

# Srovnání snímání deformace při zkoušce rovinného tahu elastomerů

Adam Máčala

---

Bakalářská práce  
2009

 Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta technologická

---

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

akademický rok: 2008/2009

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Adam MÁČALA**

Studijní program: **B 3909 Procesní inženýrství**

Studijní obor: **Technologická zařízení**

Téma práce: **Srovnání snímání deformace při zkoušce rovinného tahu elastomerů**

Zásady pro vypracování:

1. Literární rešerše
2. Návrh metodiky
3. Příprava vzorků
4. Experiment
5. Vyhodnocení výsledků

Rozsah práce:  
Rozsah příloh:  
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**  
Seznam odborné literatury:  
**-dle doporučení vedoucího práce**

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Jakub Javořík, Ph.D.**  
Ústav výrobního inženýrství  
Datum zadání bakalářské práce: **20. února 2009**  
Termín odevzdání bakalářské práce: **3. června 2009**

Ve Zlíně dne 12. února 2009



doc. Ing. Petr Hlaváček, CSc.  
*děkan*



doc. Ing. Miroslav Maňas, CSc.  
*vedoucí katedry*

## **ABSTRAKT**

Tato práce se zabývá určením průběhu závislosti napětí na poměrné deformaci při tahové zkoušce elastomerů. Dále pak porovnává různé typy snímání deformace testovaných vzorků. V teoretické části je pojednáno o elastomerních materiálech a jejich mechanickém chování. V praktické části se práce již věnuje zkoušení elastomerů a popisu zkoušky.

Klíčová slova: jednoosý tah, tahová zkouška, hyperelastická, poměrné prodloužení

## **ABSTRACT**

This work looks at dependence of tension and proportional deformation at the drawing trials of elastomers. Furthermore is comparing different type of deformation scanning of the tested models. The theoretical part shows of elastic materials and their mechanical behaviour. Practical part attends the testing of elastomers and its test description.

Keywords: uniaxial tension, tensile test, hyperelasticity, relative extension

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu své bakalářské práce, Ing. Jakubu Javoříkovi PhD., za ochotu, cenné rady a pomoc, kterou mi věnoval při řešení této práce.

# OBSAH

<b>ÚVOD</b> .....	<b>8</b>
<b>I TEORETICKÁ ČÁST</b> .....	<b>9</b>
<b>1 OBECNÝ POPIS ELASTOMERŮ</b> .....	<b>10</b>
1.1 ZÁKLADNÍ DĚLENÍ KAUČUKŮ .....	10
1.1.1 Přírodní kaučuk (PK) .....	10
1.1.1.1 Uzený kaučuk-smoked sheet (RSS) .....	11
1.1.1.2 Světlá krepa-pale latex crepe .....	12
1.1.2 Syntetický kaučuk .....	12
1.1.2.1 Butadienstyrenové kaučuky (SBR) .....	12
1.1.2.2 Chloroprenové kaučuky (CR) .....	13
1.1.2.3 Polyisoprenové kaučuky (IR) .....	13
1.1.2.4 Polybutadienové kaučuky (BR) .....	14
1.1.2.5 Silikonový kaučuk (Q) .....	14
1.2 GUMÁRENSKÉ SMĚSI .....	15
1.2.1 Vulkanizační činidla .....	15
1.2.2 Urychlovače .....	16
1.2.3 Aktivátory a retardéry .....	16
1.2.4 Změkčovadla .....	17
1.2.5 Antioxidanty .....	18
1.2.6 Plniva .....	20
1.2.7 Ostatní přísady a polotovary .....	20
1.3 MECHANICKÉ CHOVÁNÍ ELASTOMERŮ .....	25
1.3.1 Deformace .....	25
1.3.2 Elasticita .....	25
1.3.2.1 Ideální elasticita .....	26
1.3.2.2 Kaučuková elasticita .....	27
1.3.3 Tahové vlastnosti pryže .....	32
1.3.3.1 Pevnost v tahu .....	32
1.3.3.2 Tažnost .....	35
1.4 HYPERELASTICITA .....	36
1.4.1 Obecný vztah mezi napětím a deformací .....	36
1.4.2 Jednoosý tah .....	36
1.4.3 Dvouosý tah .....	37
1.4.4 Čistý smyk .....	38
1.5 HYPERELASTICKÉ MODELY .....	39
<b>II PRAKTICKÁ ČÁST</b> .....	<b>52</b>
<b>2 PRAKTICKÁ ČÁST</b> .....	<b>53</b>
2.1 CÍL PRÁCE .....	53
2.2 METODIKA PRÁCE .....	53
2.2.1 Zkušební vzorky .....	53
2.2.2 Zkušební zařízení .....	53

2.2.3	Průběh zkoušky.....	54
2.2.4	Zpracování naměřených dat.....	56
<b>3</b>	<b>VÝSLEDKY A DISKUZE .....</b>	<b>57</b>
	<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>61</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....</b>	<b>62</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....</b>	<b>64</b>
	<b>SEZNAM OBRÁZKŮ.....</b>	<b>66</b>
	<b>SEZNAM TABULEK .....</b>	<b>67</b>
	<b>SEZNAM PŘÍLOH .....</b>	<b>68</b>

## ÚVOD

Elastomery v dnešní době stále více pronikají a nachází uplatnění v nejrůznějších odvětvích lidské činnosti. Jsou využívány jako nárazové a dopadové absorbéry energie, tlumiče vibrací, izolátory a v neposlední řadě dominantní odvětví oblasti pryže a to výroba pneumatik automobilů.

