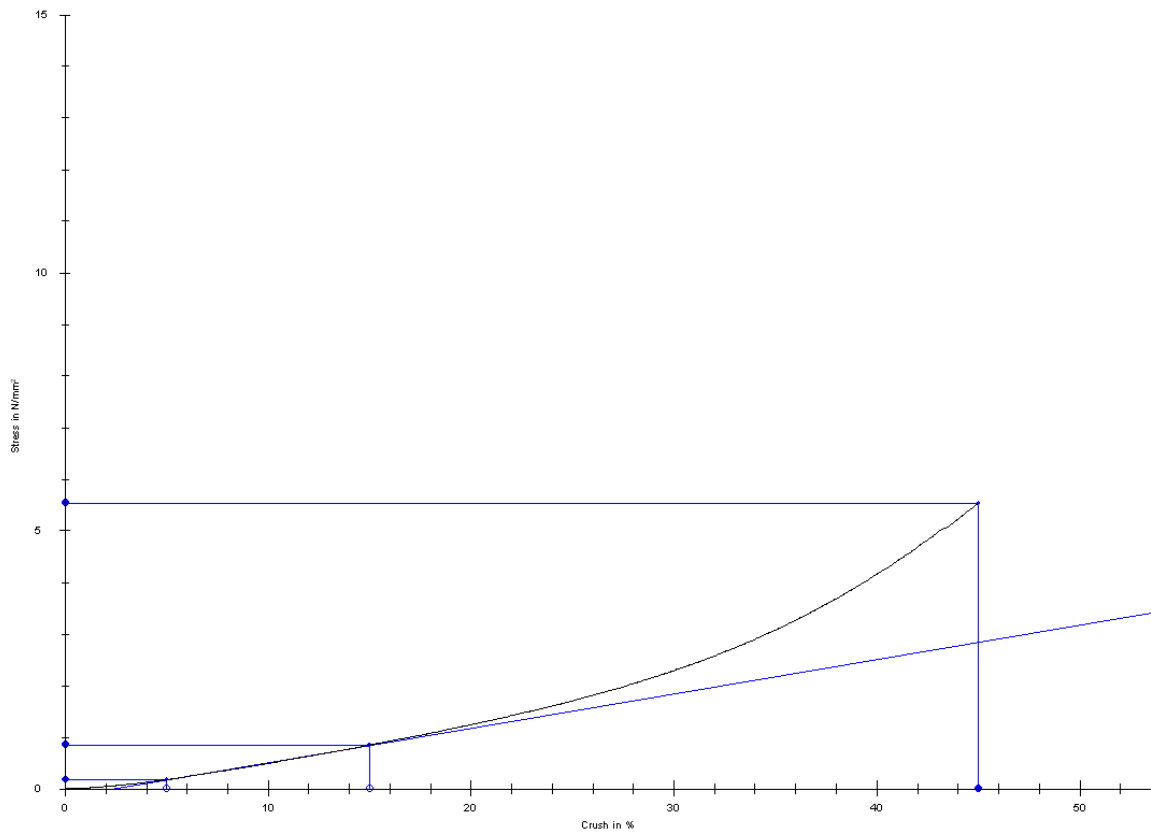
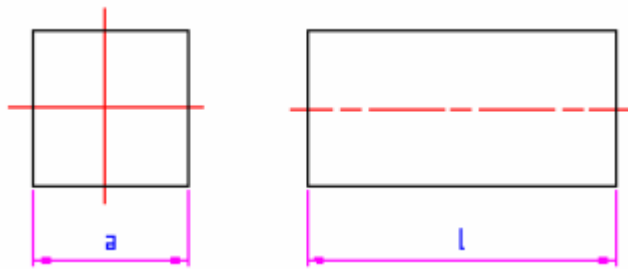
σ	F	ϵ	δ	E
MPa	N	%	mm	N/mm ²
4,42	10615,01	45	12,04	6,04

PŘÍLOHA P VII: TLAKOVÁ ZKOUŠKA, NAMĚŘENÉ HODNOTY

Materiál: S 1234

Teplota: 60 °C

Těleso: a = 49mm, l = 20mm



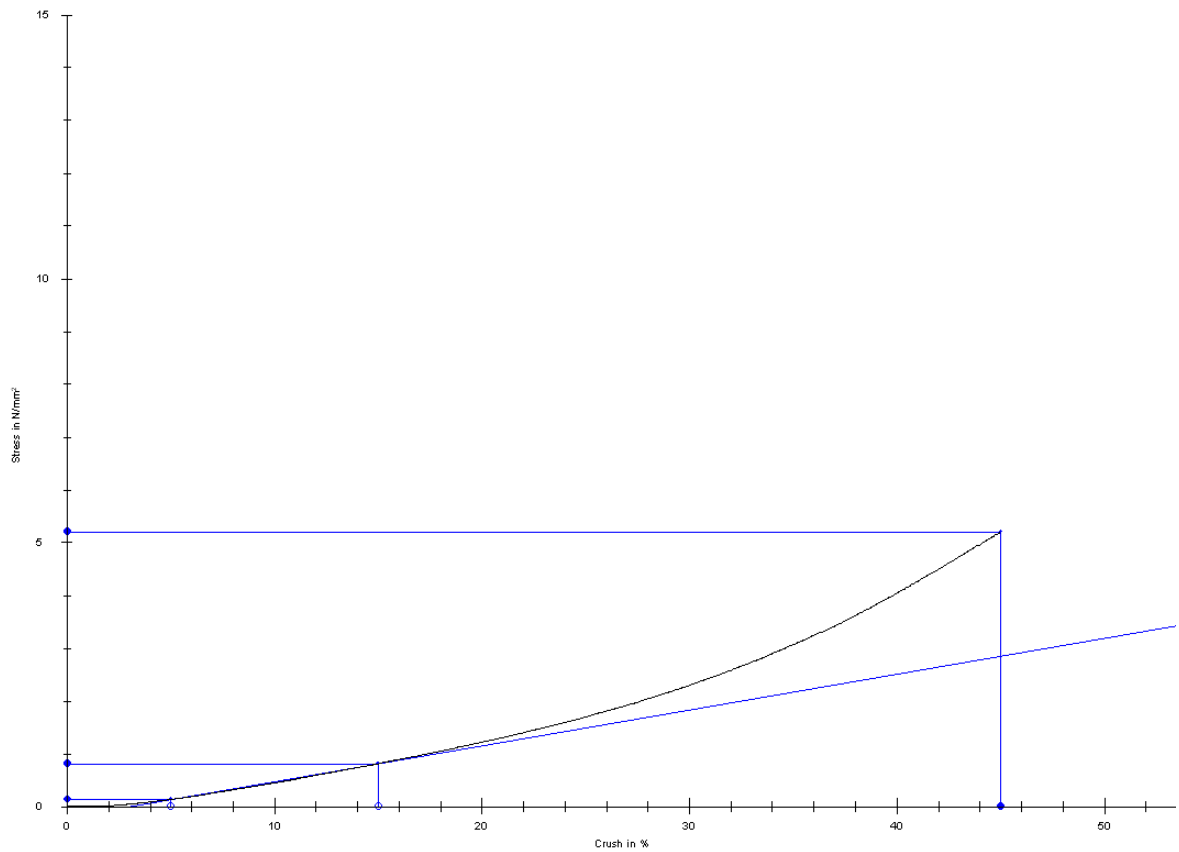
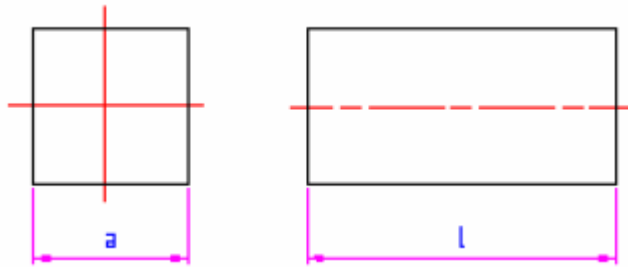
σ	F	ϵ	δ	E
MPa	N	%	mm	N/mm ²
5,44	13064,8	45	12,12	6,67

PŘÍLOHA P VIII: TLAKOVÁ ZKOUŠKA, NAMĚŘENÉ HODNOTY

Materiál: S 1234

Teplota: 100 °C

Těleso: a = 49mm, l = 20mm



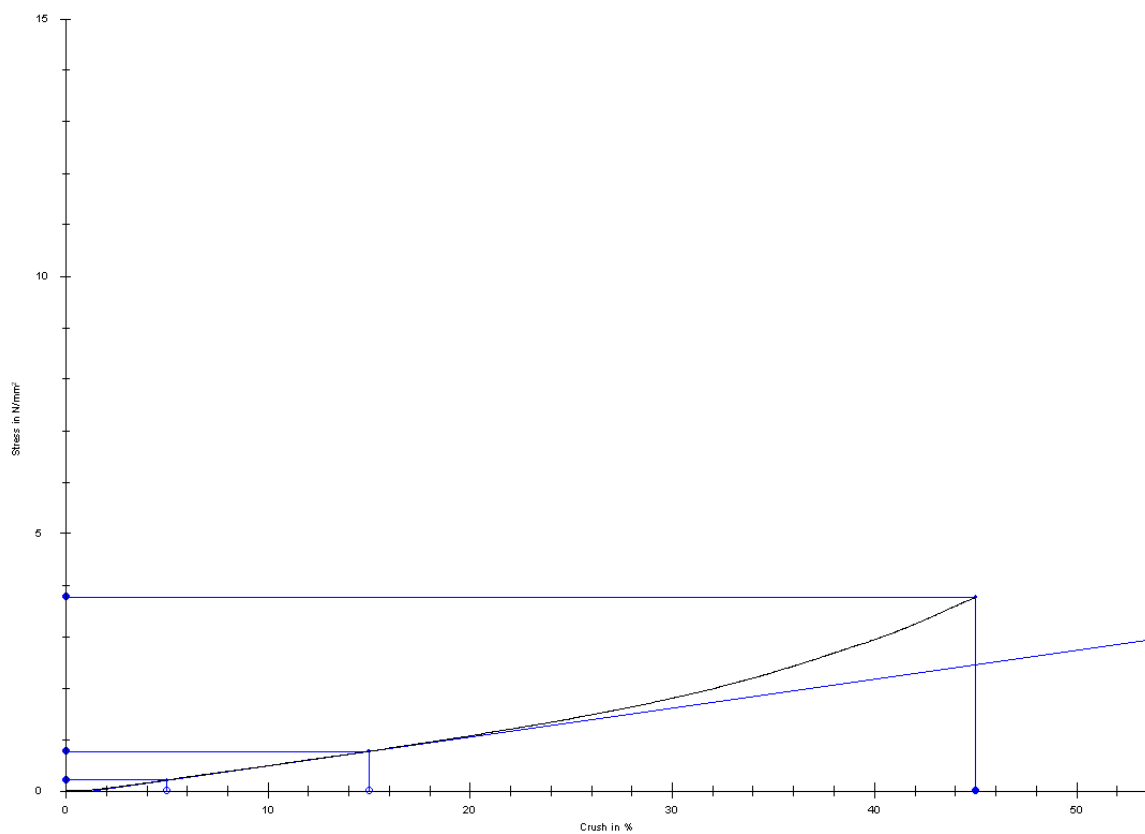
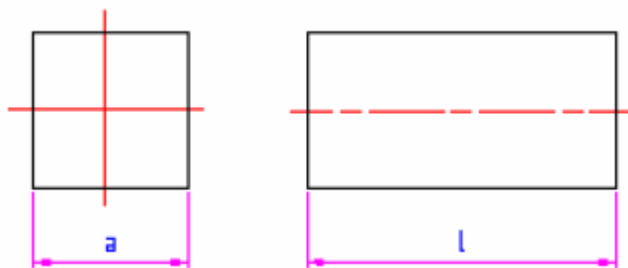
σ	F	ϵ	δ	E
Mpa	N	%	mm	N/mm ²
5,12	12293,56	45	12,11	6,78

PŘÍLOHA P IX: TLAKOVÁ ZKOUŠKA, NAMĚŘENÉ HODNOTY

Materiál: S 1234

Teplota: 20 °C

Těleso: a = 49mm, l = 30mm



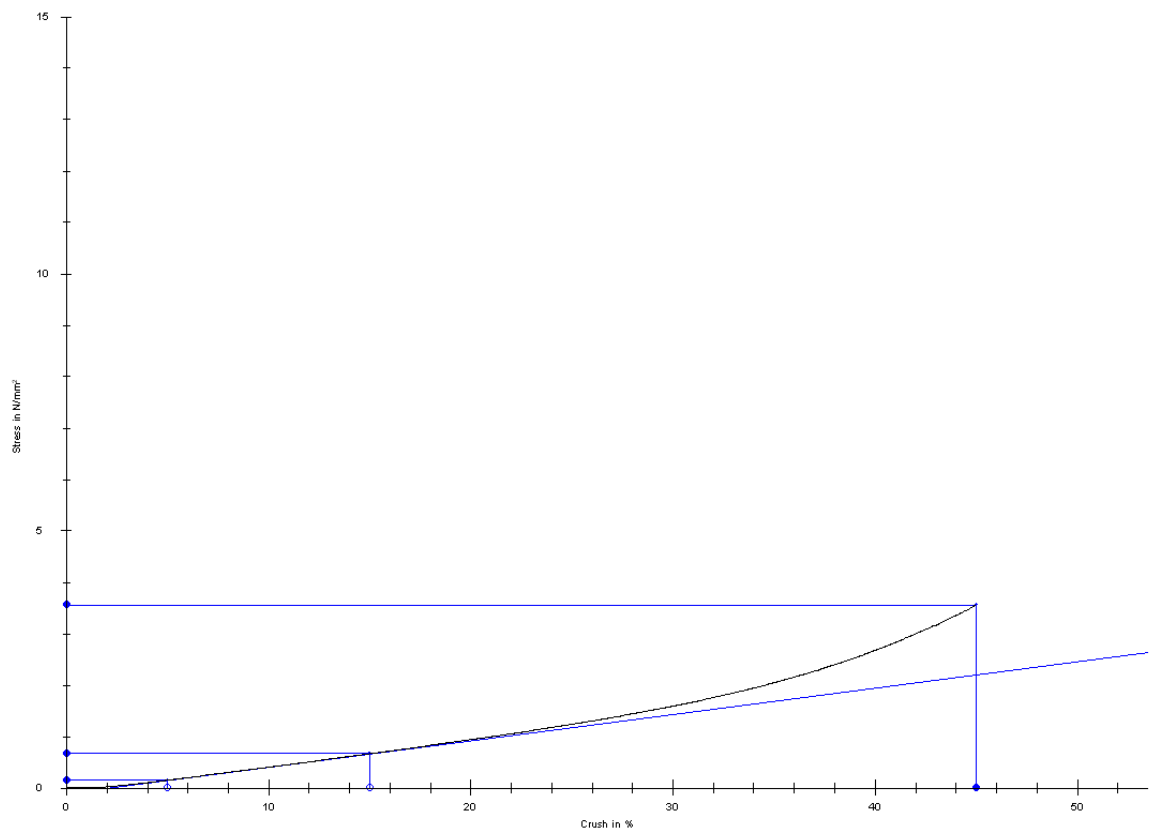
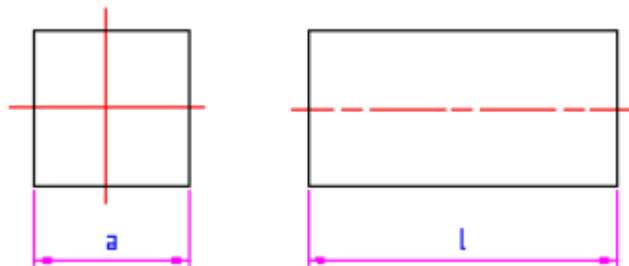
σ	F	ϵ	δ	E
Mpa	N	%	mm	N/mm ²
3,71	8898,44	45	16,07	5,59

PŘÍLOHA P X: TLAKOVÁ ZKOUŠKA, NAMĚŘENÉ HODNOTY

Materiál: S 1234

Teplota: 60 °C

Těleso: a = 49mm, l = 30mm



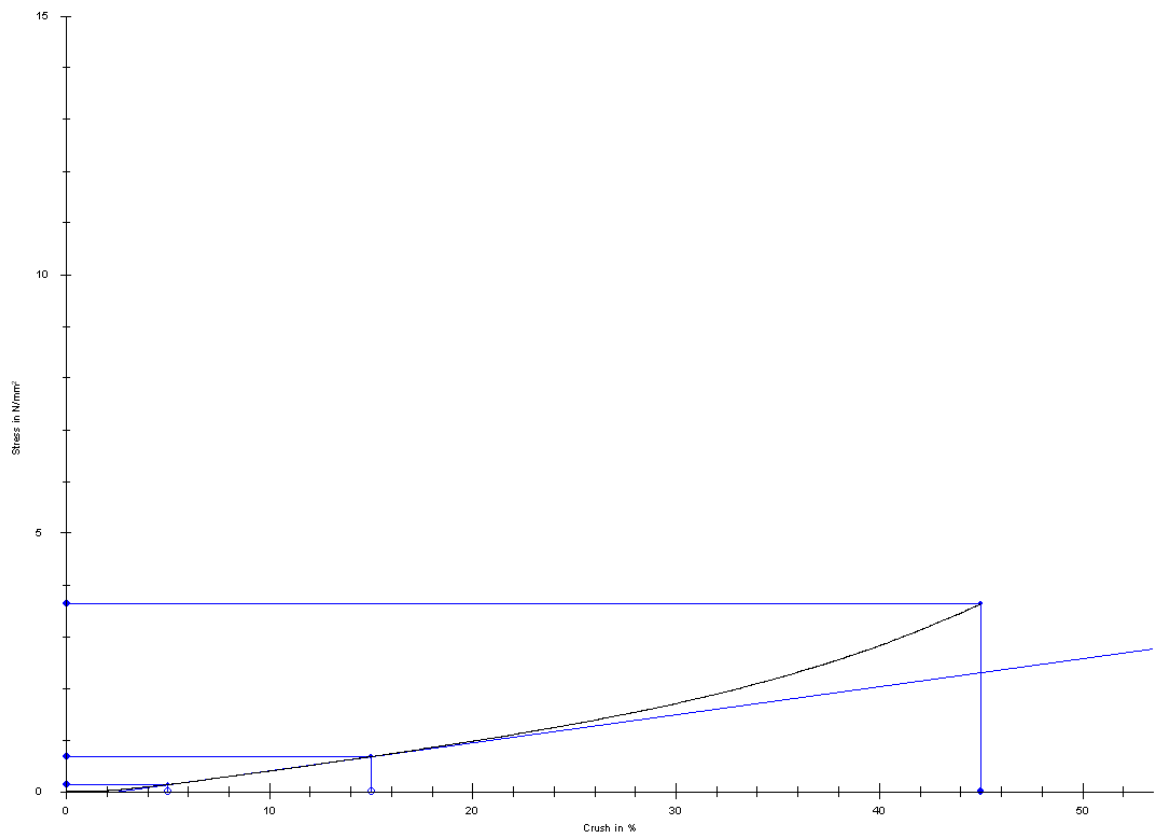
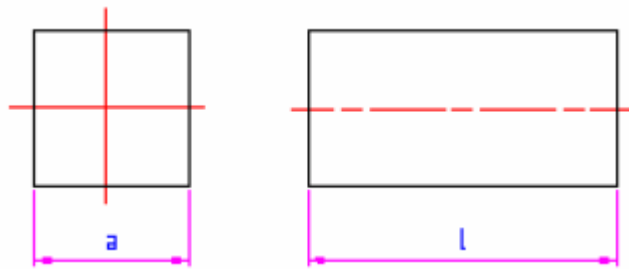
σ	F	ϵ	δ	E
MPa	N	%	mm	N/mm ²
3,5	8411,88	45	15,77	5,13

PŘÍLOHA P XI: TLAKOVÁ ZKOUŠKA, NAMĚŘENÉ HODNOTY

Materiál: S 1234

Teplota: 100 °C

Těleso: $a = 49\text{mm}$, $l = 30\text{mm}$



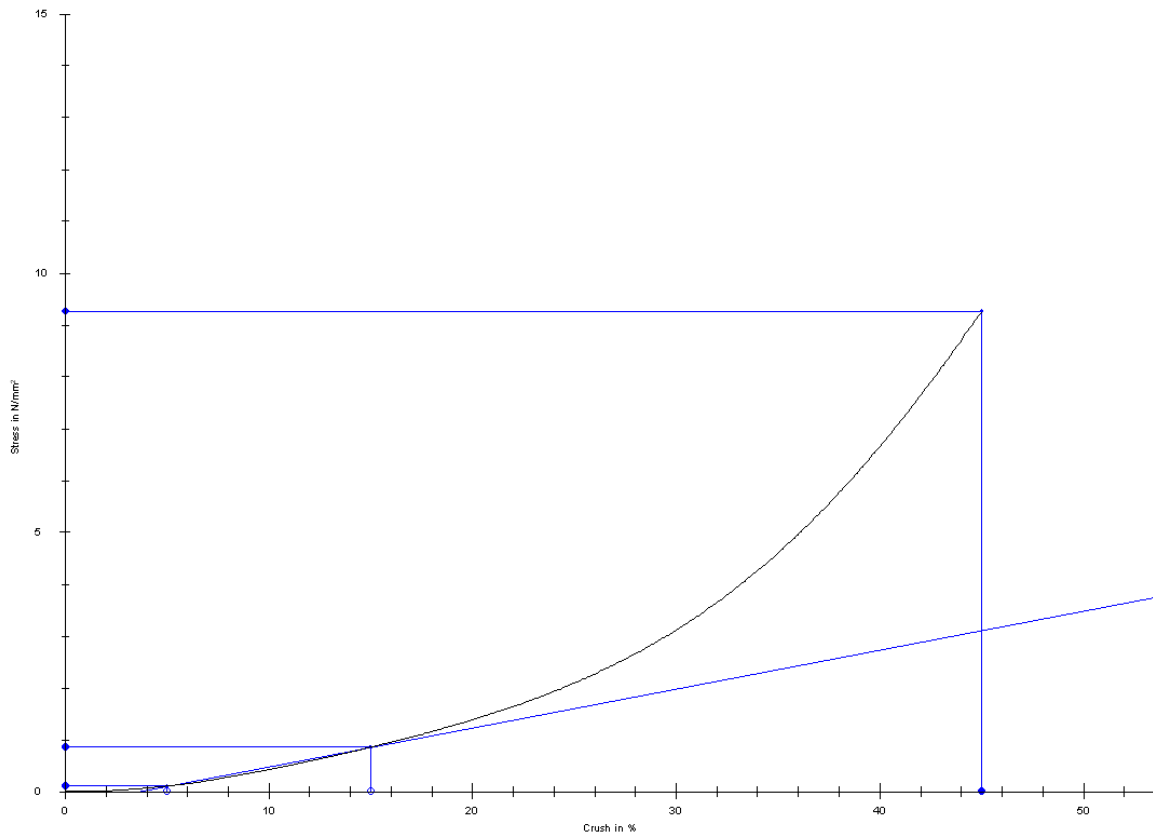
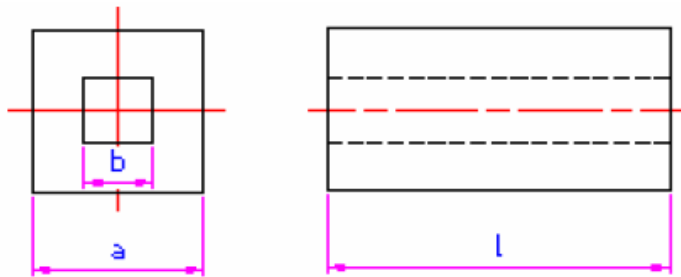
σ	F	ϵ	δ	E
MPa	N	%	mm	N/mm^2
3,57	8582,08	45	16,34	5,4

PŘÍLOHA P XII: TLAKOVÁ ZKOUŠKA, NAMĚŘENÉ HODNOTY

Materiál: S 1234

Teplota: 20 °C

Těleso: $a = 49\text{mm}$, $b = 20\text{mm}$, $l = 10\text{mm}$



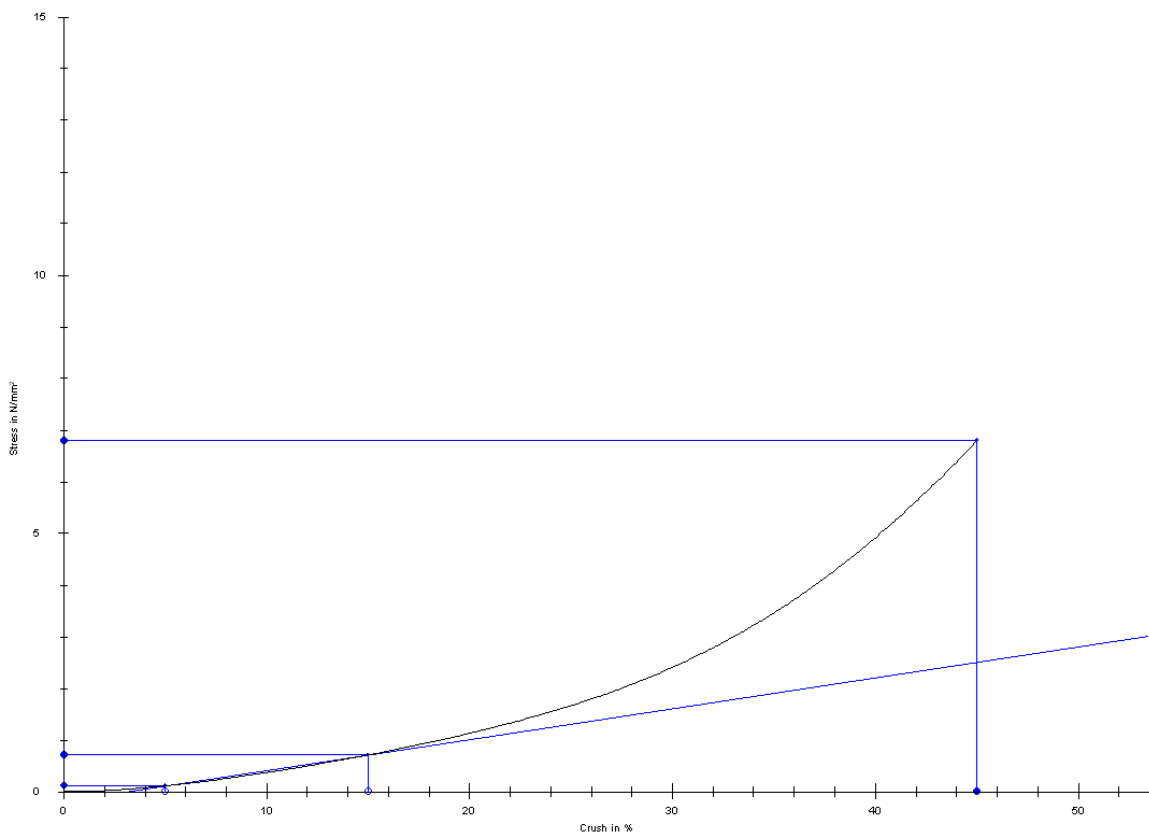
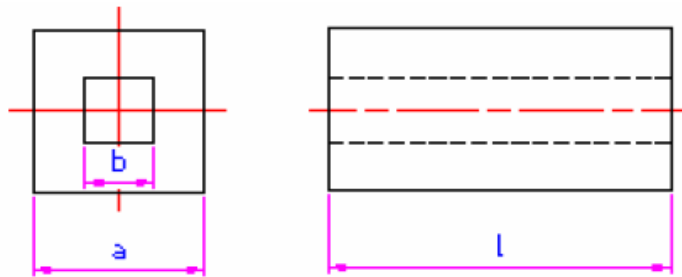
σ	F	ϵ	δ	E
MPa	N	%	mm	N/mm^2
9,18	18375,63	45	8,27	7,49

PŘÍLOHA P XIII: TLAKOVÁ ZKOUŠKA, NAMĚŘENÉ HODNOTY

Materiál: S 1234

Teplota: 60 °C

Těleso: a = 49mm, b = 20mm, l = 10mm



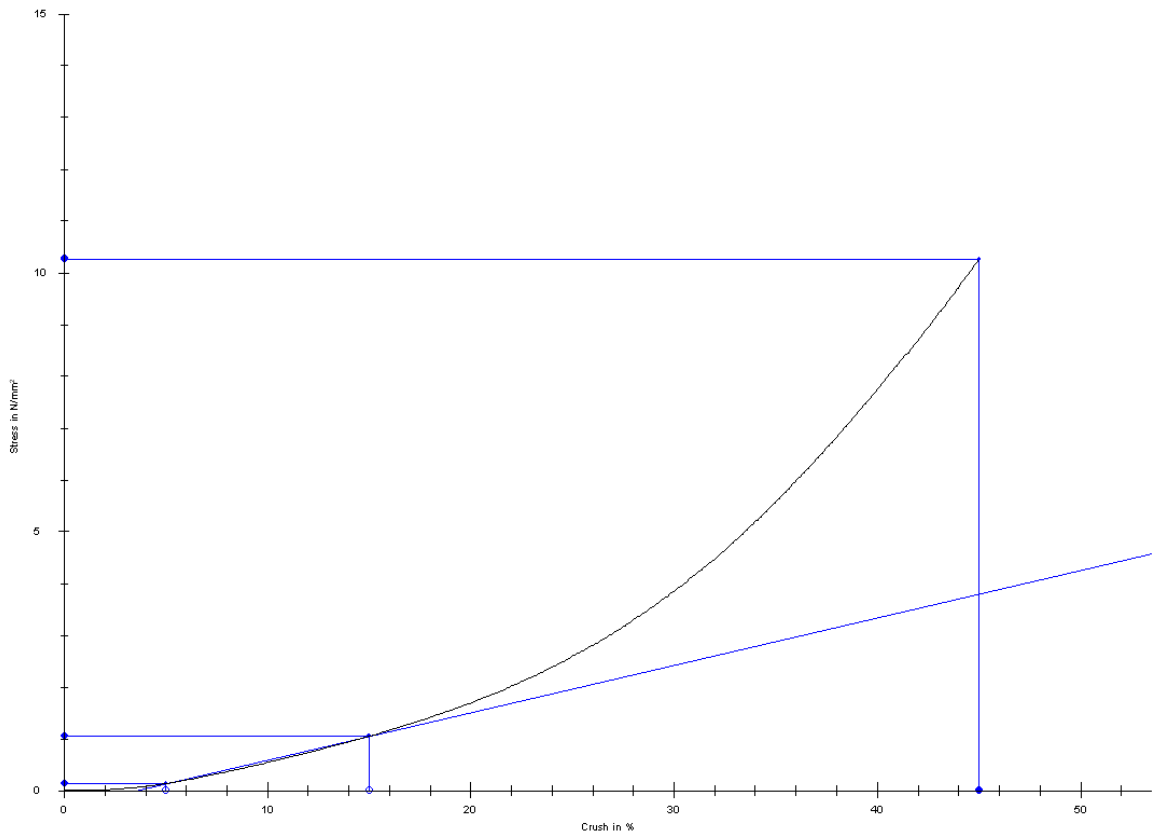
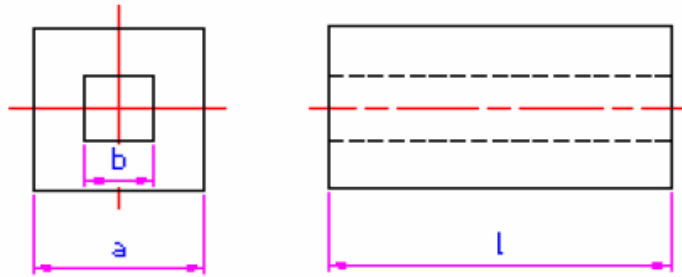
σ	F	ϵ	δ	E
MPa	N	%	mm	N/mm ²
6,74	13489,51	45	8,95	5,98

PŘÍLOHA P XIV: TLAKOVÁ ZKOUŠKA, NAMĚŘENÉ HODNOTY

Materiál: S 1234

Teplota: 100 °C

Těleso: a = 49mm, b = 20mm, l = 10mm



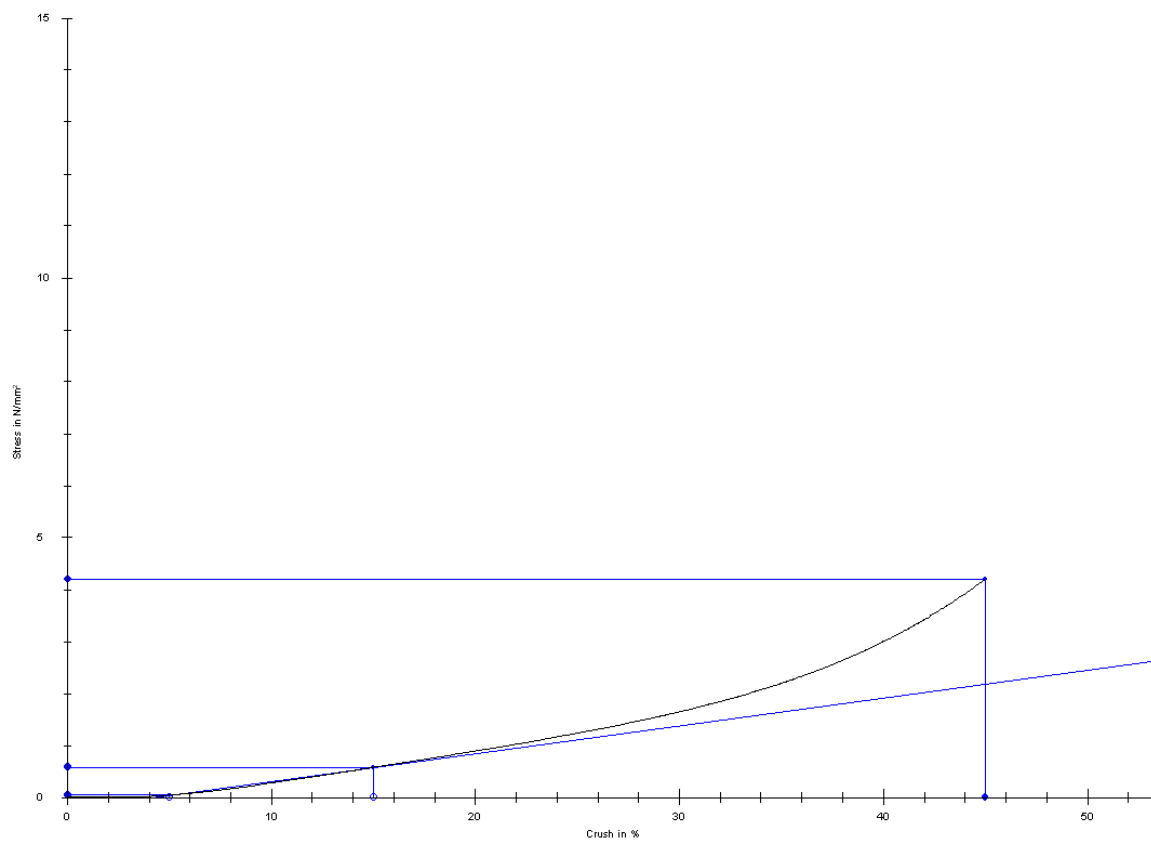
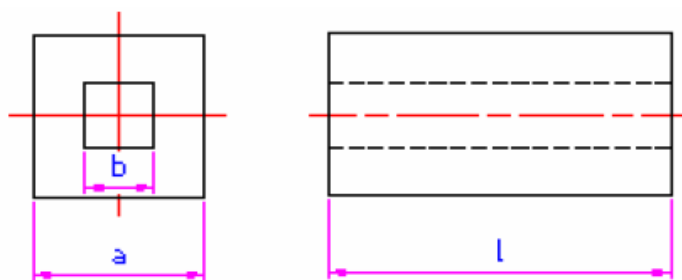
σ	F	ϵ	δ	E
MPa	N	%	mm	N/mm ²
10,18	20362,11	45	7,86	9,13

PŘÍLOHA P XV: TLAKOVÁ ZKOUŠKA, NAMĚŘENÉ HODNOTY

Materiál: S 1234

Teplota: 20 °C

Těleso: $a = 49\text{mm}$, $b = 20\text{mm}$, $l = 20\text{mm}$



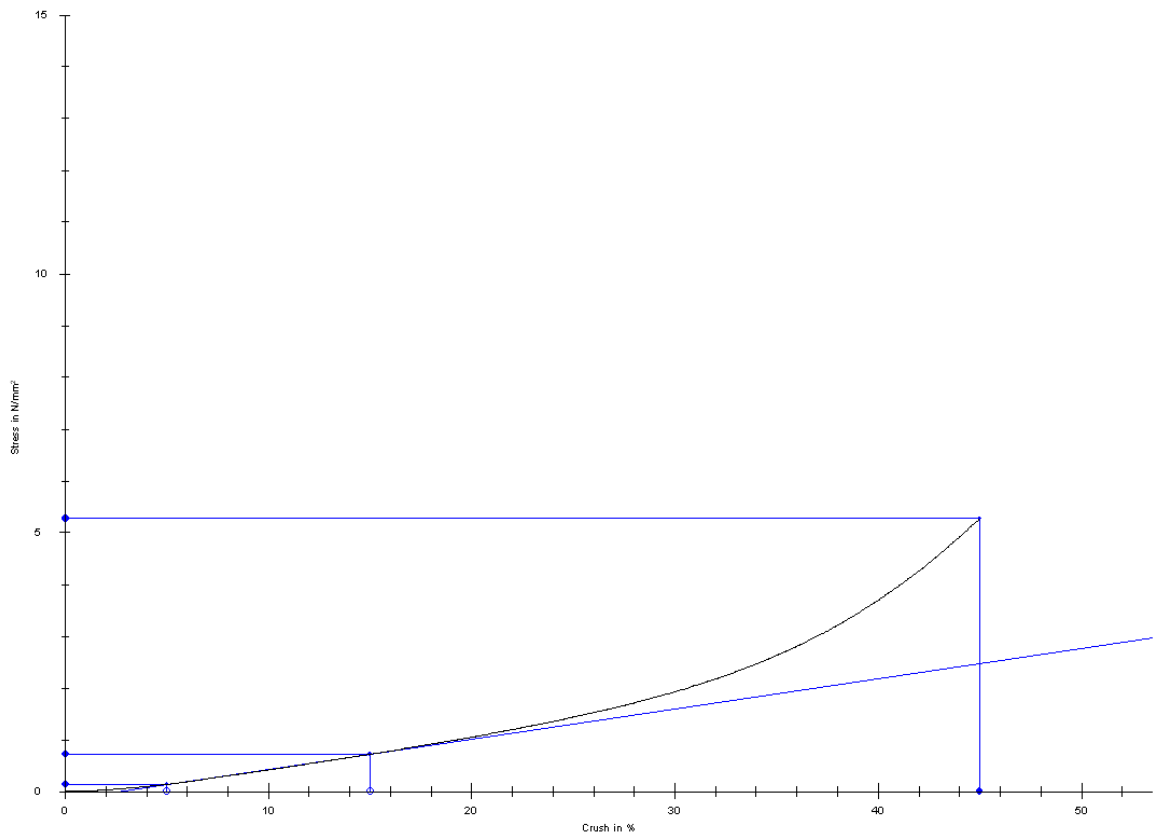
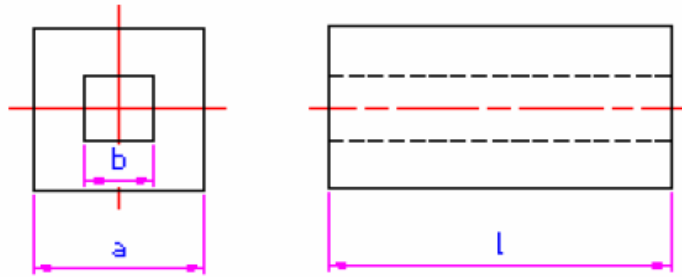
σ	F	ϵ	δ	E
MPa	N	%	mm	N/mm ²
4,16	8331,49	45	11,56	5,34

PŘÍLOHA P XVI: TLAKOVÁ ZKOUŠKA, NAMĚŘENÉ HODNOTY

Materiál: S 1234

Teplota: 60 °C

Těleso: a = 49mm, b = 20mm, l = 20mm



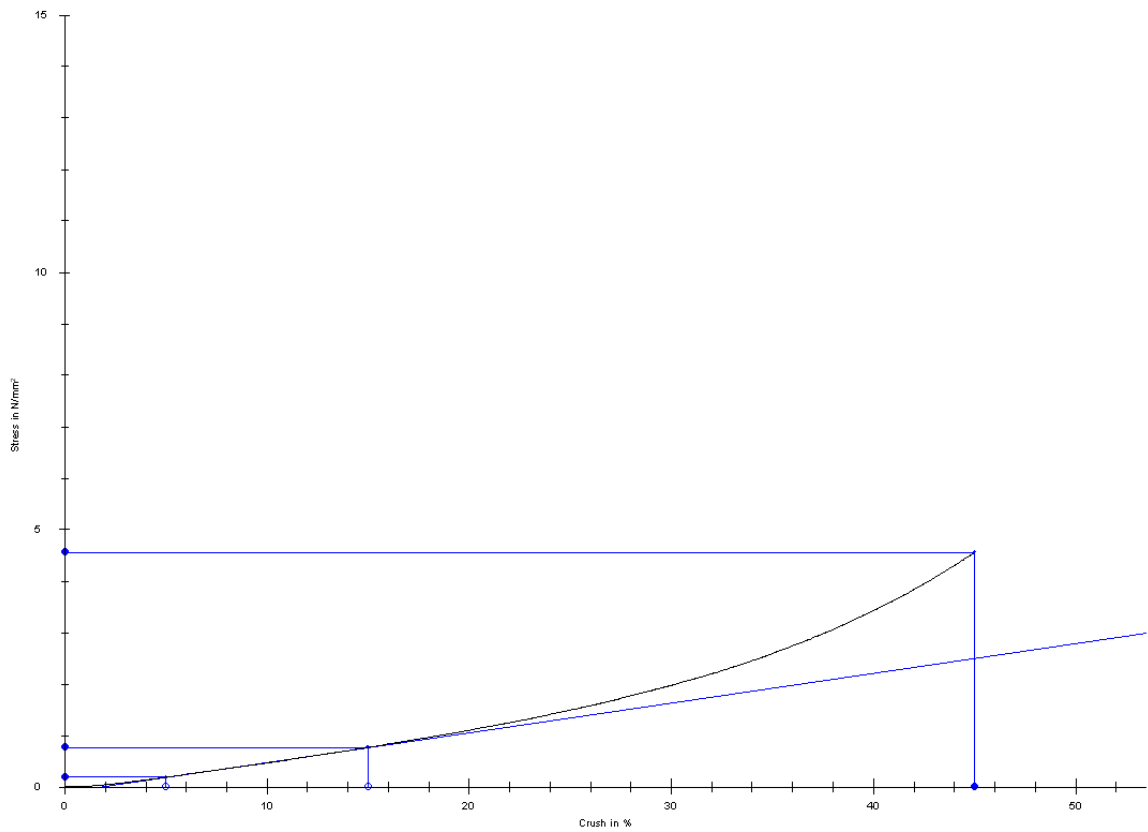
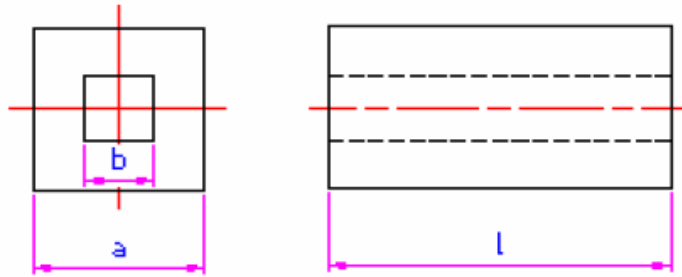
σ	F	ϵ	δ	E
MPa	N	%	mm	N/mm ²
5,23	10460,07	45	12,55	5,81

PŘÍLOHA P XVII: TLAKOVÁ ZKOUŠKA, NAMĚŘENÉ HODNOTY

Materiál: S 1234

Teplota: 100 °C

Těleso: a = 49mm, b = 20mm, l = 20mm



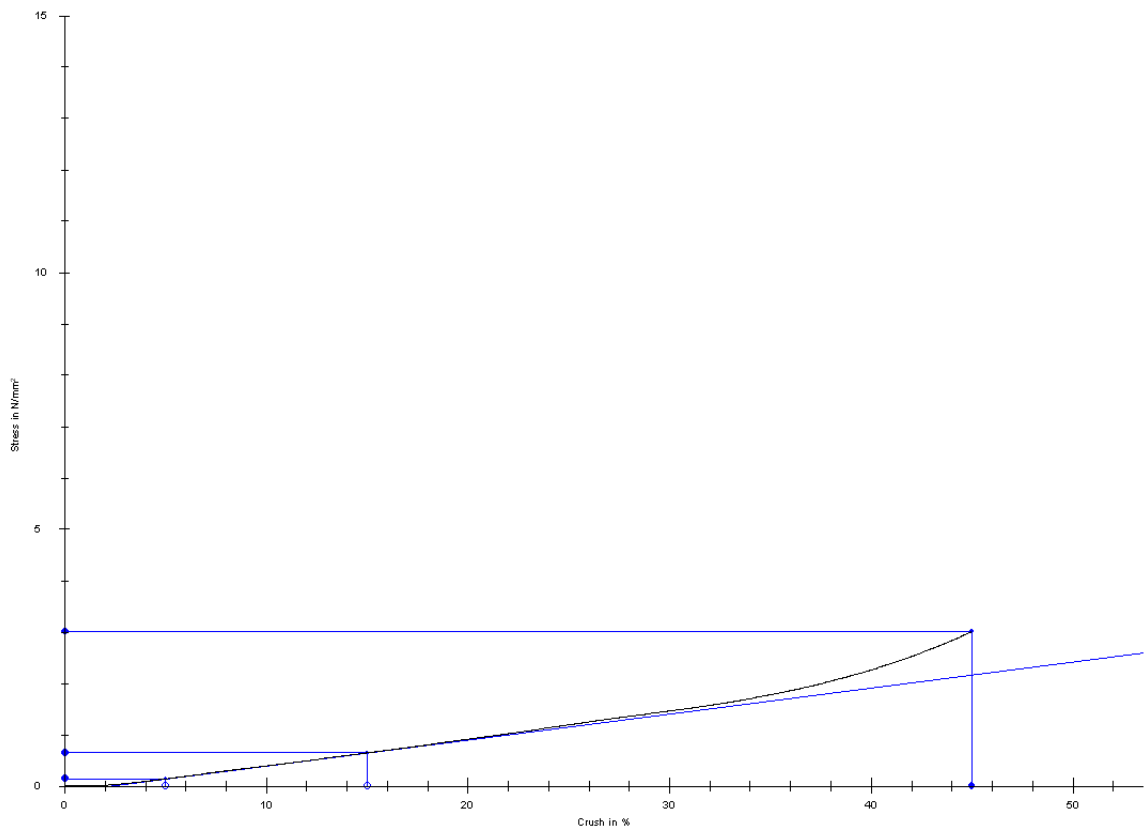
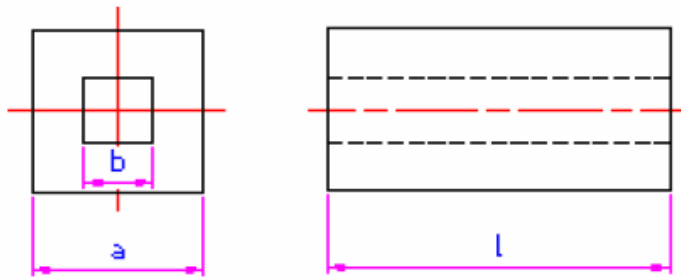
σ	F	ϵ	δ	E
MPa	N	%	mm	N/mm ²
4,52	9043,91	45	12,56	5,78