Hyperelastické materiály, označované jako elastomery, patří do speciální třídy polymerů, která zahrnuje přírodní a syntetické pryže. Slovo pryž původně znamenalo materiál získaný ve formě latexu ze stromů *Hevea brasiliensis*. Dnes se tento termín používá pro všechny materiály mající stejné mechanické vlastnosti jako přírodní pryž.

Elastomerní materiály mají výrazně odlišné vlastnosti než kovy a nelze u nich užít Hookův zákon z důvodu jejich vysoké nelinearity při namáhání.

Aby bylo možné aproximovat chování těchto materiálů pod působením určitého napětí a při určitých deformacích, byla vytvořena řada materiálových modelů založených na potenciálu deformační energie, které jsou pro vyhodnocení vlastností elastomerů nutné.



## **I. TEORETICKÁ ČÁST**

## 1 OBECNÝ POPIS ELASTOMERŮ

Kaučuk je pružná, tažná a ohebná hmota. Kaučuk je elastomer, který má schopnost být vulkanizací převeden na pryž. Tyto vlastnosti jsou charakteristické pro tzv. kaučukovitý stav. Kaučukovité hmoty se mohou značně deformovat i malou silou, přičemž se po uvolnění vnější síly poměrně rychle vrátí do rozměrů blízkých původním.

Kaučuk obsahuje velké množství dlouhých řetězovitých molekul. Vzájemné působení makromolekul má vliv na jejich vzájemné uspořádání ve hmotě, způsob tvarování a konečné vlastnosti hmoty.

Mezi nejdůležitější vlastnosti kaučuku patří:

- *Teplota skelného přechodu*  $T_g$ -teplota přechodu ze stavu kaučukovitého do stavu sklovitého.
- *Viskozita (plasticita)*-charakterizuje zpracovatelnost kaučuku, tj. schopnost být hněten a dále zpracováván. Je závislá na molekulové hmotnosti a její distribuci; je závislá na teplotě-s jejím růstem klesá.

Elastomery jsou hmoty, které mají kaučukovité vlastnosti při normální teplotě.

### 1.1 Základní dělení kaučuků

#### 1.1.1 Přírodní kaučuk (PK)

Základní surovinou pro výrobu přírodního kaučuku je latex, jenž se získává čepováním ze stromu *Hevea brasiliensis*. Aby se mohl latex po načepování v tekutém stavu delší dobu uchovávat, koncentrovat, dopravovat a dále zpracovávat, musí se stabilizovat, k čemuž nejčastěji slouží přídavek amoniaku. Amoniak se přidává 0,3 až 0,7% z hmotnosti latexu, buď v roztoku nebo plynném stavu. Jelikož načepovaný latex má vysoký obsah vody, což by vedlo k jeho dražšímu zpracování a dopravě, koncentruje(zahušťuje) se odstředováním, rozvrstvováním, odpařováním nebo elektrodekantací [12].

Přírodní kaučuk se zpracovává především na pneumatiky, kde se plně uplatňuje vysoká

elasticita, dobré dynamické vlastnosti a snadnost zpracování při hromadné výrobě složitějších výrobků. Přírodní kaučuk má molekuly tvořeny z uhlíkového řetězce, kterému dvojná vazba

způsobují velmi nepravidelný tvar řetězce s vyčnívajícími metylovými skupinami. Nepravidelný tvar řetězce brání molekulám v jejich semknutí, zvyšuje tedy jejich pohyblivost a vyčnívající skupina přispívá k větší soudržnosti molekul v oblastech center tím,

že znemožňuje jejich vzájemný posun. I přesto však u surového kaučuku při velkých či opakovaných deformacích nastává v centrech molekul vzájemné přemísťování a tím i zeslabování reakčních sil, což se navenek projevuje tím, že proužek kaučuku zůstane po natažení a opětovném uvolnění trochu delší. Tomuto posunu a přemísťování molekul

zabraňuje vulkanizace. Pak se již nespolehneme na centra závislá na mezimolekulární přitažlivosti, ale přímo chemickými vazbami propojíme vzájemně molekuly kaučuku tak, že na každých přibližně 100 až 200 základních chemických jednotek řetězce připadne jedna příčná chemická vazba, podle způsobu a typu vulkanizace.