PŘÍLOHA P XVIII: TLAKOVÁ ZKOUŠKA, NAMĚŘENÉ HODNOTY

Materiál: S 1234

Teplota: 20 °C

Těleso: a = 49mm, b = 20mm, l = 30mm



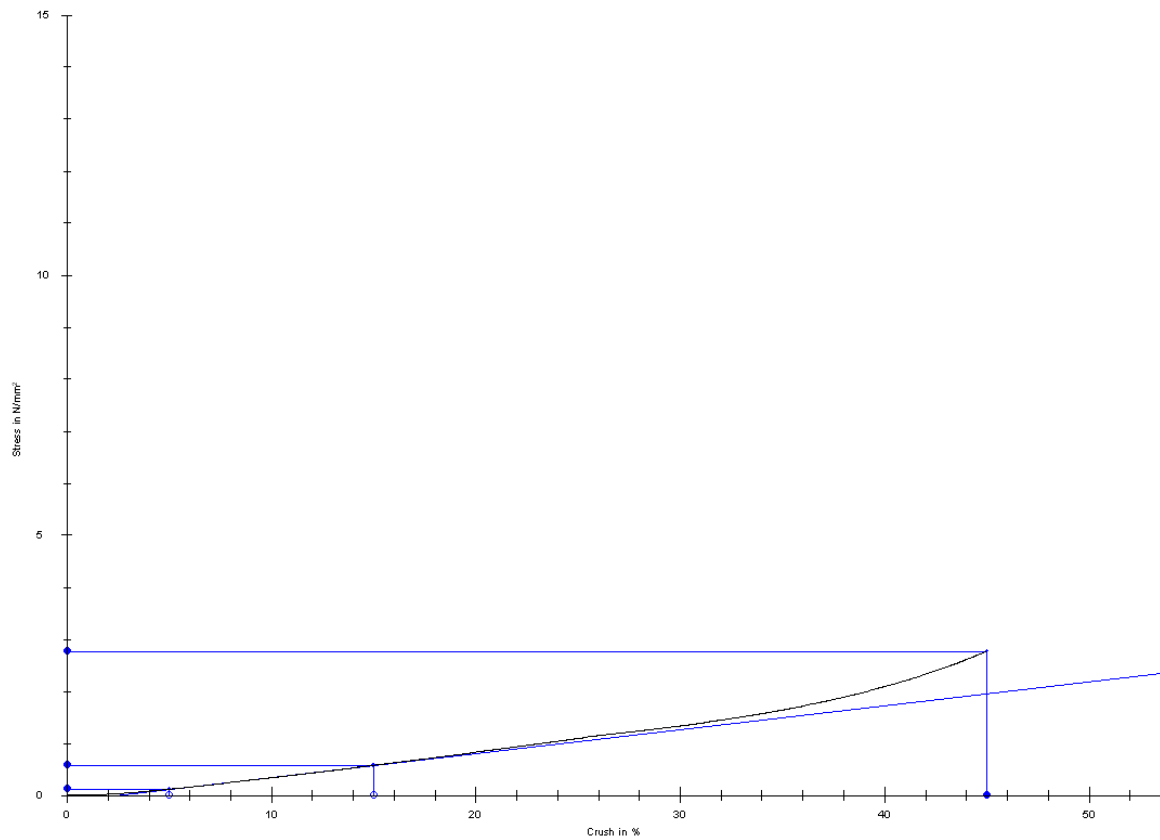
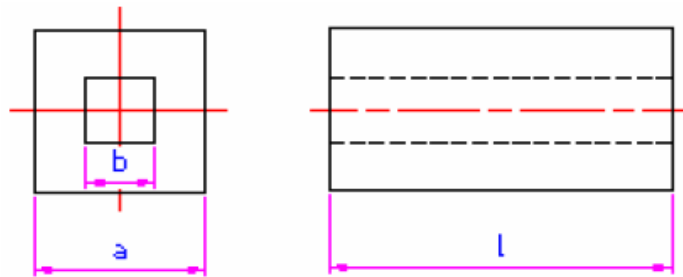
σ	F	ϵ	δ	E
MPa	N	%	mm	N/mm ²
2,99	5975,38	45	17,03	5,05

PŘÍLOHA P XIX: TLAKOVÁ ZKOUŠKA, NAMĚŘENÉ HODNOTY

Materiál: S 1234

Teplota: 60 °C

Těleso: $a = 49\text{mm}$, $b = 20\text{mm}$, $l = 30\text{mm}$



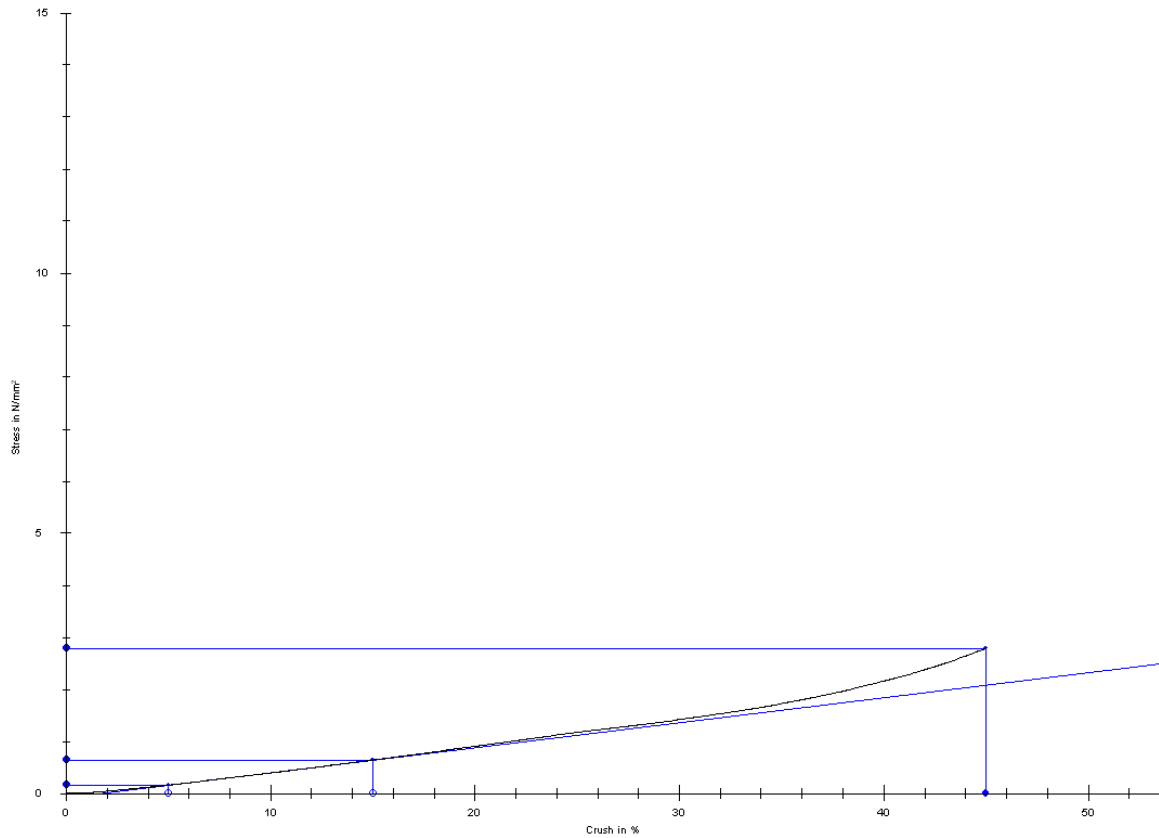
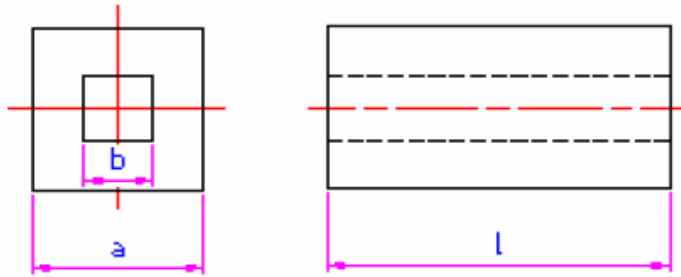
σ	F	ε	δ	E
MPa	N	%	mm	N/mm ²
2,75	5498,94	45	17,03	4,57

PŘÍLOHA P XX: TLAKOVÁ ZKOUŠKA, NAMĚŘENÉ HODNOTY

Materiál: S 1234

Teplota: 100 °C

Těleso: $a = 49\text{mm}$, $b = 20\text{mm}$, $l = 30\text{mm}$



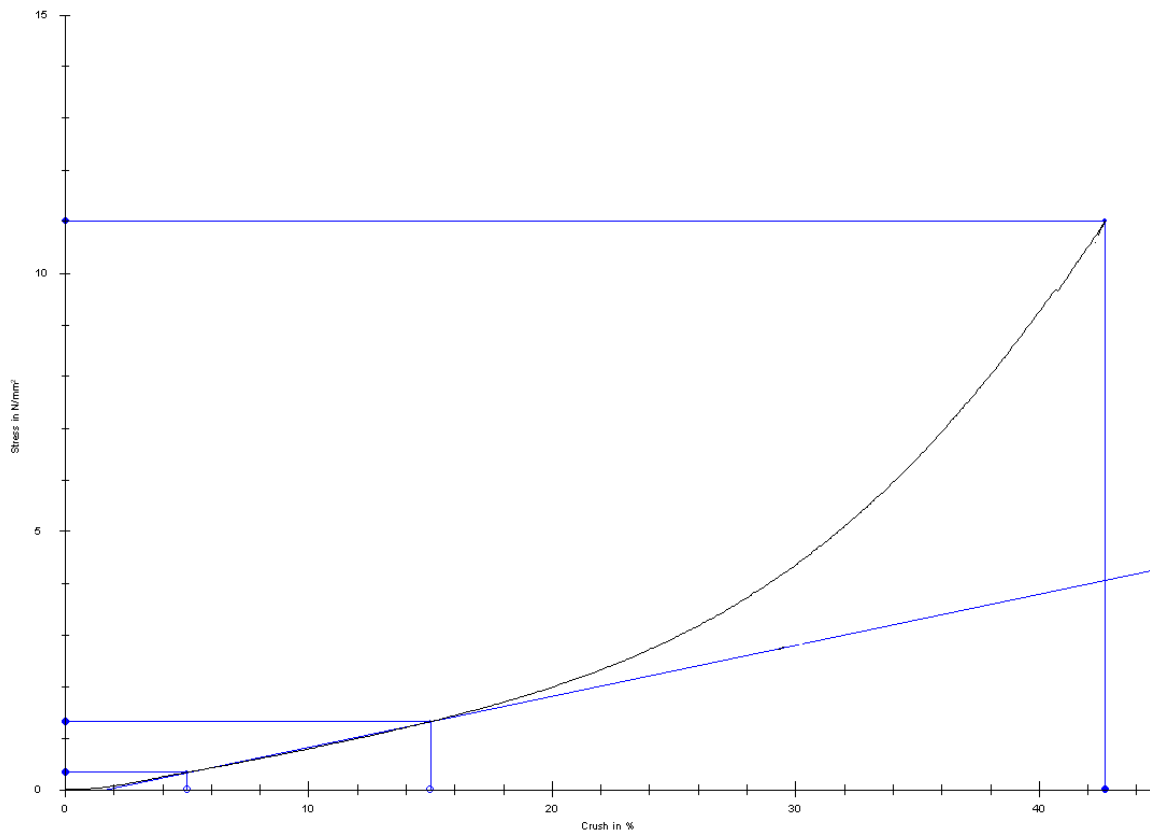
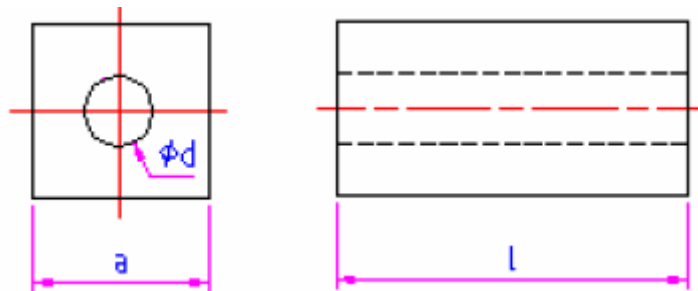
σ	F	ϵ	δ	E
MPa	N	N	mm	N/mm ²
2,77	5537,42	45	16,53	4,8

PŘÍLOHA P XXI: TLAKOVÁ ZKOUŠKA, NAMĚŘENÉ HODNOTY

Materiál: S 1234

Teplota: 20 °C

Těleso: $a = 49\text{mm}$, $\phi d = 20\text{mm}$, $l = 10\text{mm}$



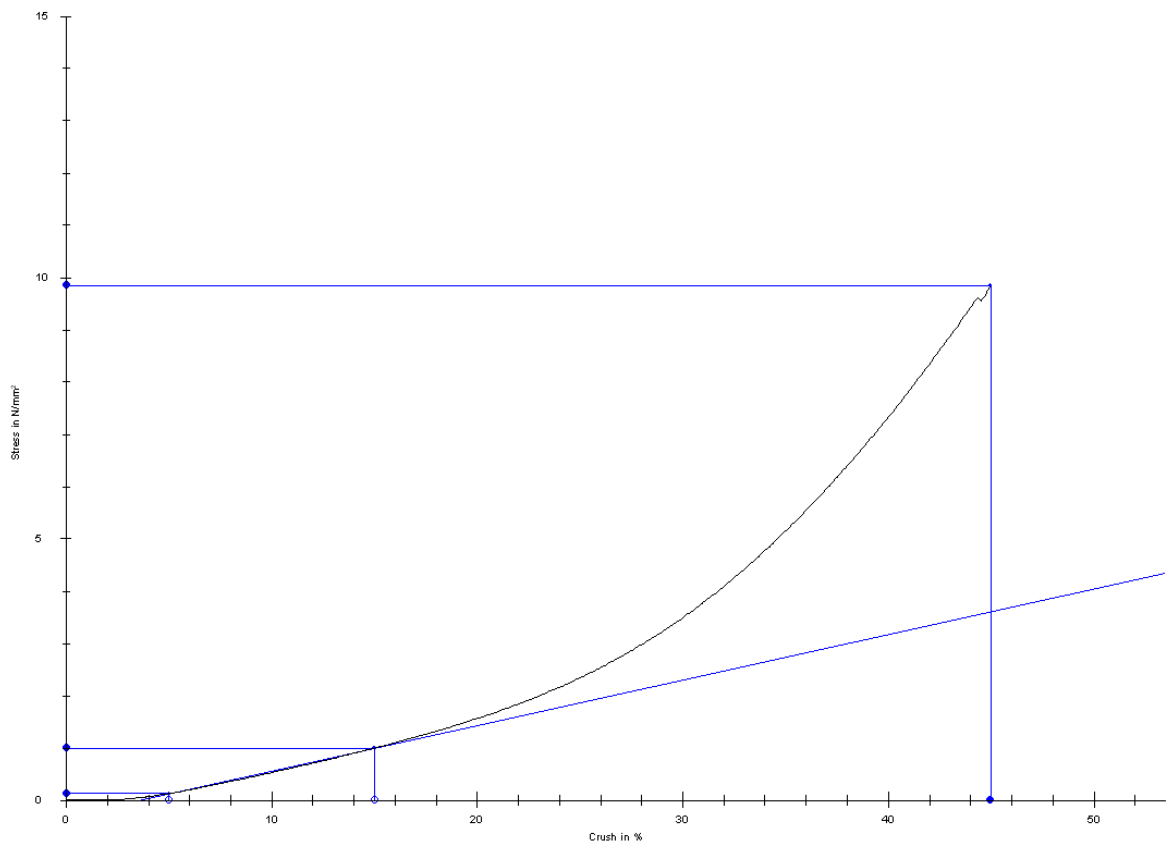
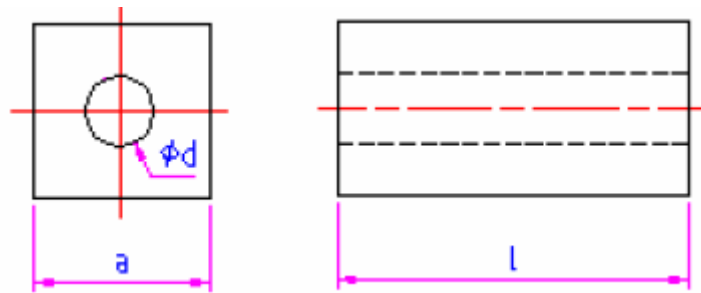
σ	F	ϵ	δ	E
MPa	N	%	mm	N/mm ²
10,7	22327,28	42,71	7,85	9,84

PŘÍLOHA P XXII: TLAKOVÁ ZKOUŠKA, NAMĚŘENÉ HODNOTY

Materiál: S 1234

Teplota: 60 °C

Těleso: $a = 49\text{mm}$, $\phi d = 20\text{mm}$, $l = 10\text{mm}$



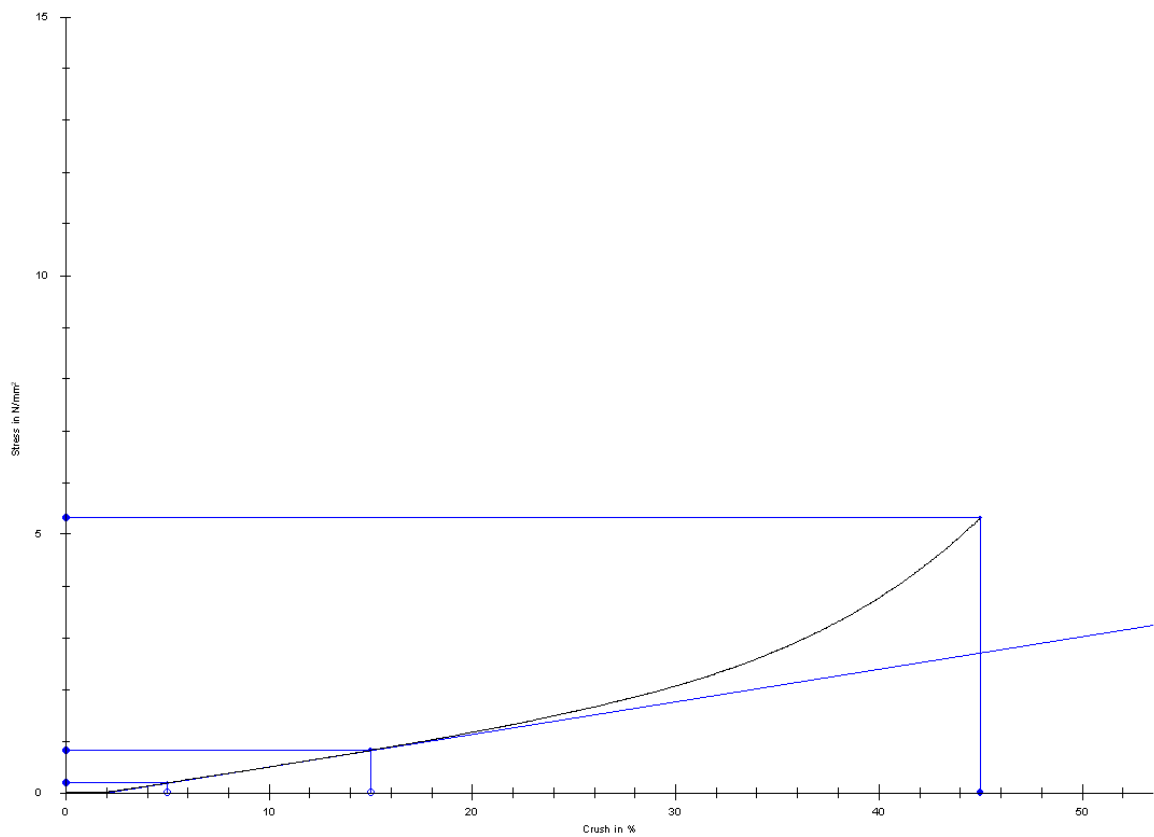
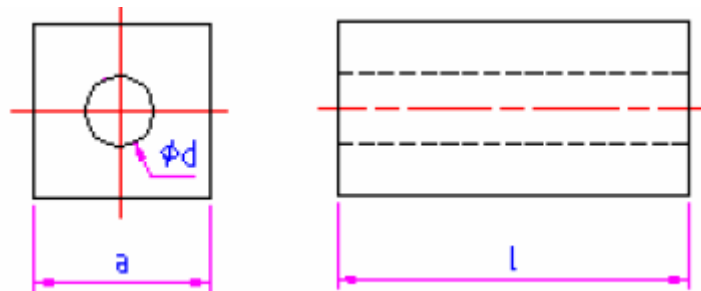
σ	F	ϵ	δ	E
MPa	N	%	mm	N/mm ²
9,57	19975,46	45	8,63	8,68

PŘÍLOHA P XXIII: TLAKOVÁ ZKOUŠKA, NAMĚŘENÉ HODNOTY

Materiál: S 1234

Teplota: 20 °C

Těleso: $a = 49\text{mm}$, $\phi d = 20\text{mm}$, $l = 20\text{mm}$



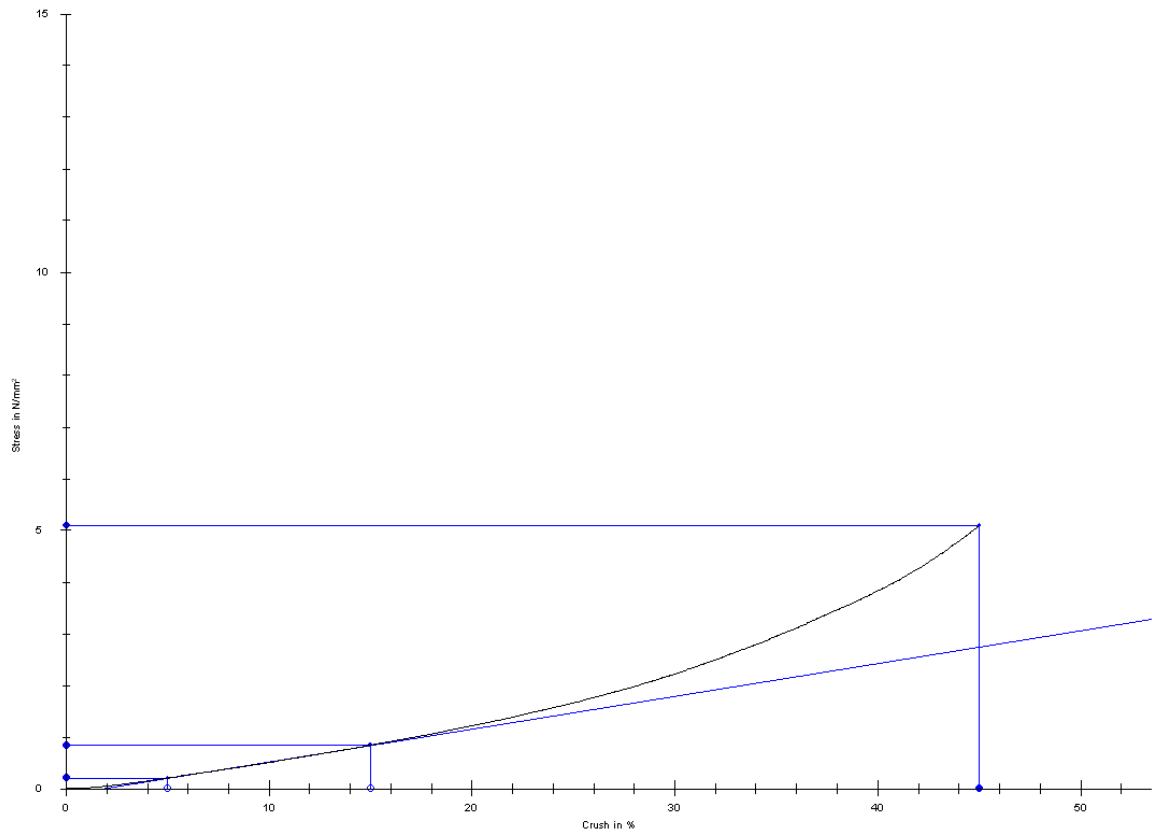
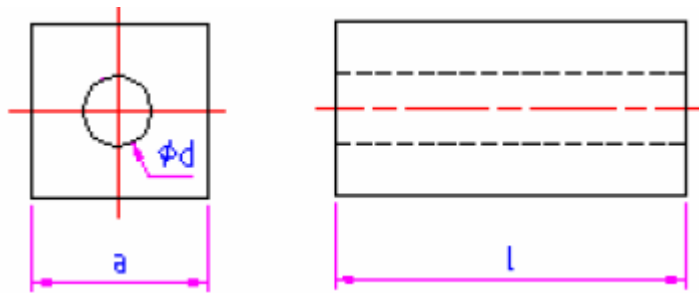
σ	F	ϵ	δ	E
MPa	N	%	mm	N/mm ²
5,17	10781,26	45	12,23	6,3

PŘÍLOHA P XXIV: TLAKOVÁ ZKOUŠKA, NAMĚŘENÉ HODNOTY

Materiál: S 1234

Teplota: 60 °C

Těleso: $a = 49\text{mm}$, $\varnothing d = 20\text{mm}$, $l = 20\text{mm}$



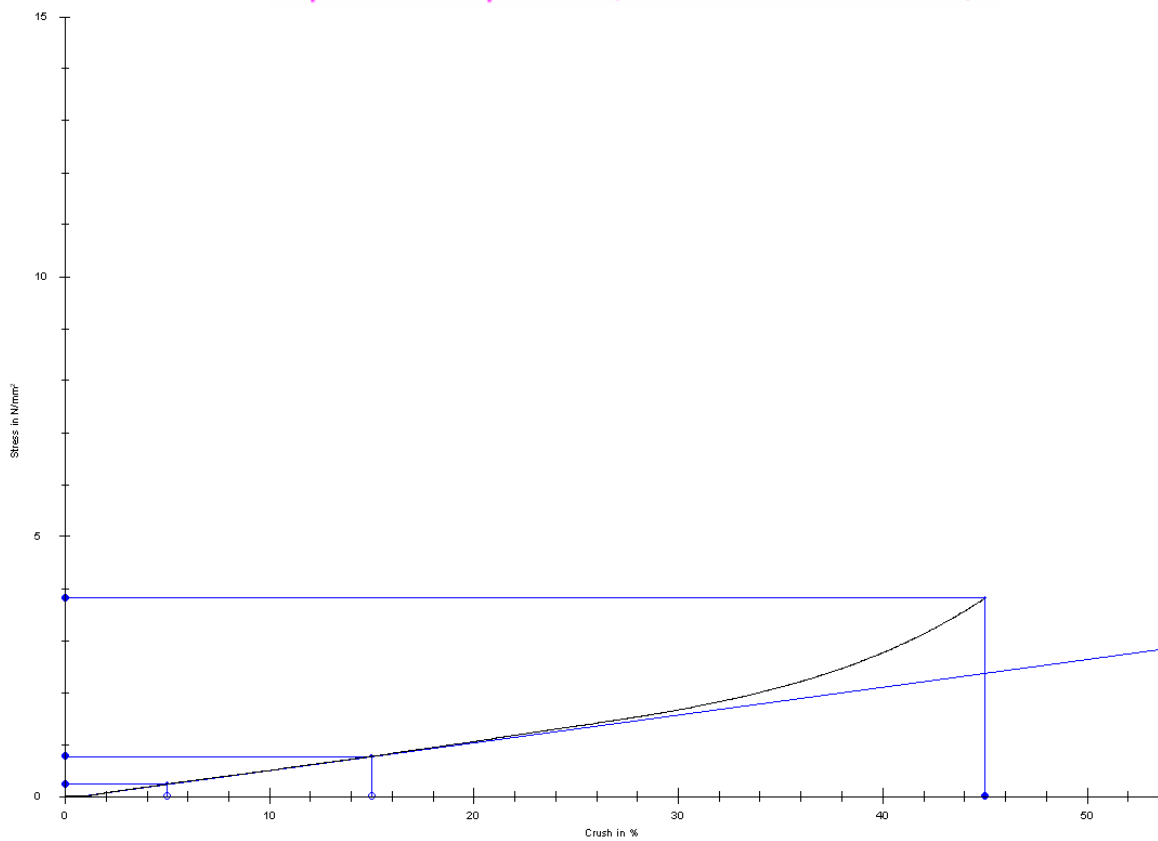
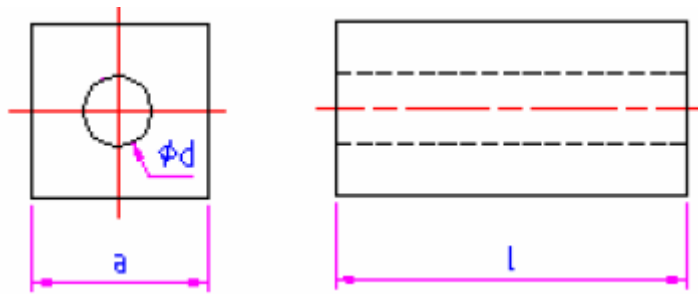
σ	F	ε	δ	E
MPa	N	%	mm	N/mm
4,95	10334,86	45	12,03	6,35

PŘÍLOHA P XXV: TLAKOVÁ ZKOUŠKA, NAMĚŘENÉ HODNOTY

Materiál: S 1234

Teplota: 20 °C

Těleso: $a = 49\text{mm}$, $\phi d = 20\text{mm}$, $l = 30\text{mm}$



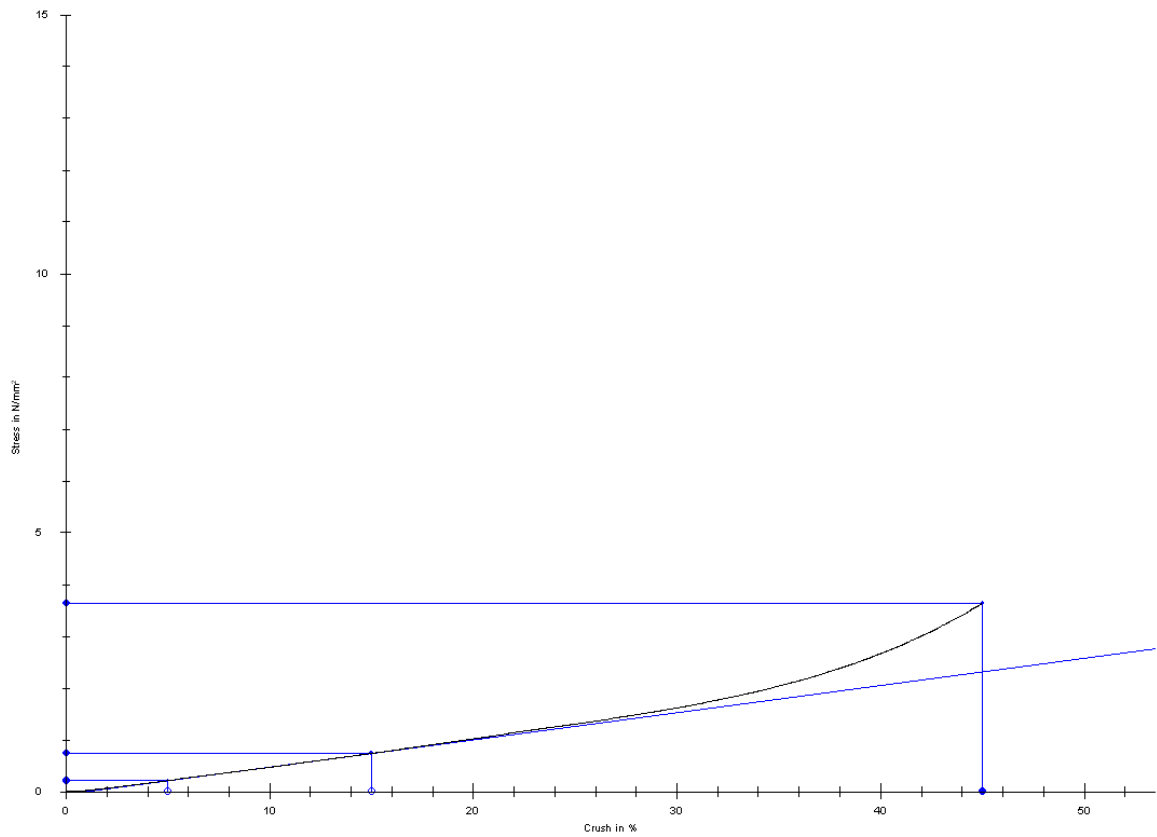
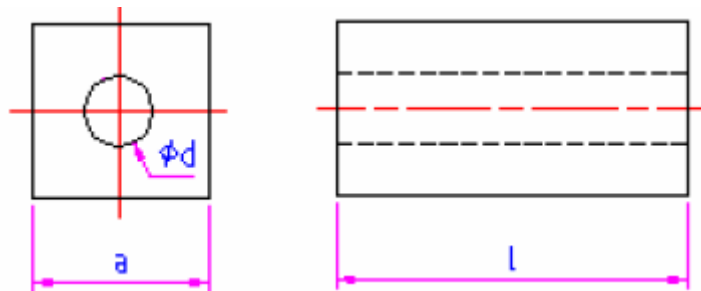
σ	F	ϵ	δ	E
MPa	N	%	mm	N/mm^2
3,71	7743,27	45	16,39	5,35

PŘÍLOHA P XXVI: TLAKOVÁ ZKOUŠKA, NAMĚŘENÉ HODNOTY

Materiál: S 1234

Teplota: 60 °C

Těleso: a = 49mm, $\phi d = 20\text{mm}$, l = 30mm



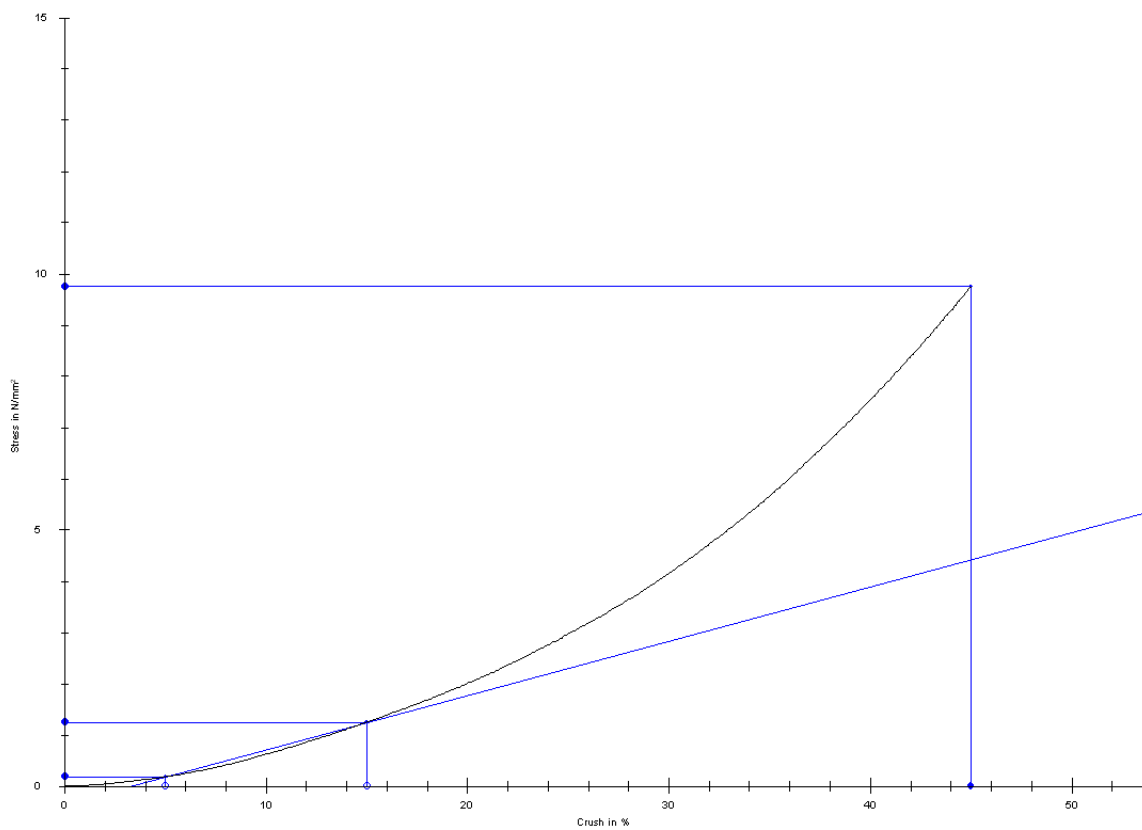
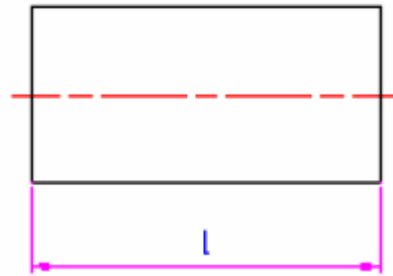
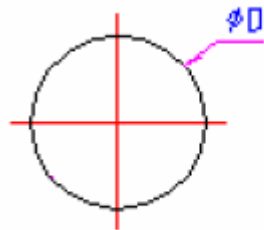
σ	F	ϵ	δ	E
MPa	N	%	mm	N/mm ²
3,54	7378,56	45	16,69	5,23

PŘÍLOHA P XXVII: TLAKOVÁ ZKOUŠKA, NAMĚŘENÉ HODNOTY

Materiál: S 1234

Teplota: 20 °C

Těleso: $\varnothing D = 49\text{mm}$, $l = 10\text{mm}$



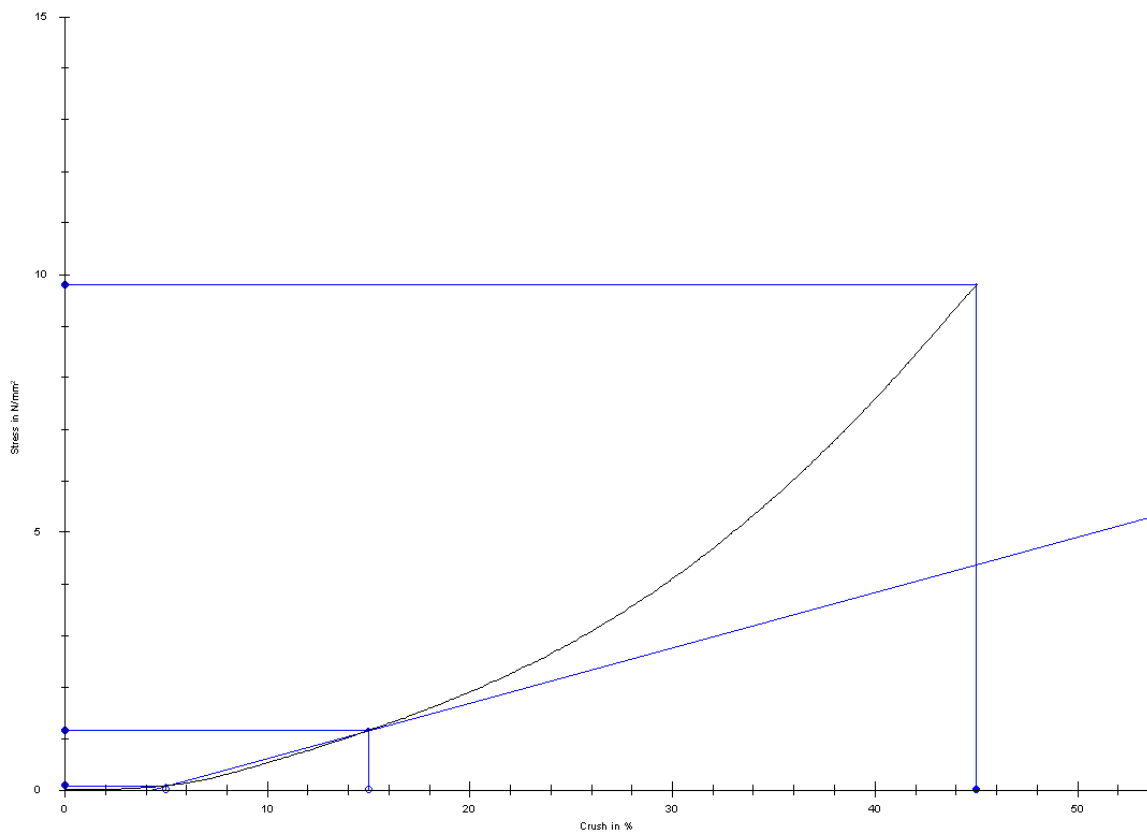
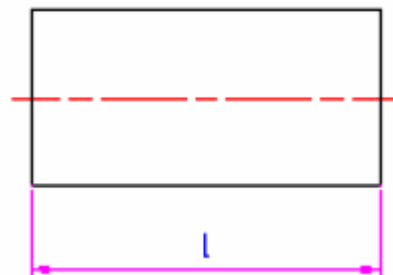
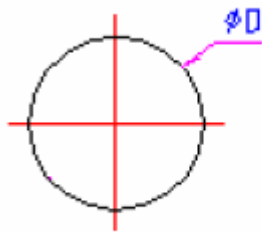
σ	F	ϵ	δ	E
MPa	N	%	mm	N/mm ²
9,87	18614,67	45	6,79	10,6

PŘÍLOHA P XXVIII: TLAKOVÁ ZKOUŠKA, NAMĚŘENÉ HODNOTY

Materiál: S 1234

Teplota: 60 °C

Těleso: $\varnothing D = 49\text{mm}$, $l = 10\text{mm}$



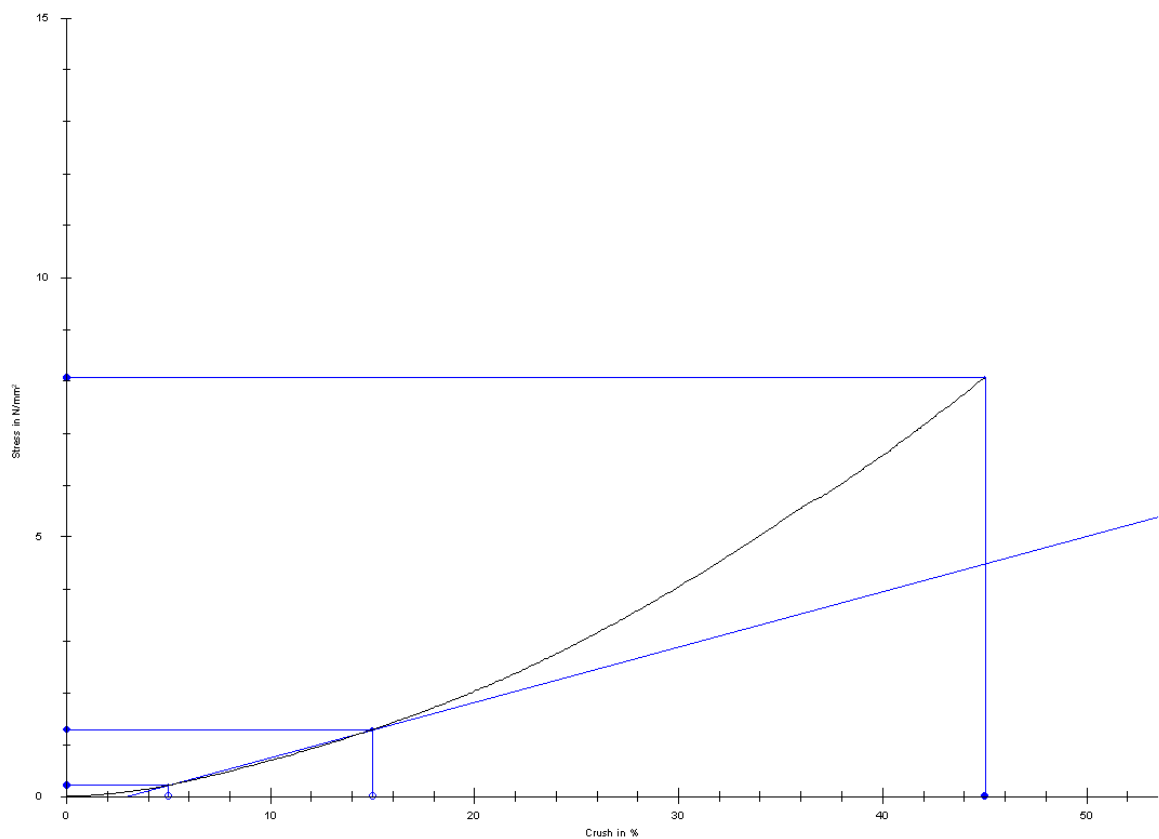
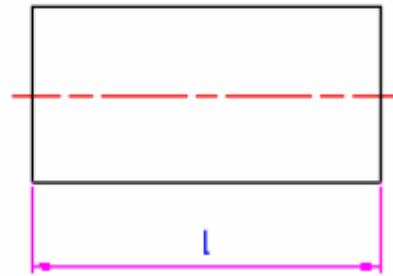
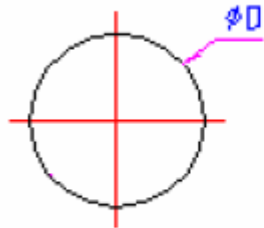
σ	F	ε	δ	E
MPa	N	%	mm	N/mm ²
9,91	18693,9	45	6,41	10,71

PŘÍLOHA P XXIX: TLAKOVÁ ZKOUŠKA, NAMĚŘENÉ HODNOTY

Materiál: S 1234

Teplota: 100 °C

Těleso: $\varnothing D = 49\text{mm}$, $l = 10\text{mm}$



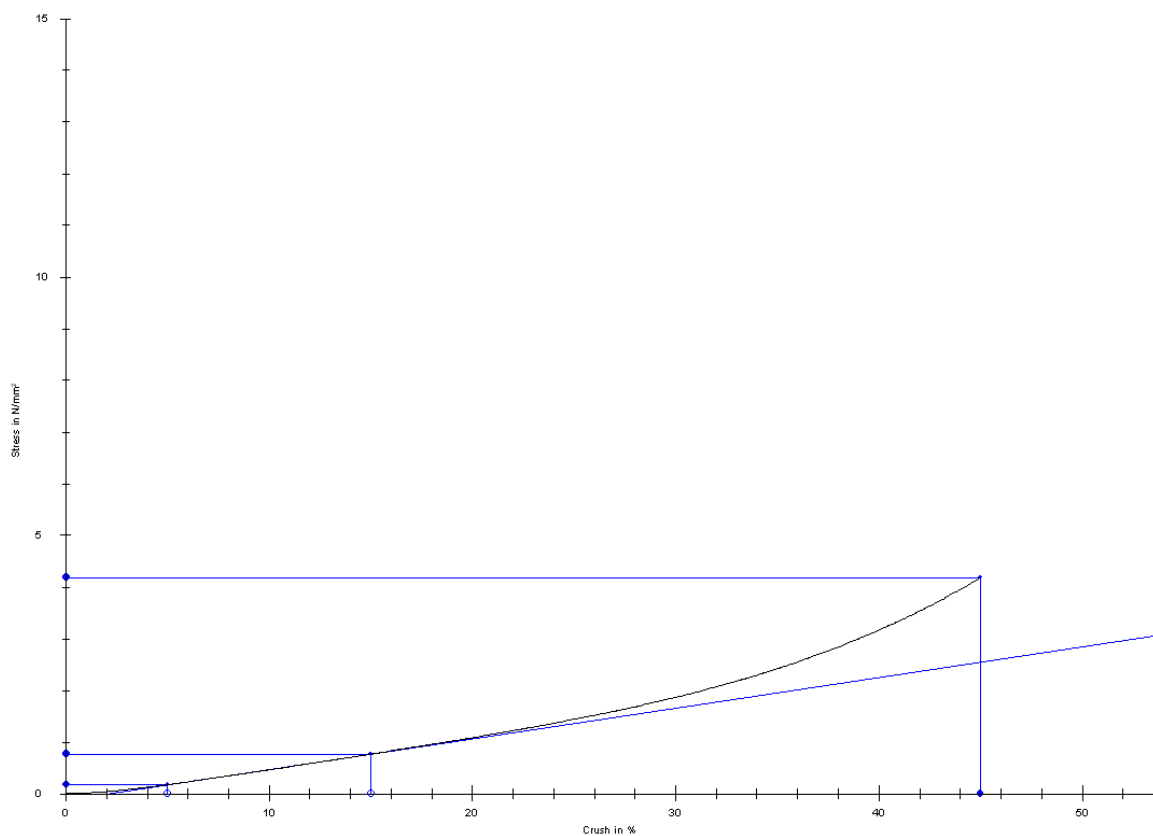
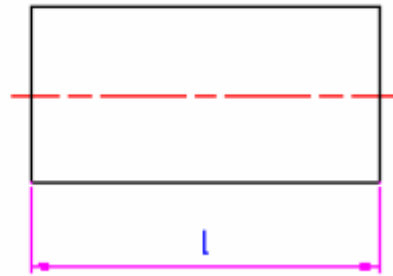
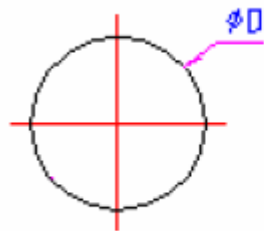
σ	F	ϵ	δ	E
MPa	N	%	mm	N/mm ²
8,16	15392,34	45	6,56	10,67

PŘÍLOHA P XXX: TLAKOVÁ ZKOUŠKA, NAMĚŘENÉ HODNOTY

Materiál: S 1234

Teplota: 20 °C

Těleso: $\varnothing D = 49\text{mm}$, $l = 20\text{mm}$



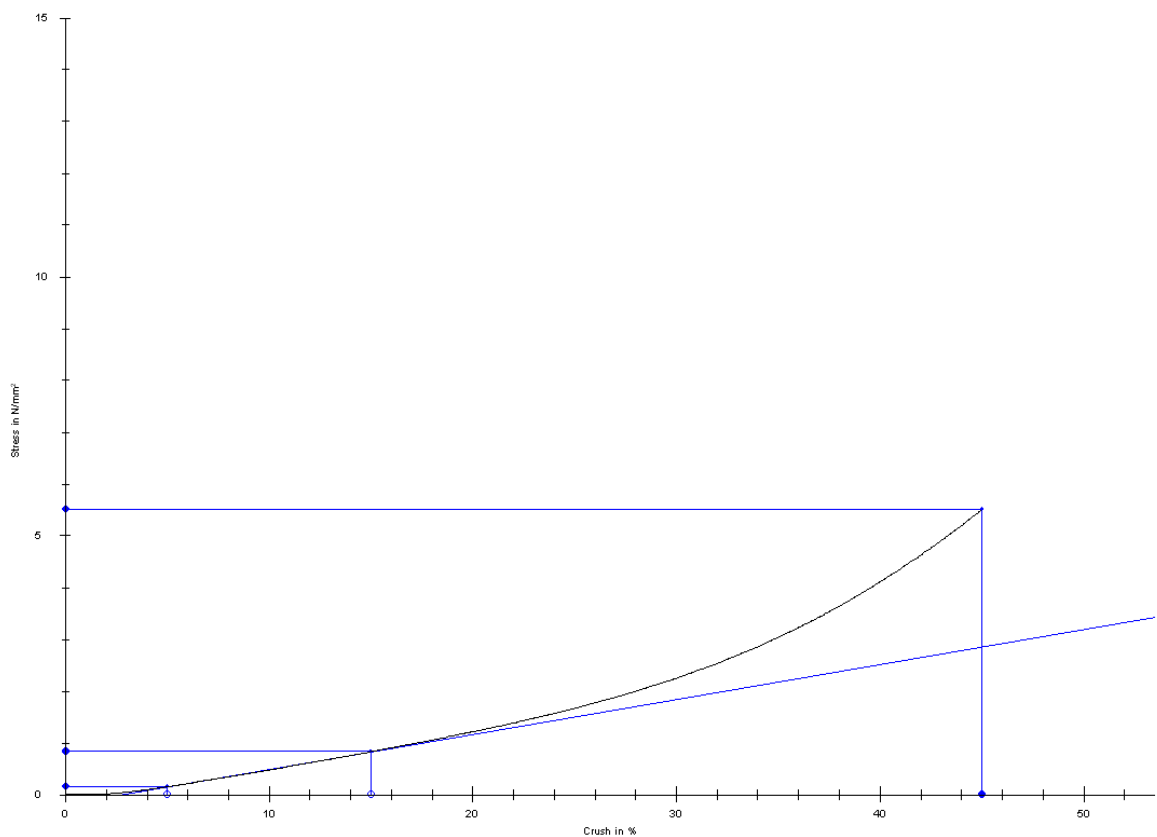
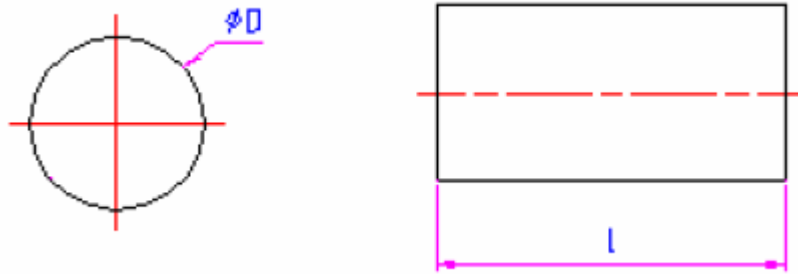
σ	F	ϵ	δ	E
MPa	N	%	mm	N/mm ²
4,24	7986,57	45	11,44	5,9

PŘÍLOHA P XXXI: TLAKOVÁ ZKOUŠKA, NAMĚŘENÉ HODNOTY

Materiál: S 1234

Teplota: 60 °C

Těleso: $\varnothing D = 49\text{mm}$, $l = 20\text{mm}$



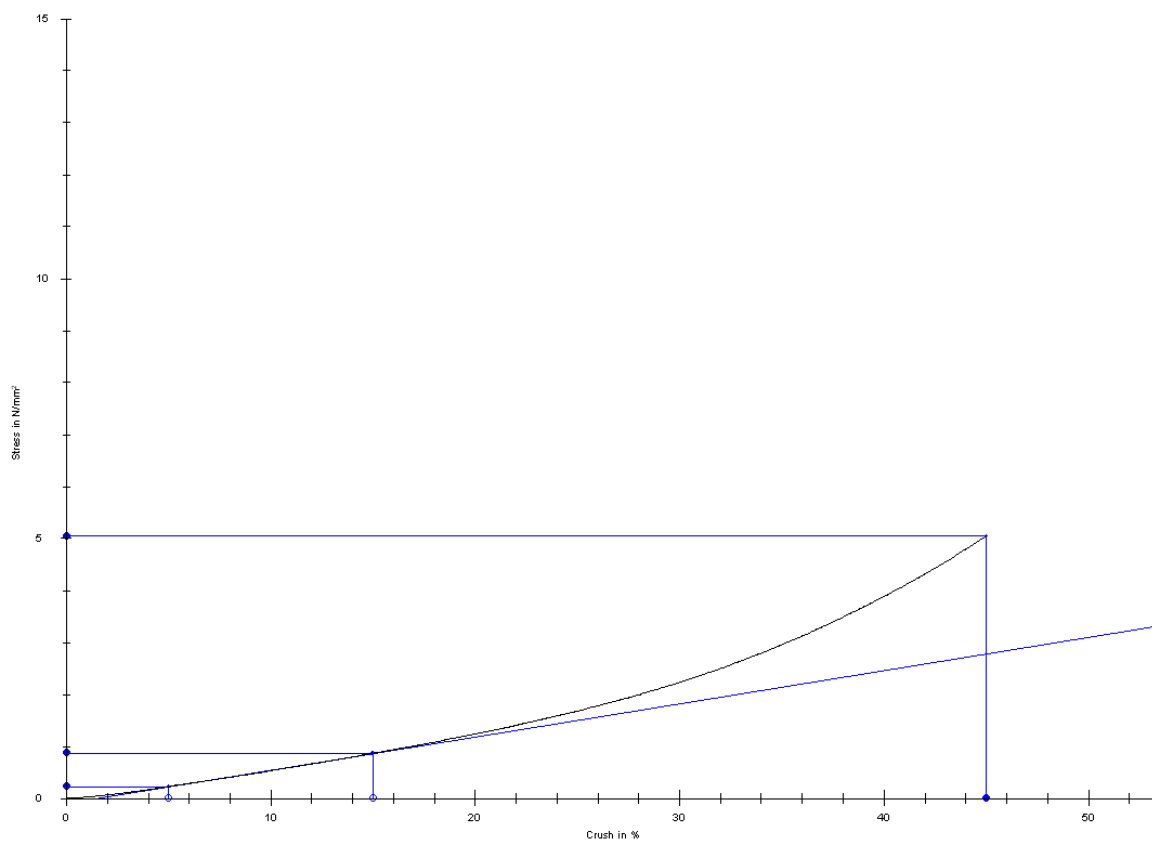
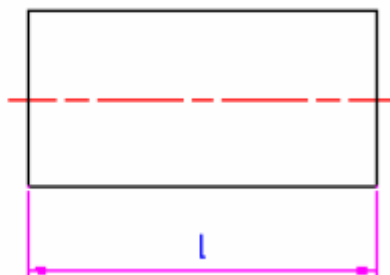
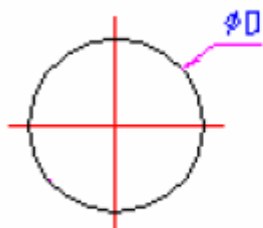
σ	F	ε	δ	E
MPa	N	%	mm	N/mm ²
5,58	10519,87	45	11,94	6,76

PŘÍLOHA P XXXII: TLAKOVÁ ZKOUŠKA, NAMĚŘENÉ HODNOTY

Materiál: S 1234

Teplota: 100 °C

Těleso: $\varnothing D = 49\text{mm}$, $l = 20\text{mm}$



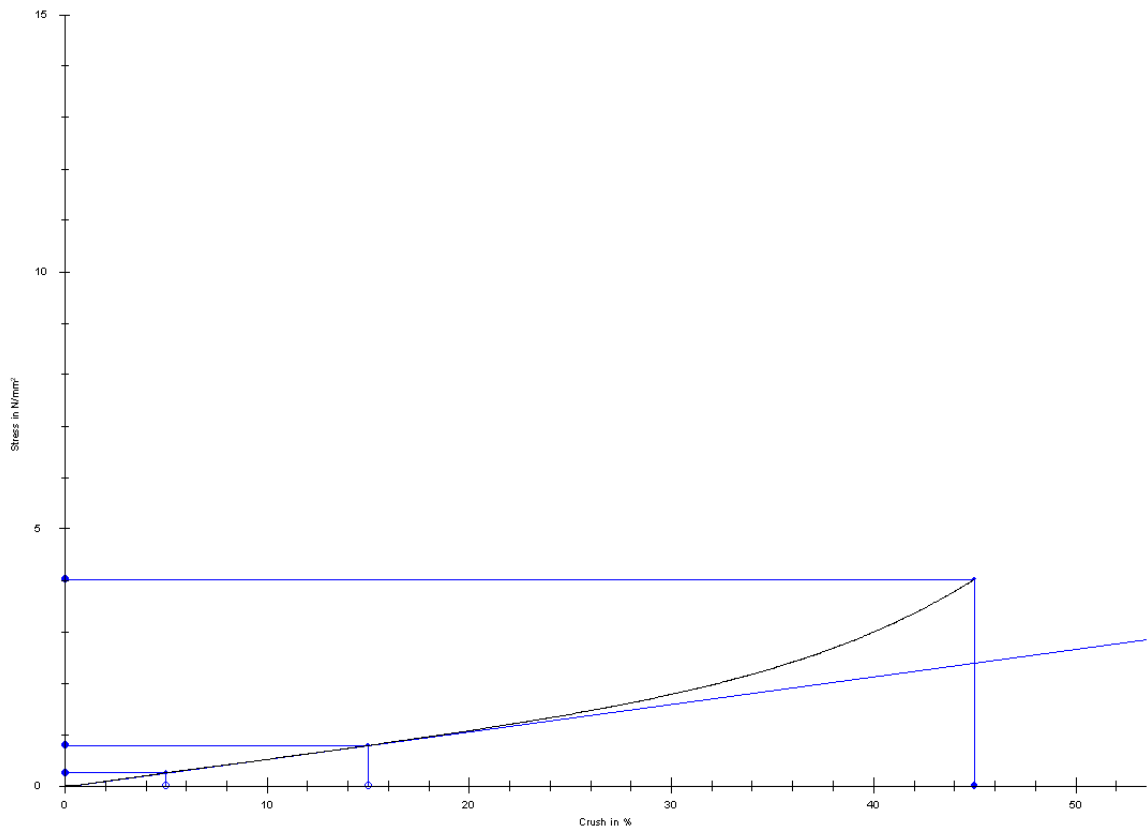
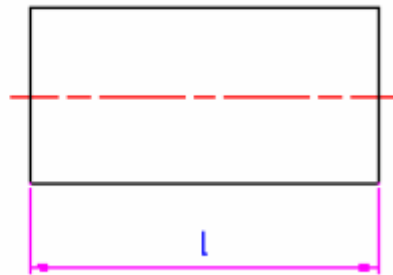
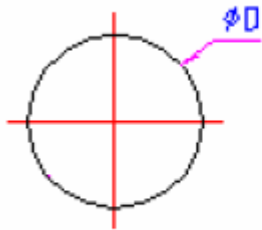
σ	F	ϵ	δ	E
MPa	N	%	mm	N/mm^2
5,12	9628,03	45	11,88	6,38

PŘÍLOHA P XXXIII: TLAKOVÁ ZKOUŠKA, NAMĚŘENÉ HODNOTY

Materiál: S 1234

Teplota: 20 °C

Těleso: $\varnothing D = 49\text{mm}$, $l = 30\text{mm}$



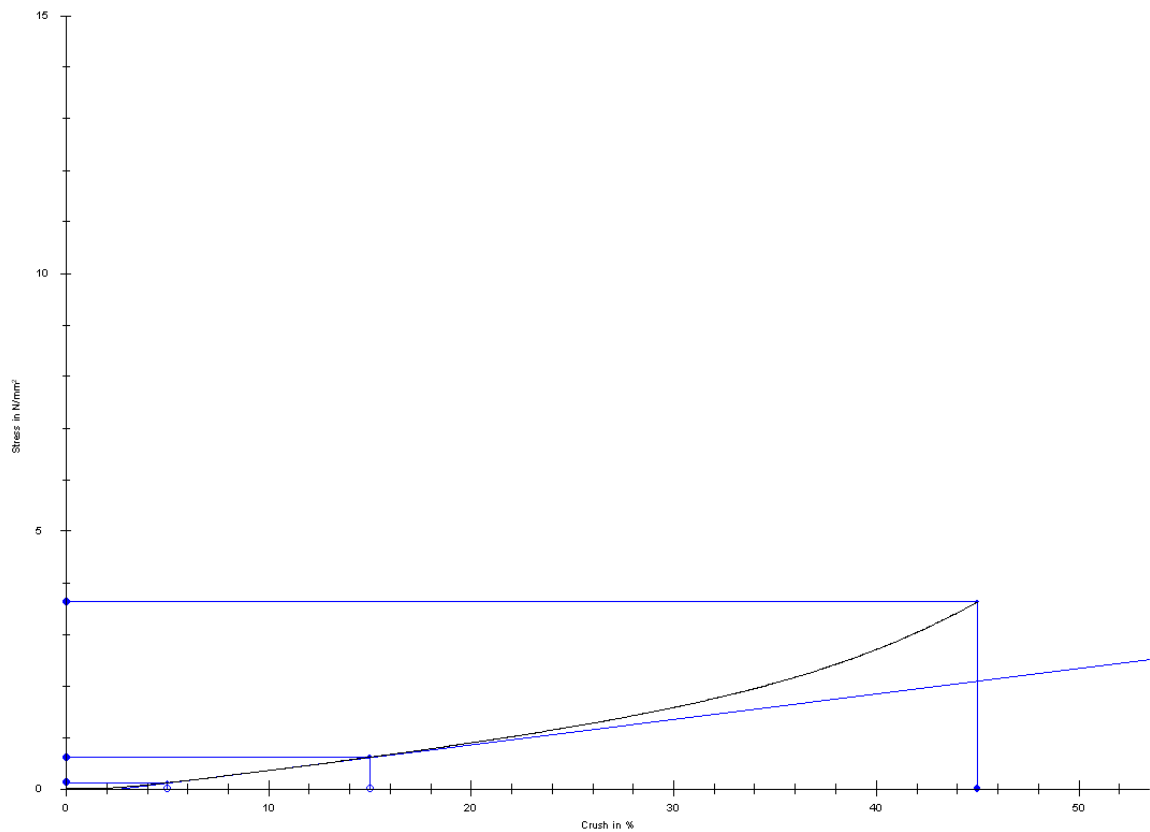
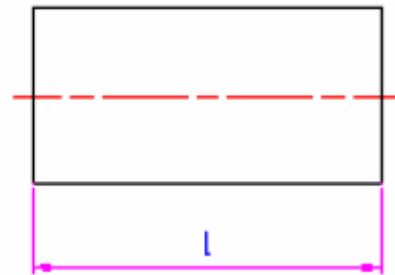
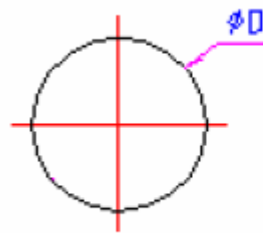
σ	F	ϵ	δ	E
MPa	N	%	mm	N/mm ²
4,07	7676,56	45	15,48	5,33

PŘÍLOHA P XXXIV: TLAKOVÁ ZKOUŠKA, NAMĚŘENÉ HODNOTY

Materiál: S 1234

Teplota: 60 °C

Těleso: $\varnothing D = 49\text{mm}$, $l = 30\text{mm}$



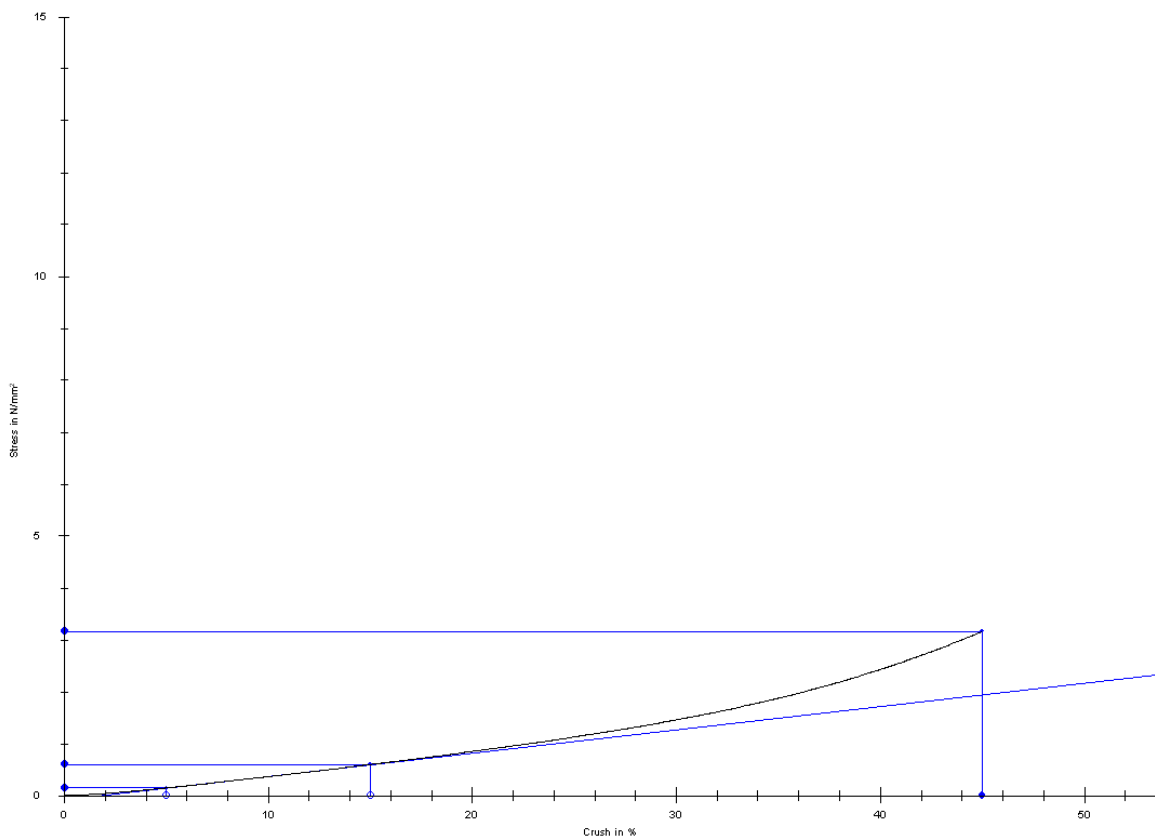
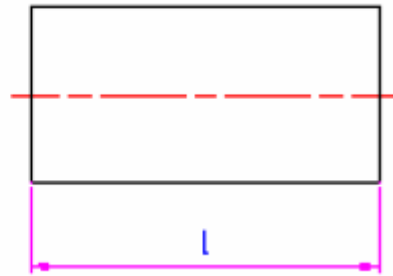
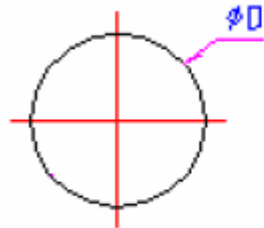
σ	F	ϵ	δ	E
MPa	N	%	mm	N/mm ²
3,67	6922,19	45	16,07	4,49

PŘÍLOHA P XXXV: TLAKOVÁ ZKOUŠKA, NAMĚŘENÉ HODNOTY

Materiál: S 1234

Teplota: 100 °C

Těleso: $\varnothing D = 49\text{mm}$, $l = 30\text{mm}$



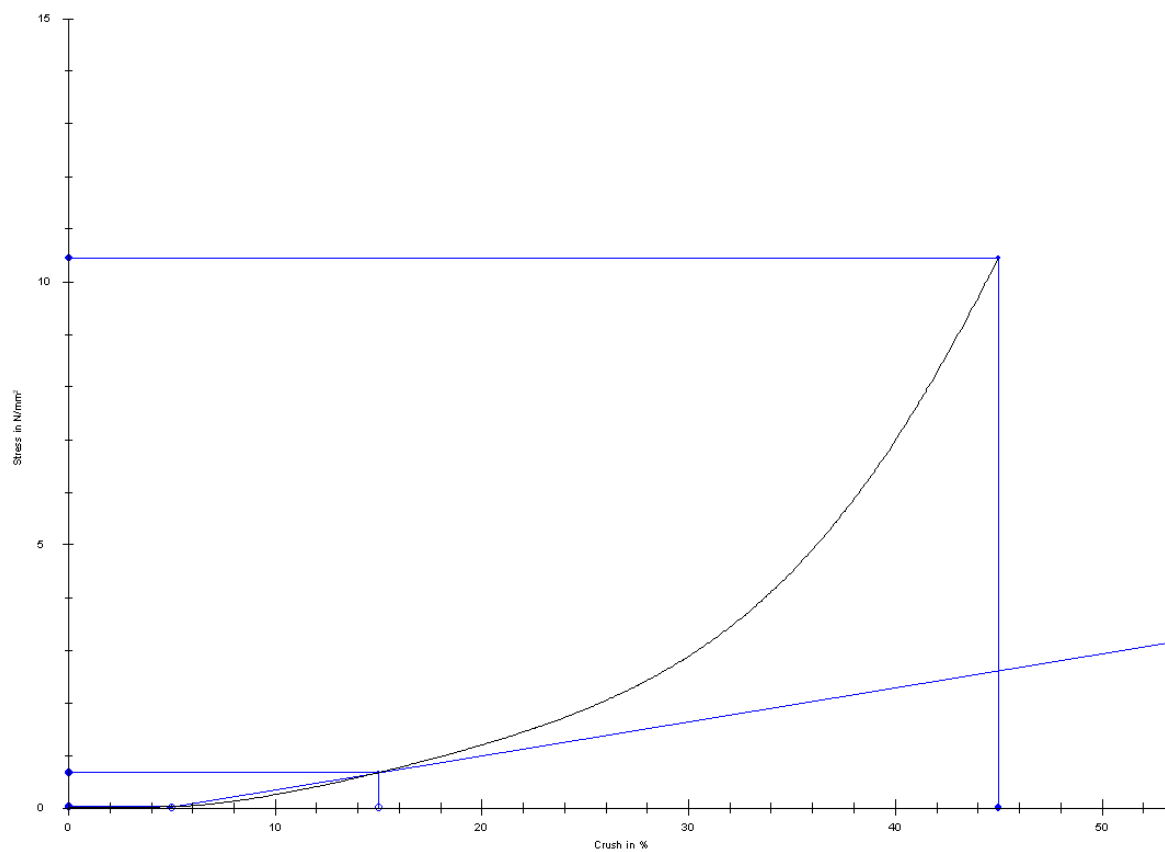
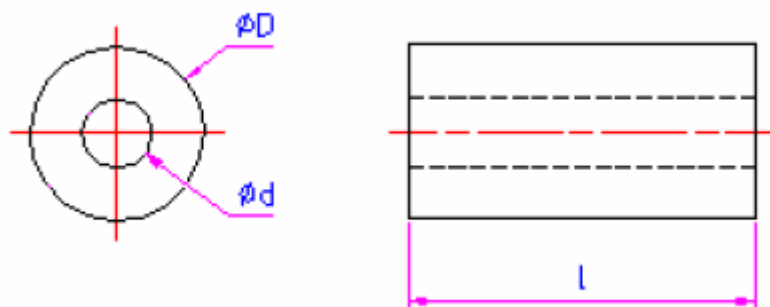
σ	F	ϵ	δ	E
MPa	N	%	mm	N/mm ²
3,21	6044,26	45	16,04	4,49

PŘÍLOHA P XXXVI: TLAKOVÁ ZKOUŠKA, NAMĚŘENÉ HODNOTY

Materiál: S 1234

Teplota: 20 °C

Těleso: $\phi D = 49\text{mm}$, $\phi d = 20\text{mm}$, $l = 10\text{mm}$



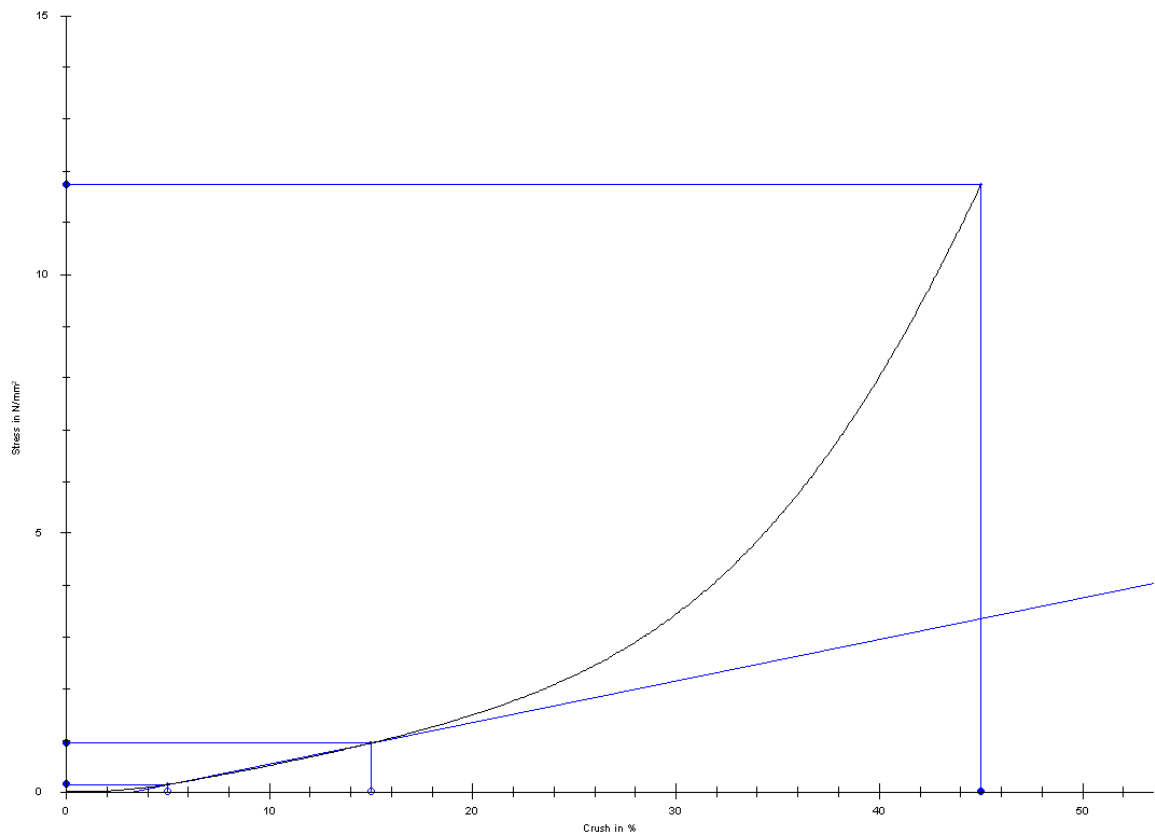
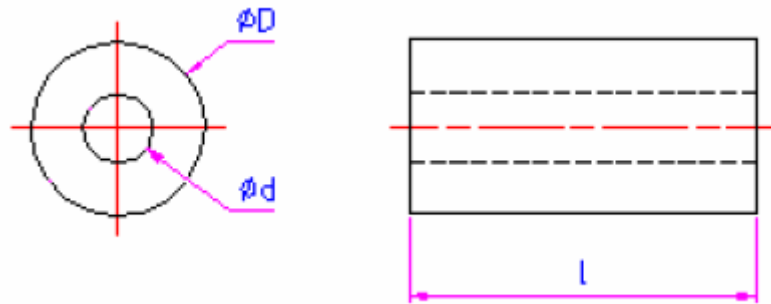
σ	F	ϵ	δ	E
MPa	N	%	mm	N/mm ²
10,36	16288,68	45	8,71	6,47

PŘÍLOHA P XXXVII: TLAKOVÁ ZKOUŠKA, NAMĚŘENÉ HODNOTY

Materiál: S 1234

Teplota: 60 °C

Těleso: $\phi D = 49\text{mm}$, $\phi d = 20\text{mm}$, $l = 10\text{mm}$



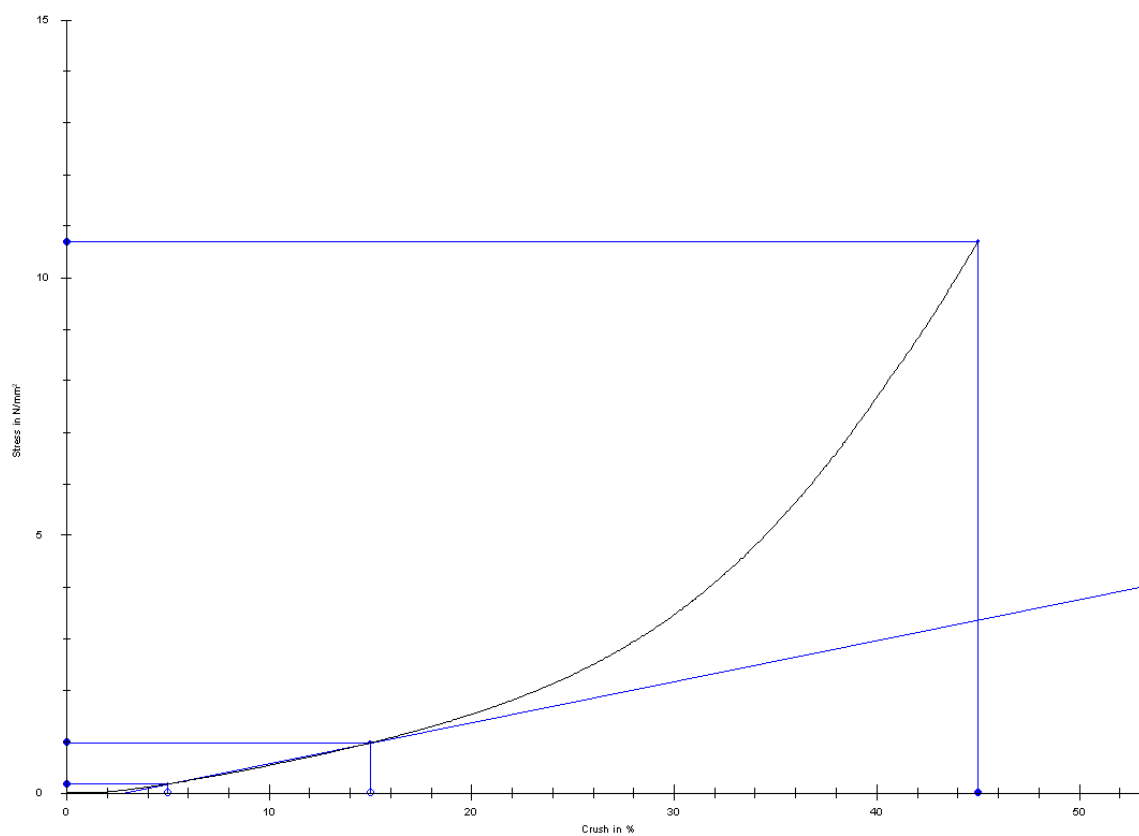
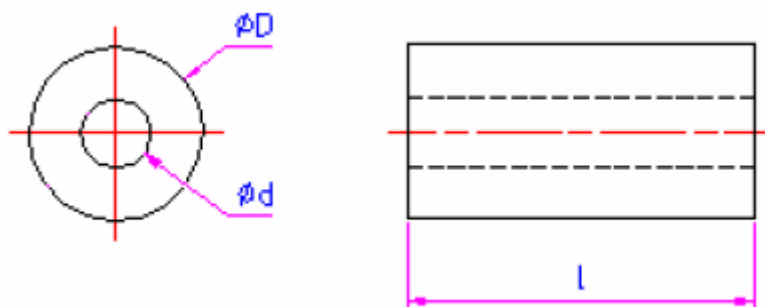
σ	F	ϵ	δ	E
MPa	N	%	mm	N/mm^2
11,64	18292,42	45	8,77	8

PŘÍLOHA P XXXVIII: TLAKOVÁ ZKOUŠKA, NAMĚŘENÉ HODNOTY

Materiál: S 1234

Teplota: 100 °C

Těleso: $\phi D = 49\text{mm}$, $\phi d = 20\text{mm}$, $l = 10\text{mm}$



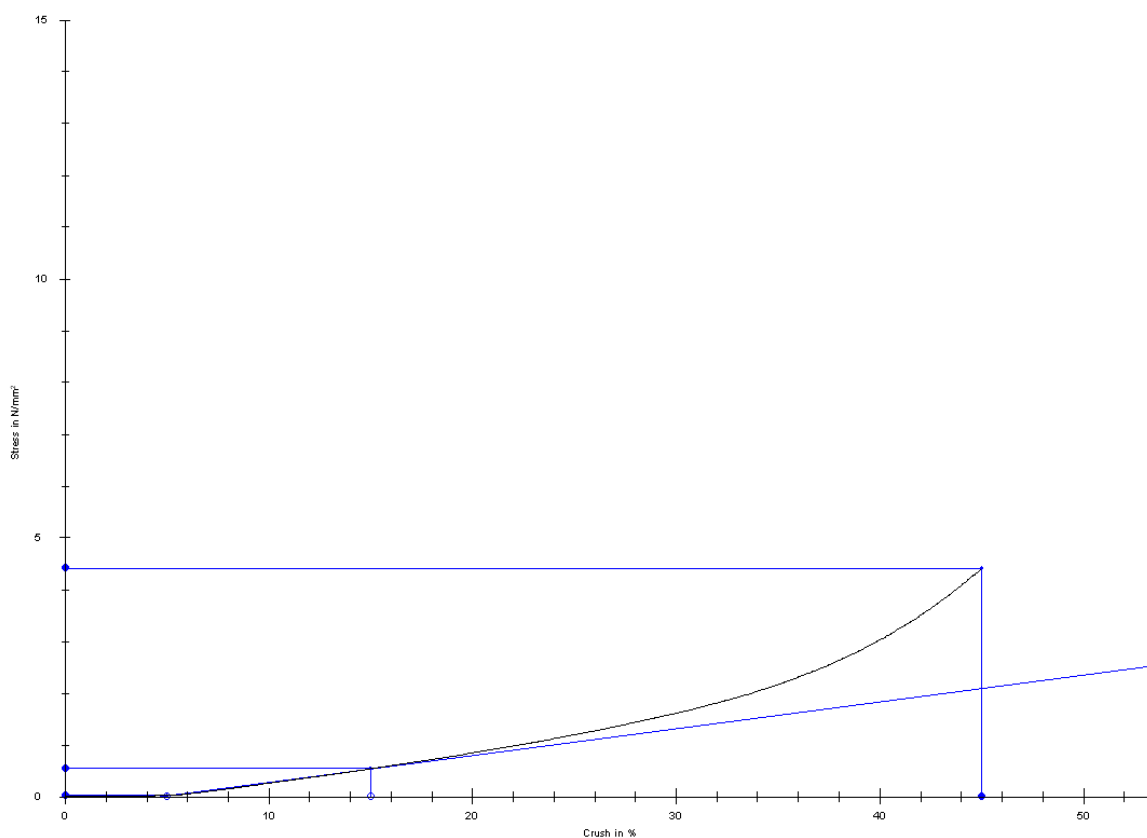
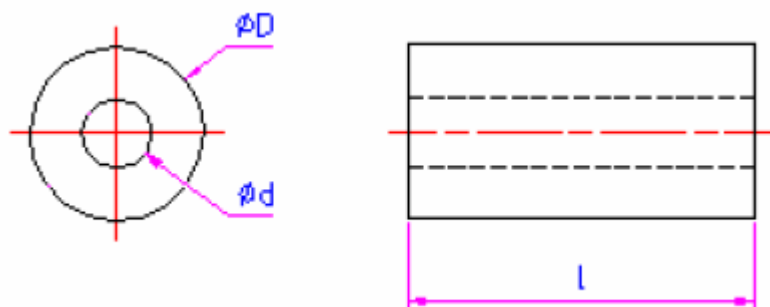
σ	F	ϵ	δ	E
MPa	N	%	mm	N/mm ²
10,61	16678,92	45	8,88	7,97

PŘÍLOHA P XXXIX: TLAKOVÁ ZKOUŠKA, NAMĚŘENÉ HODNOTY

Materiál: S 1234

Teplota: 20 °C

Těleso: $\phi D = 49\text{mm}$, $\phi d = 20\text{mm}$, $l = 20\text{mm}$



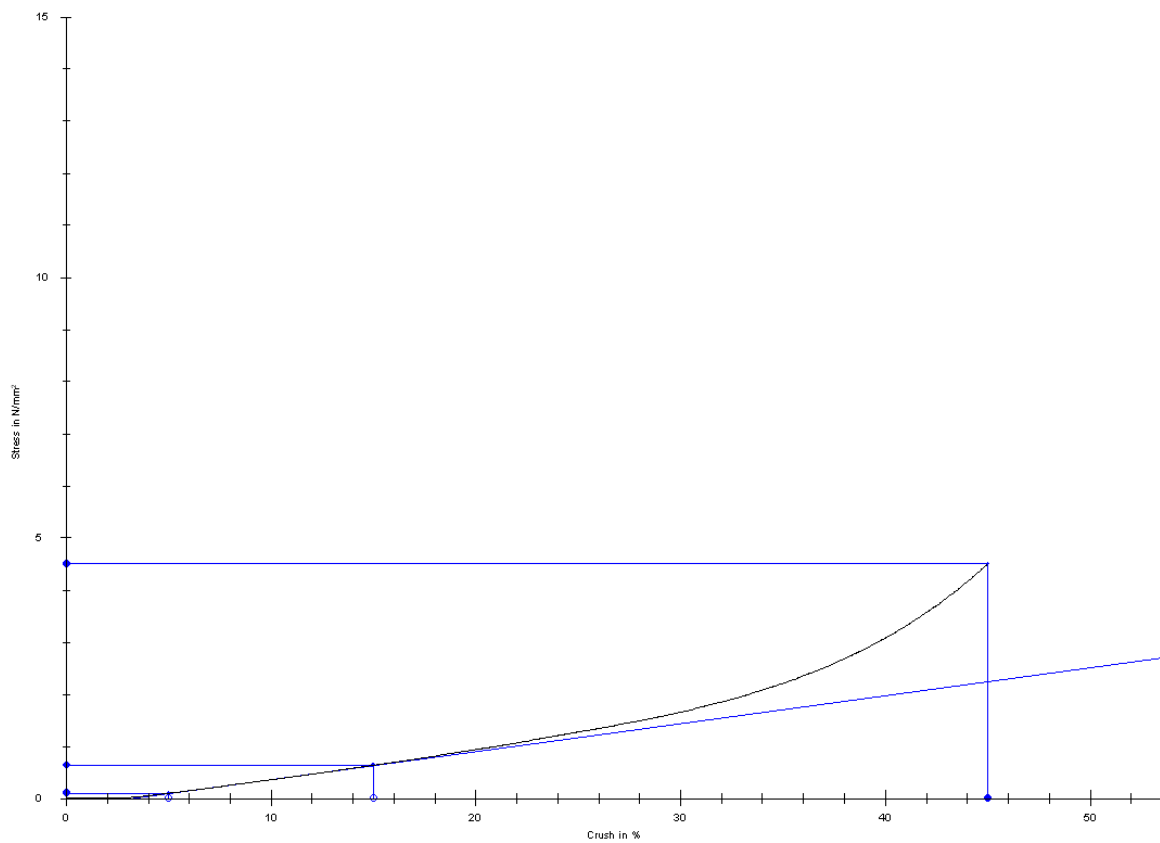
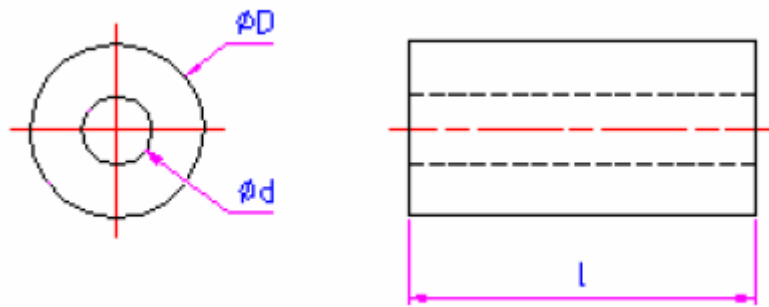
σ	F	ϵ	δ	E
MPa	N	%	mm	N/mm ²
4,38	6881,58	45	11,84	5,16

PŘÍLOHA P XL: TLAKOVÁ ZKOUŠKA, NAMĚŘENÉ HODNOTY

Materiál: S 1234

Teplota: 60 °C

Těleso: $\phi D = 49\text{mm}$, $\phi d = 20\text{mm}$, $l = 20\text{mm}$



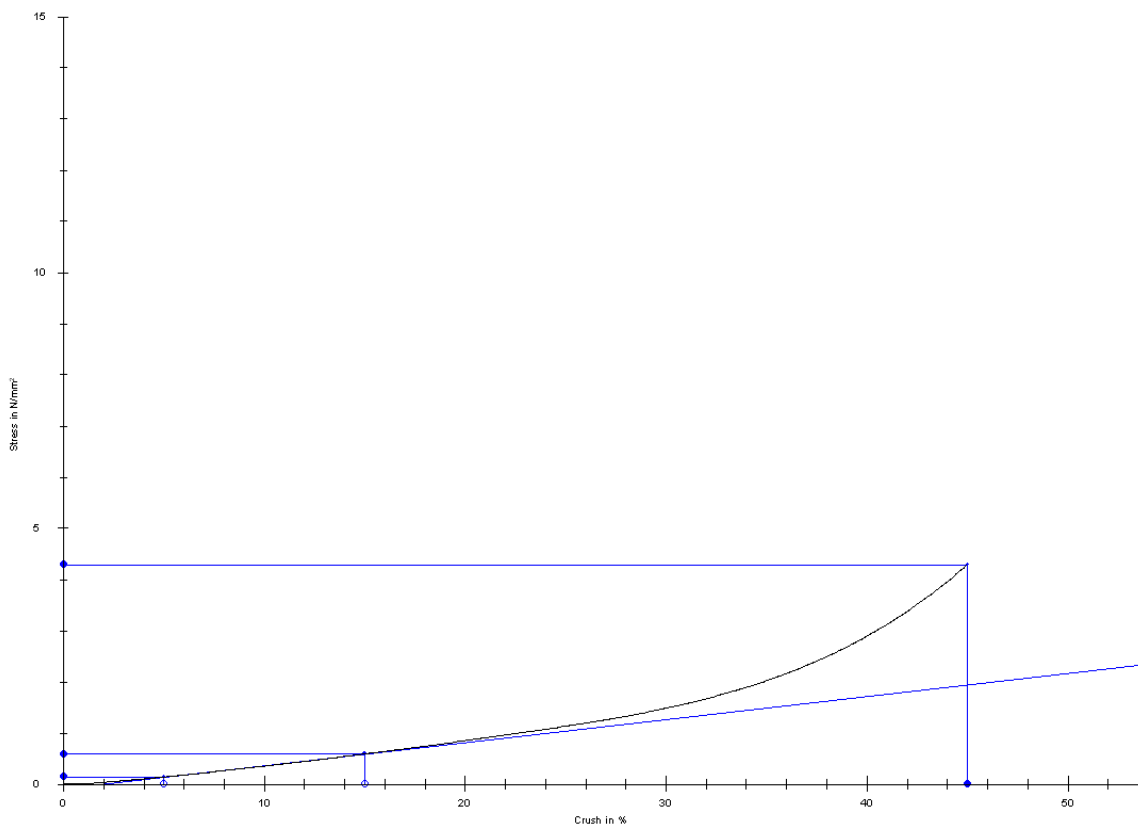
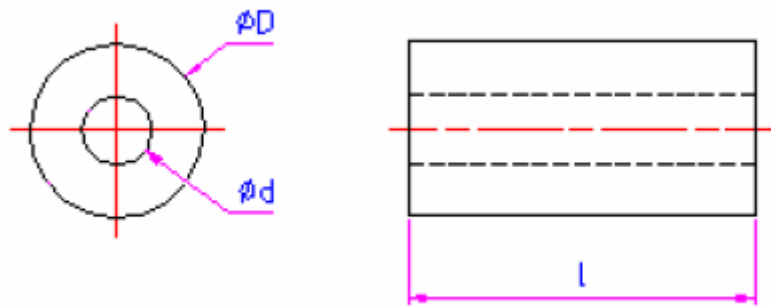
σ	F	ϵ	δ	E
MPa	N	N	mm	N/mm ²
4,47	7021,03	45	12,56	5,37

PŘÍLOHA P XLI: TLAKOVÁ ZKOUŠKA, NAMĚŘENÉ HODNOTY

Materiál: S 1234

Teplota: 100 °C

Těleso: $\phi D = 49\text{mm}$, $\phi d = 20\text{mm}$, $l = 20\text{mm}$



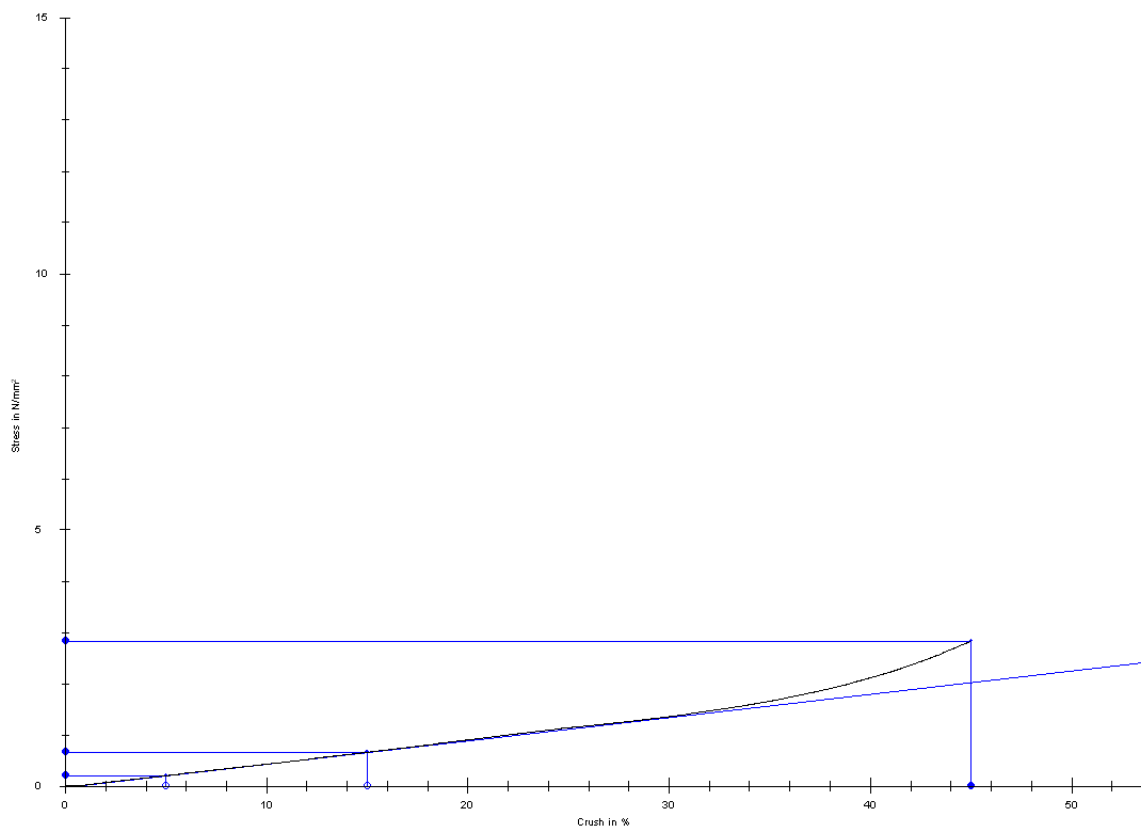
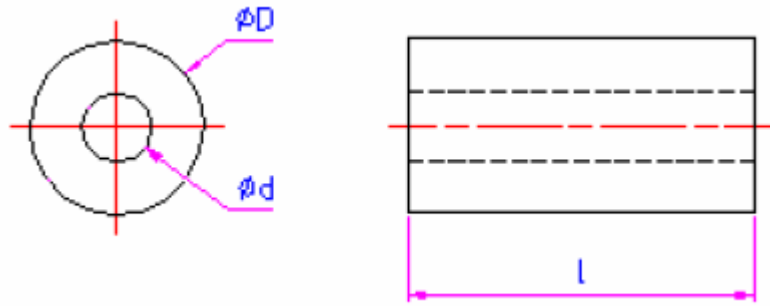
σ	F	ϵ	δ	E
MPa	N	%	mm	N/mm ²
4,26	6693,22	45	13,02	4,49

PŘÍLOHA P XLII: TLAKOVÁ ZKOUŠKA, NAMĚŘENÉ HODNOTY

Materiál: S 1234

Teplota: 20 °C

Těleso: $\phi D = 49\text{mm}$, $\phi d = 20\text{mm}$, $l = 30\text{mm}$



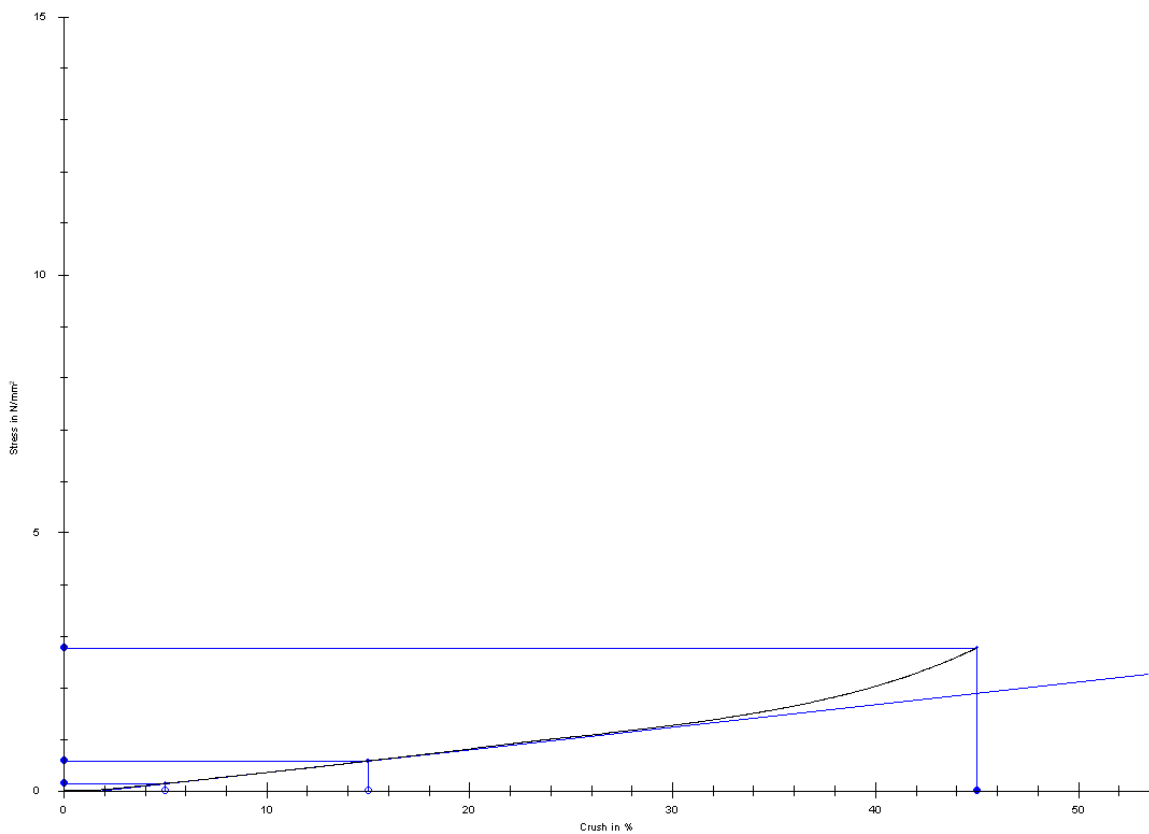
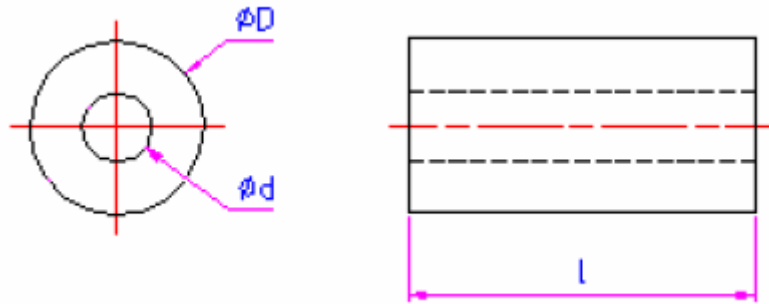
σ	F	ϵ	δ	E
MPa	N	%	mm	N/mm ²
2,81	4420,86	45	16,38	4,55

PŘÍLOHA P XLIII: TLAKOVÁ ZKOUŠKA, NAMĚŘENÉ HODNOTY

Materiál: S 1234

Teplota: 60 °C

Těleso: $\phi D = 49\text{mm}$, $\phi d = 20\text{mm}$, $l = 30\text{mm}$



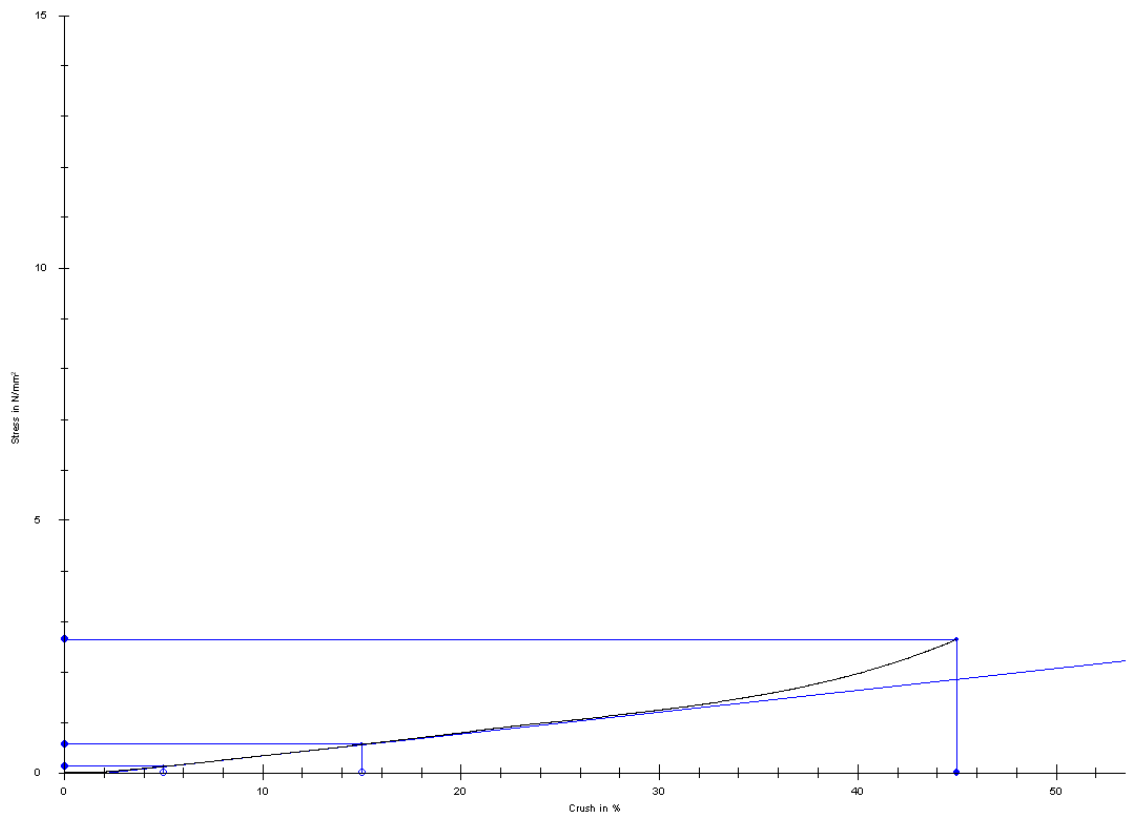
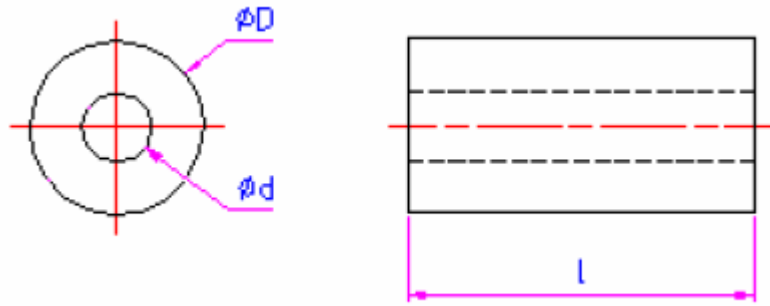
σ	F	ϵ	δ	E
MPa	N	%	mm	N/mm ²
2,75	4321,69	45	16,04	4,35

PŘÍLOHA P XLIV: TLAKOVÁ ZKOUŠKA, NAMĚŘENÉ HODNOTY

Materiál: S 1234

Teplota: 100 °C

Těleso: $\phi D = 49\text{mm}$, $\phi d = 20\text{mm}$, $l = 30\text{mm}$



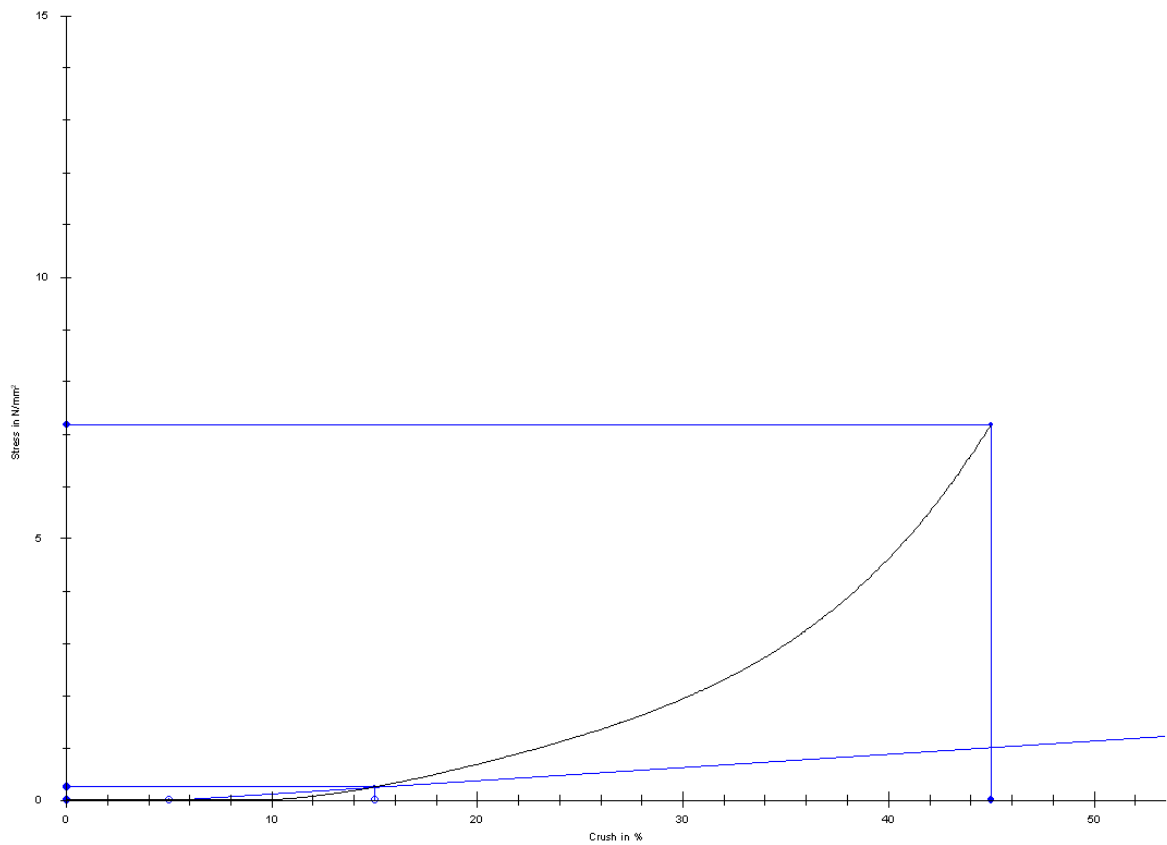
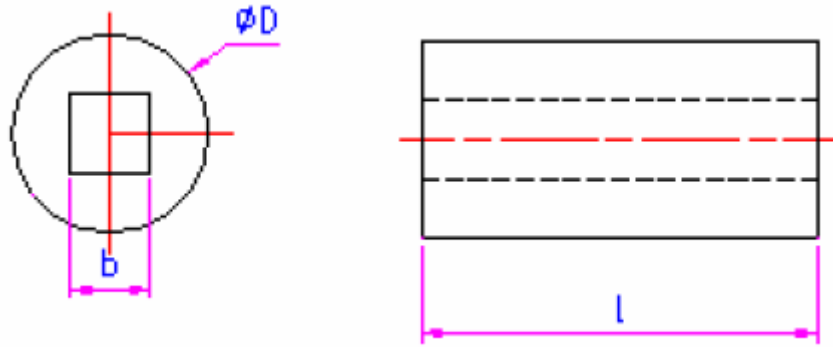
σ	F	ϵ	δ	E
MPa	N	%	mm	N/mm ²
2,62	4122,66	45	17,46	4,33

PŘÍLOHA P XLV: TLAKOVÁ ZKOUŠKA, NAMĚŘENÉ HODNOTY

Materiál: S 1234

Teplota: 20 °C

Těleso: $\phi D = 49\text{mm}$, $b = 20\text{mm}$, $l = 10\text{mm}$



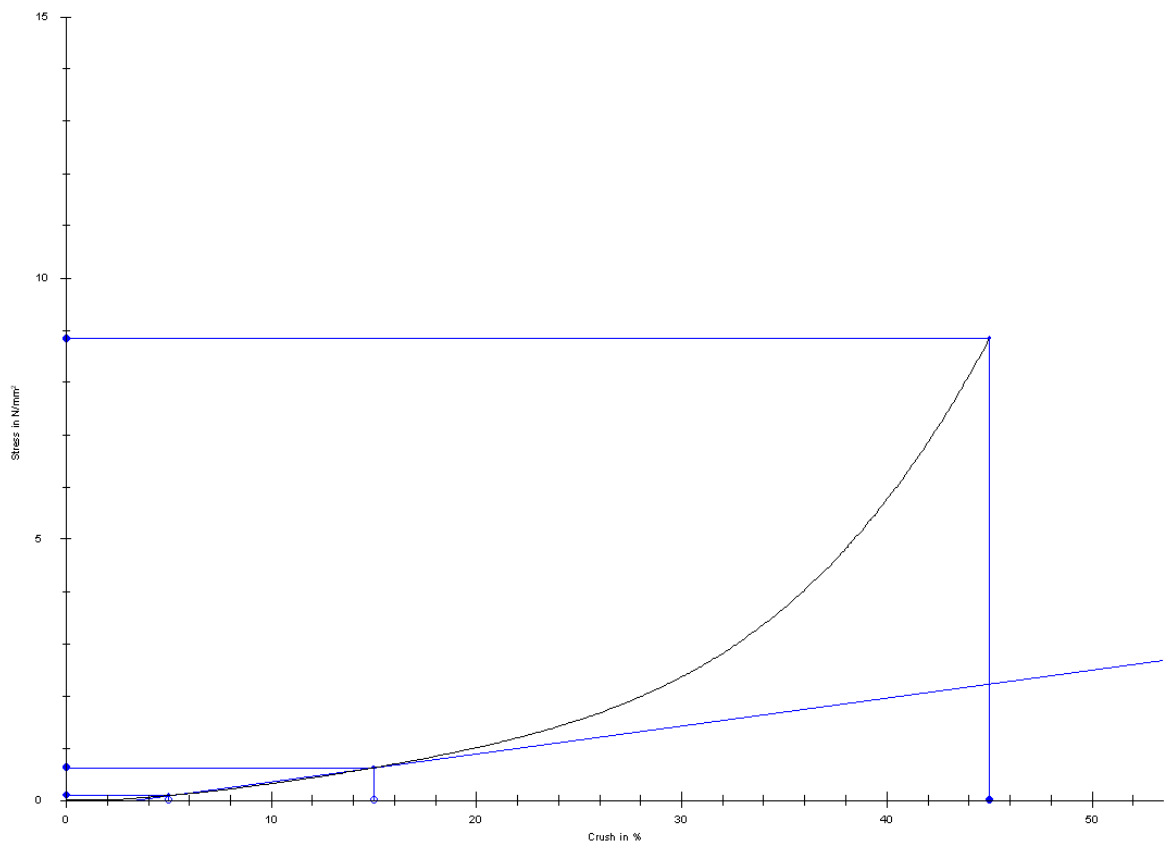
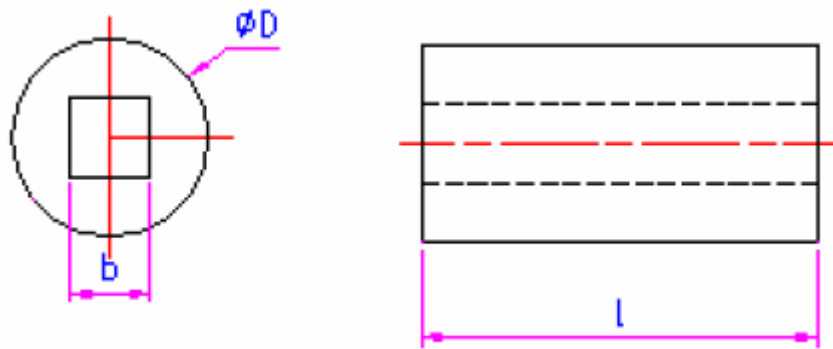
σ	F	ϵ	δ	E
MPa	N	%	mm	N/mm ²
7,12	10580,45	45	8,78	2,532

PŘÍLOHA P XLVI: TLAKOVÁ ZKOUŠKA, NAMĚŘENÉ HODNOTY

Materiál: S 1234

Teplota: 60 °C

Těleso: $\varnothing D = 49\text{mm}$, $b = 20\text{mm}$, $l = 10\text{mm}$



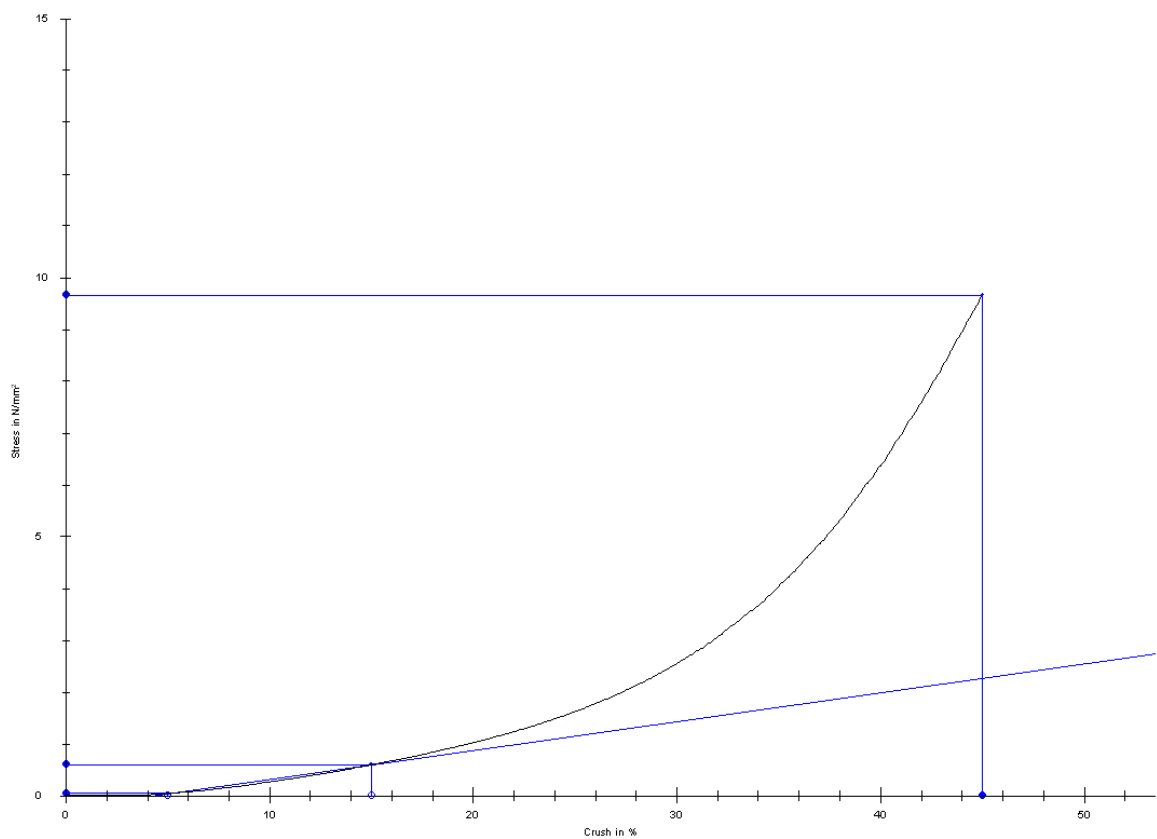
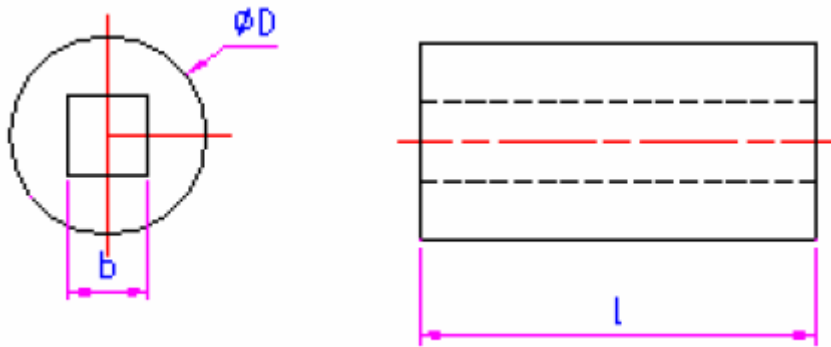
σ	F	ϵ	δ	E
MPa	N	%	mm	N/mm^2
8,77	13036,38	45	8,51	5,31

PŘÍLOHA P XLVII: TLAKOVÁ ZKOUŠKA, NAMĚŘENÉ HODNOTY

Materiál: S 1234

Teplota: 100 °C

Těleso: $\varnothing D = 49\text{mm}$, $b = 20\text{mm}$, $l = 10\text{mm}$



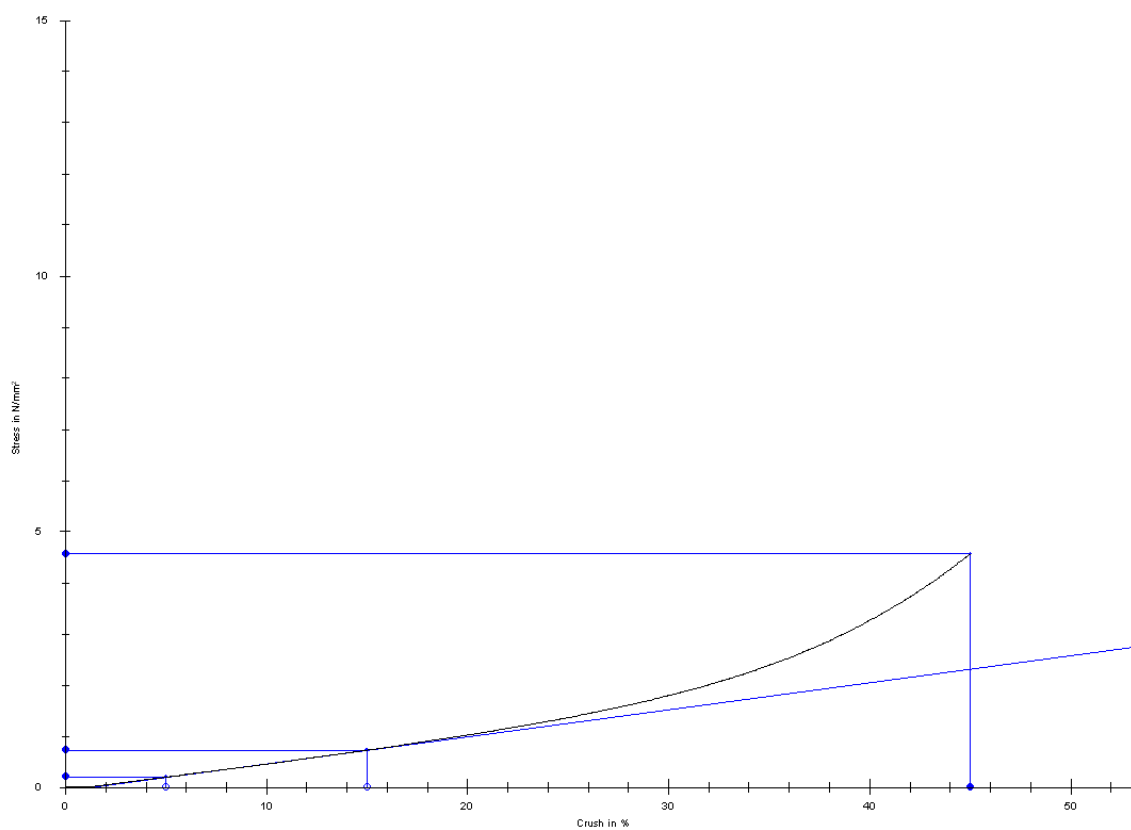
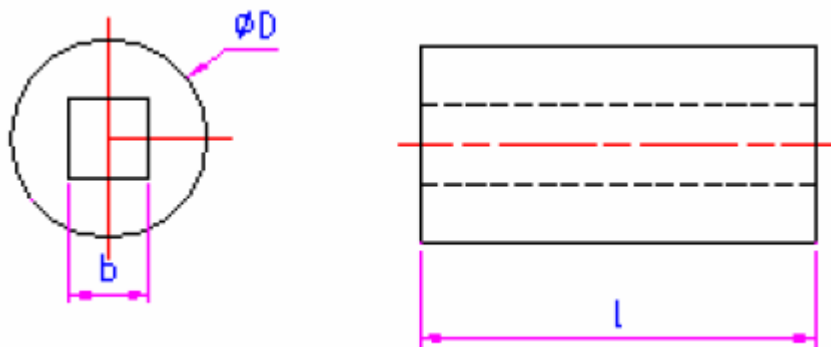
σ	F	ϵ	δ	E
MPa	N	%	mm	N/mm^2
9,59	14251,21	45	8,39	5,54

PŘÍLOHA P XLVIII: TLAKOVÁ ZKOUŠKA, NAMĚŘENÉ HODNOTY

Materiál: S 1234

Teplota: 20 °C

Těleso: $\varnothing D = 49\text{mm}$, $b = 20\text{mm}$, $l = 20\text{mm}$



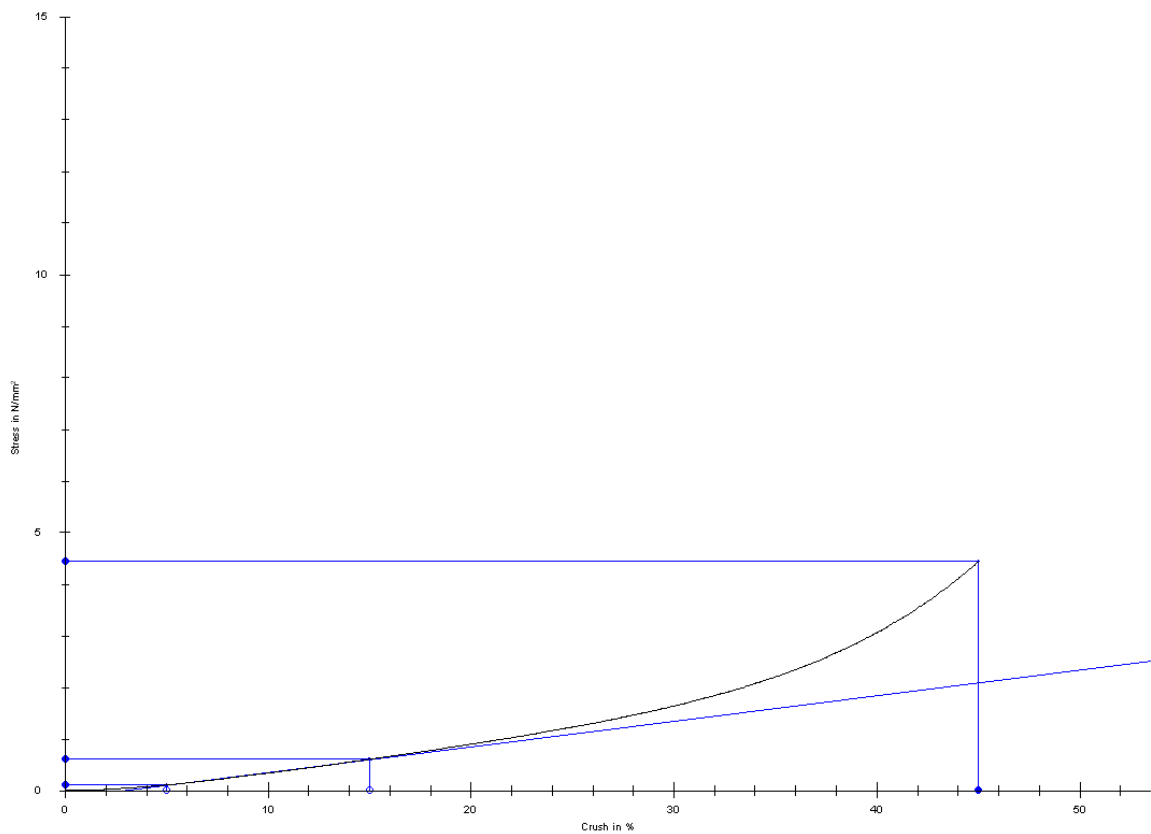
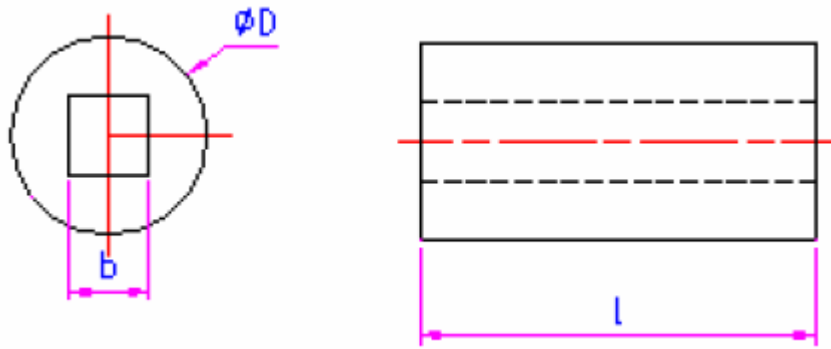
σ	F	ϵ	δ	E
MPa	N	%	mm	N/mm ²
4,53	6737,2	45	11,8	5,26

PŘÍLOHA P IL: TLAKOVÁ ZKOUŠKA, NAMĚŘENÉ HODNOTY

Materiál: S 1234

Teplota: 60 °C

Těleso: $\phi D = 49\text{mm}$, $b = 20\text{mm}$, $l = 20\text{mm}$



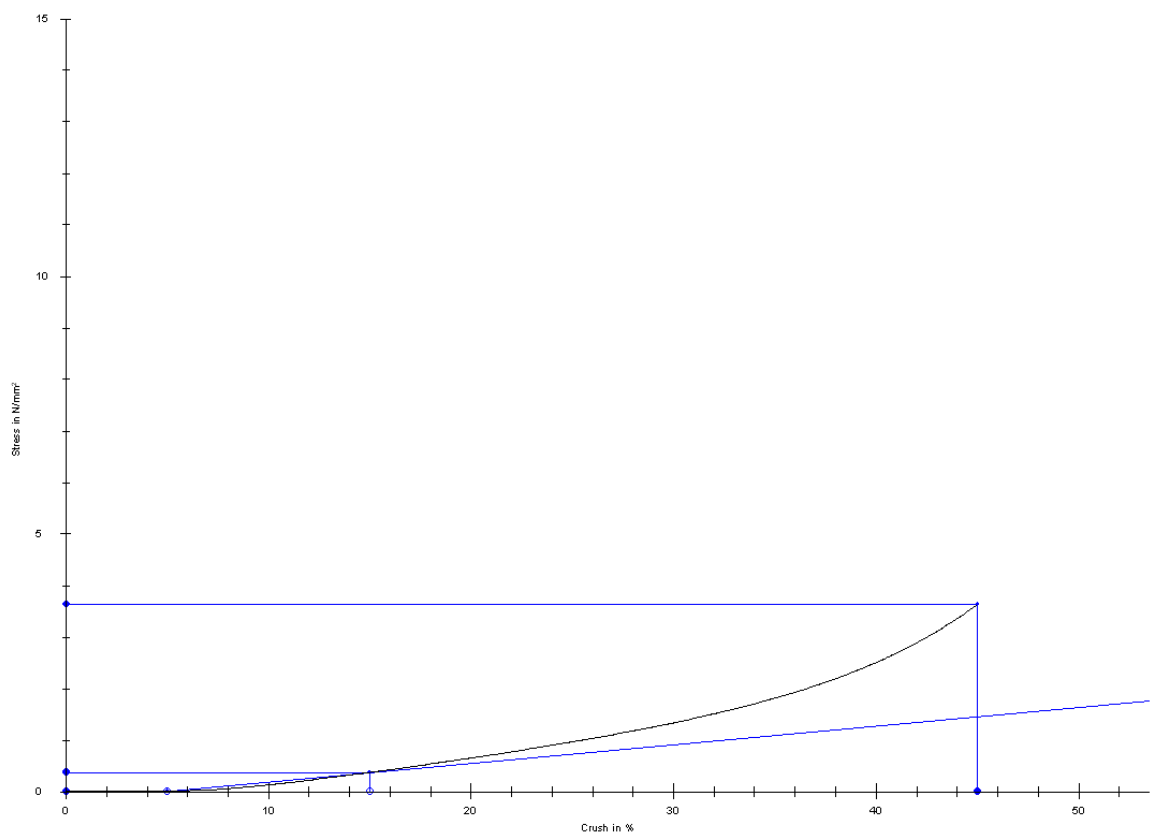
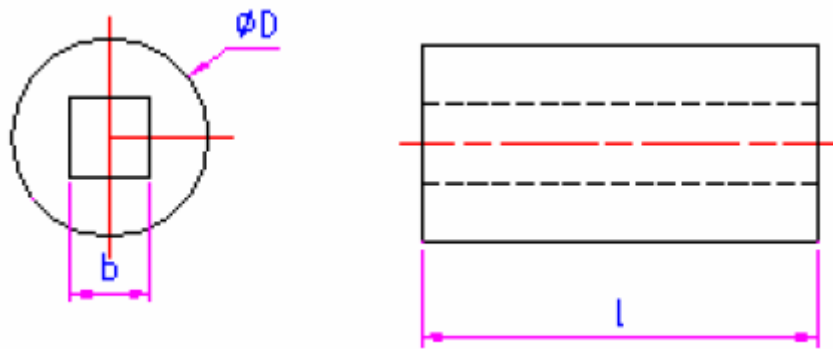
σ	F	ϵ	δ	E
MPa	N	%	mm	N/mm ²
4,41	6548,52	45	11,64	4,97

PŘÍLOHA P L: TLAKOVÁ ZKOUŠKA, NAMĚŘENÉ HODNOTY

Materiál: S 1234

Teplota: 100 °C

Těleso: $\phi D = 49\text{mm}$, $b = 20\text{mm}$, $l = 20\text{mm}$



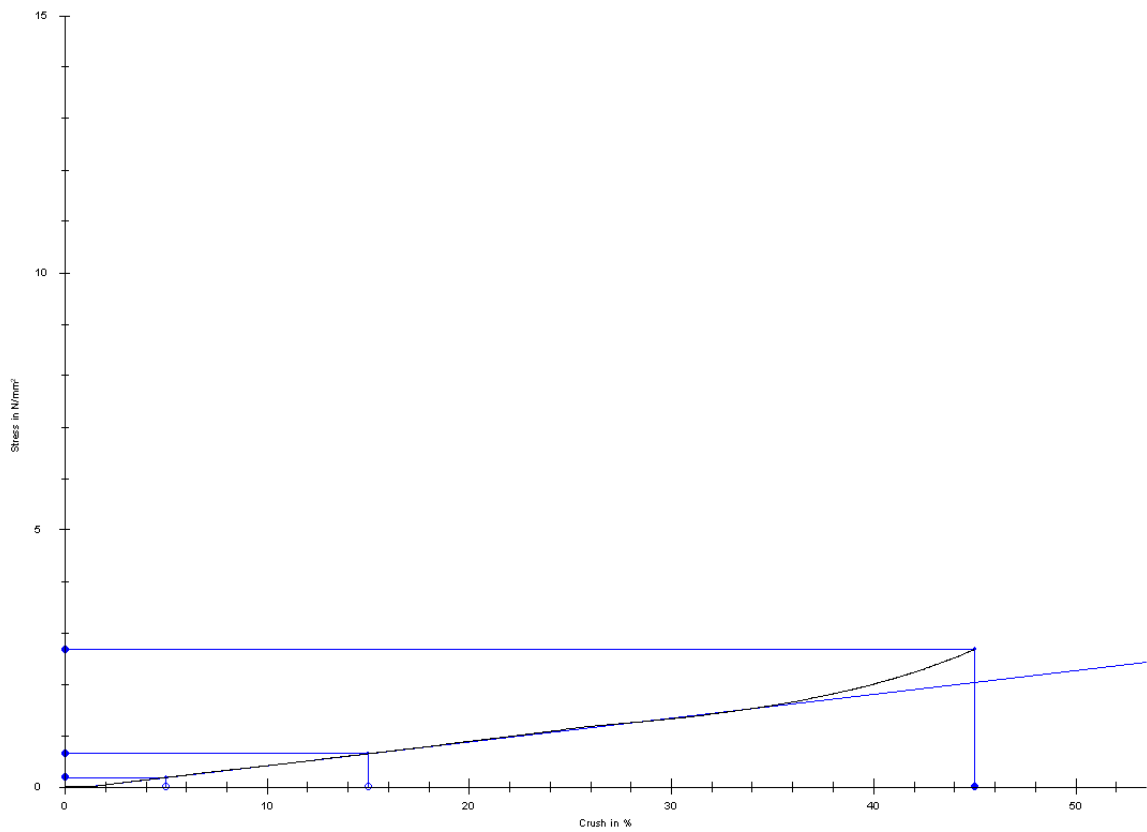
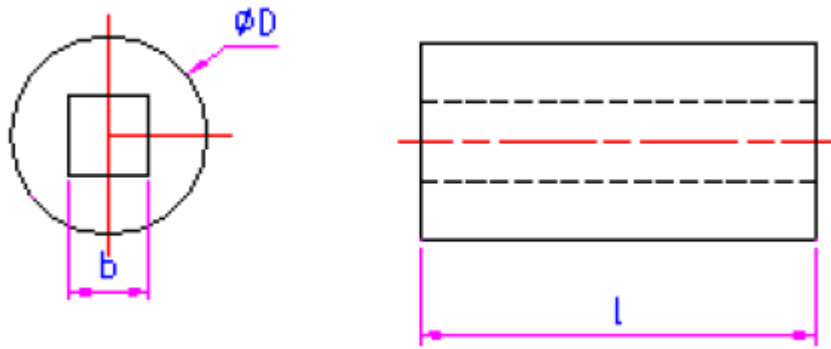
σ	F	ϵ	δ	E
MPa	N	%	mm	N/mm^2
3,61	5365,3	45	12,75	3,61

PŘÍLOHA P LI: TLAKOVÁ ZKOUŠKA, NAMĚŘENÉ HODNOTY

Materiál: S 1234

Teplota: 20 °C

Těleso: $\phi D = 49\text{mm}$, $b = 20\text{mm}$, $l = 30\text{mm}$



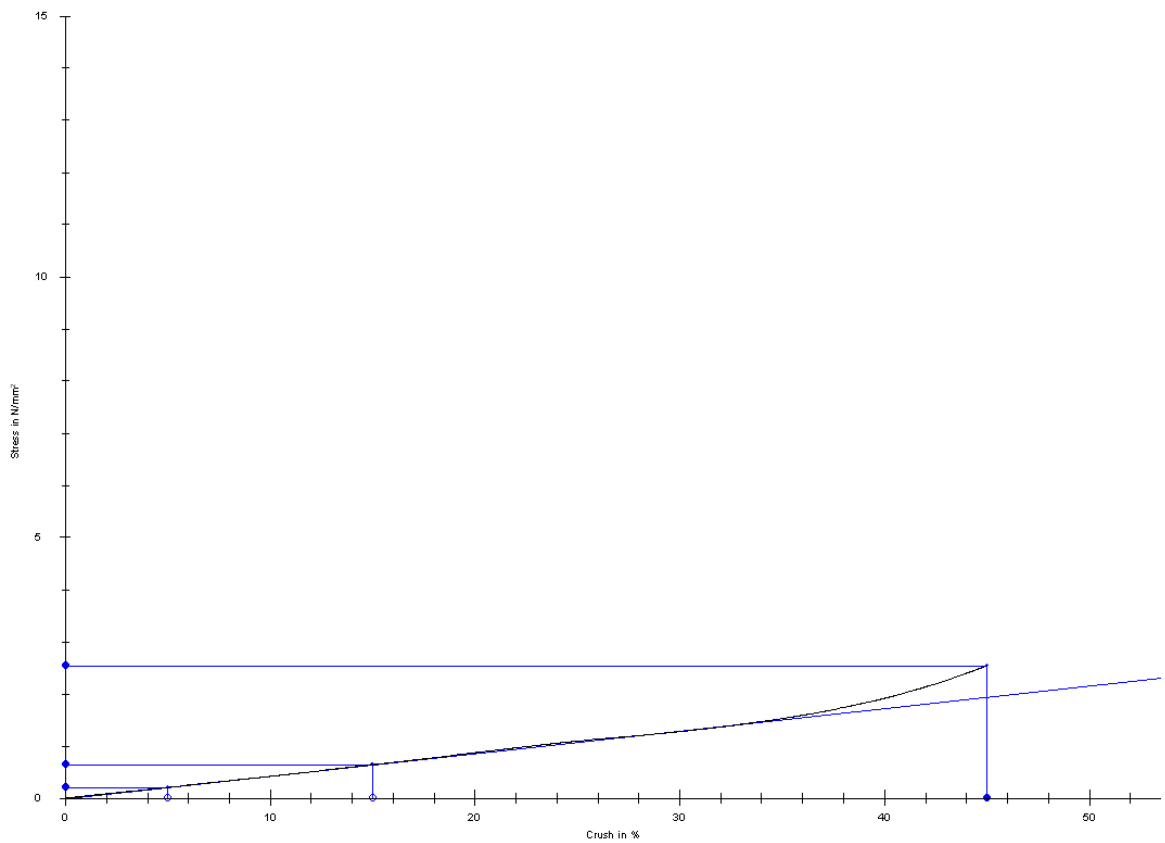
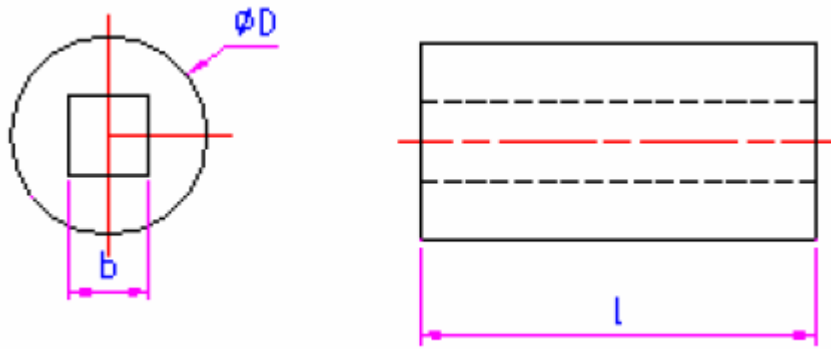
σ	F	ϵ	δ	E
MPa	N	%	mm	N/mm ²
2,66	3948,15	45	16,78	4,6

PŘÍLOHA P LII: TLAKOVÁ ZKOUŠKA, NAMĚŘENÉ HODNOTY

Materiál: S 1234

Teplota: 60 °C

Těleso: $\varnothing D = 49\text{mm}$, $b = 20\text{mm}$, $l = 30\text{mm}$



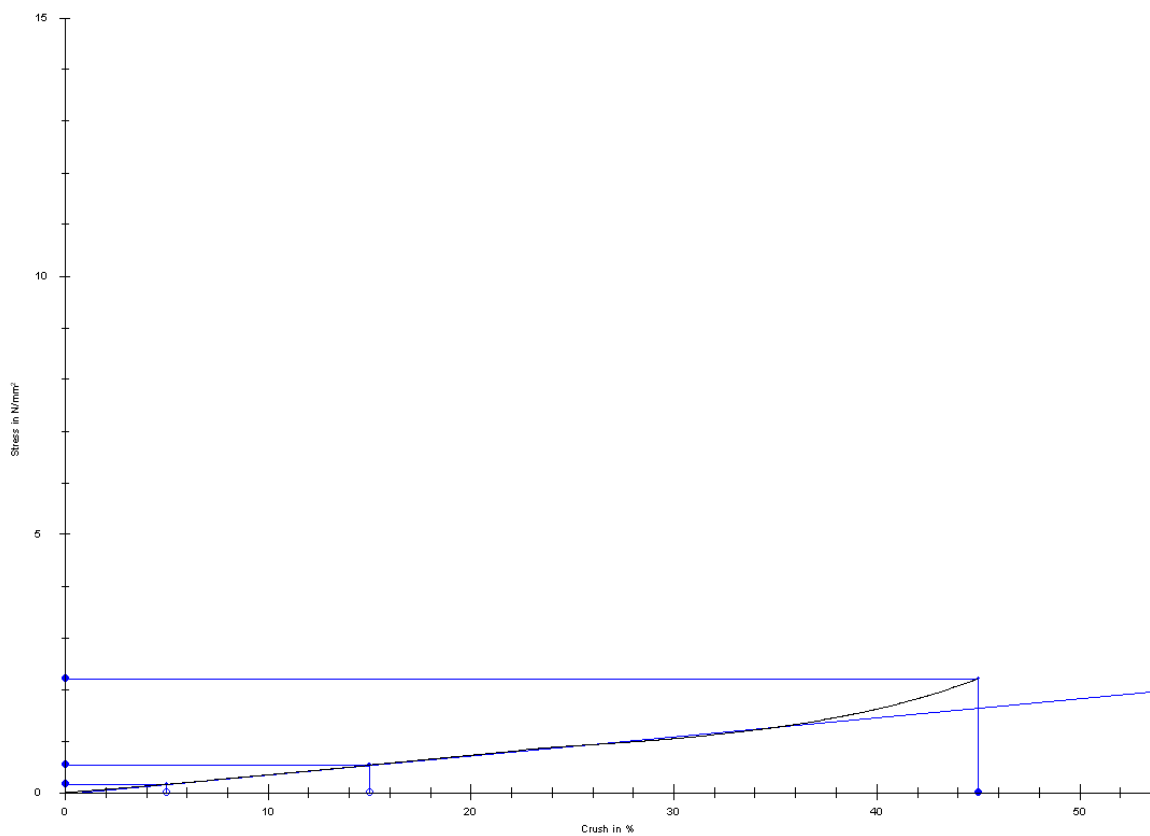
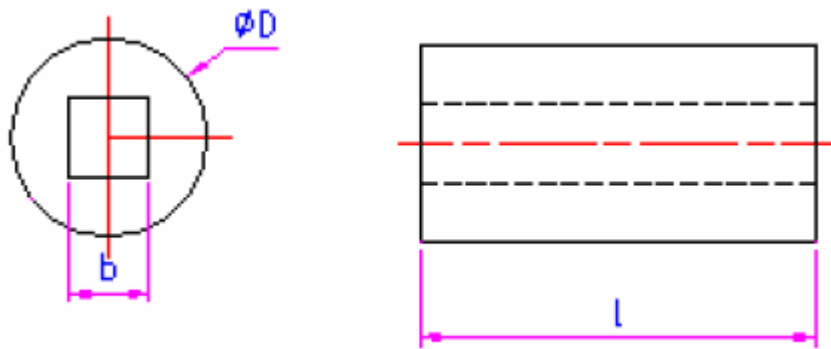
σ	F	ϵ	δ	E
MPa	N	%	mm	N/mm ²
2,53	3752,96	45	17	4,32

PŘÍLOHA P LIII: TLAKOVÁ ZKOUŠKA, NAMĚŘENÉ HODNOTY

Materiál: S 1234

Teplota: 100 °C

Těleso: $\phi D = 49\text{mm}$, $b = 20\text{mm}$, $l = 30\text{mm}$



σ	F	ϵ	δ	E
MPa	N	%	mm	N/mm ²
2,19	3259,61	45	17,04	3,69