Při výběru druhu přírodního kaučuku se hodnotí především čistota, stejnoměrnost a cena.

### ***1.1.1.1 Uzený kaučuk-smoked sheet (RSS)***

Nejběžnější druh kaučuku pro nejkvalitnější výrobky. Udí se 4 až 6 dní při teplotě 40 až 50 °C kouřem získaným spalováním dřeva džunglových stromů, kokosových skořápek apod. Kouř rozvěšené listy suší a zároveň konzervuje, takže kaučuk nepodléhá plísni.

Dodává se v několika jakostech, které se podstatně neliší kvalitou kaučukového uhlíku, ale čistotou a barvou. Uzený kaučuk je možno použít vždy, kdy se volí přírodní kaučuk, kromě použití pro bílé či světlé pryže, které vždy slabě zabarvuje do žluta až do hněda.

Uzeného kaučuku se využívá k výrobě pláštěv pneumatik, duší, nití, protiplynových masek, obuvi, tenkostěnné a chirurgické pryže, potravinářské pryže apod.

### **1.1.1.2 Světlá krepa-pale latex crepe**

Je dražší než uzený kaučuk a volí se pro pryže bílé, světlé, transparentní a některé výrobky, u kterých je požadována značná čistota kaučuku. Světlé krepě se dává přednost také při

přípravě nevulkanizujících neplněných lepidel, protože je tvrdší a rychle se rozpouští.

### **1.1.2 Syntetický kaučuk**

Syntetické kaučuky již dlouho nejsou pouze náhradou přírodního kaučuku, ale svými technickými parametry zajišťují požadavky, které klade na gumárenský průmysl nynější rozvoj techniky. Také z ekonomického hlediska mají syntetické kaučuky lepší předpoklady. Nelze však předpokládat, že by přírodní kaučuk zcela ztratil své dosavadní postavení a byl v dohledné době plně nahrazen kaučuky syntetickými. Některých vlastností přírodního kaučuku, např. dobré odolnosti proti dynamickému namáhání a konfekční lepivosti, nebylo dosud u syntetických kaučuků dosaženo [10].

#### **1.1.2.1 Butadienstyrenové kaučuky (SBR)**

Vznikají kopolymerací butadienu a styrenu (v nejběžnějším poměru 70:30) a jsou nejrozšířenějším druhem kaučuku vůbec. SBR je nejpoužívanějším kaučukem pro výrobu pneumatik. Dále je vhodný pro výrobu podrážek, podpatků, hadic, dopravních pásů, kabelů, většiny vytlačované a lisované pryže, natíraných textilií apod. Se stoupajícím rozměrem pláště pneumatik se zvětšuje význam dynamických vlastností běhounu, a proto pro vysoce namáhané běhouny pláště pro nákladní automobily je třeba

používat kaučuku přírodního, popř. směsi butadienstyrenového kaučuku s přírodním kaučukem. Hodnota pevnosti v tahu je u čisté pryže přibližně 30-43 kPa a tažnost je přibližně 400-600%.

### ***1.1.2.2 Chloroprenové kaučuky (CR)***

Hlavní výhodou chloroprenového kaučuku je jeho velmi malá hořlavost a odolnost proti povětrnostním vlivům při poměrně dobrých fyzikálních vlastnostech. Přípravuje se převážně emulzní polymerací. Chloroprenový kaučuk při protažení silně krystalizuje a dosahuje proto i bez plnění velké pevnosti (pevnost v tahu je u čisté pryže přibližně 430-580 kPa a tažnost je přibližně 800-900%).

Jeho hlavní použití je při výrobě technické pryže, zejména na různé hřídelové těsnění, k pogumování technických tkanin; vzhledem k nehořlavosti se zpracovává při výrobě dopravních pásů používaných při práci za ztížených podmínek, jako v dolech a v prostředí s nebezpečím požáru, dále k výrobě průmyslové obuvi, a pak hlavně na lepidla.

### ***1.1.2.3 Polyisoprenové kaučuky (IR)***

Ze všech průmyslově vyráběných kaučuků se nejvíce blíží přírodnímu kaučuku, pokud jde o lepivost směsí, velkou pevnost neplněné pryže (hodnota pevnosti v tahu u čisté pryže je přibližně 360-500 kPa), velkou odrazovou pružnost a malou hysterezi a dobrou strukturní pevnost za tepla. Průmyslově vyráběné polyisopreny nejsou zcela identické s přírodním kaučukem, úpravami receptury a zpracování lze však dosáhnout toho, že isoprenový kaučuk je schopen nahradit přírodní kaučuk i ve směsích pro nákladní pneumatiky.

Největší část polyisoprenových kaučuků se používá (v kombinaci s BR,NR) v běhounových

a kostrových směsích pro výrobu pneumatik nákladních automobilů, letadel a traktorů, kde se

využívá dobrých hysterezích vlastností IR. Další aplikace jsou: technická pryž, obuv, výrobky používané v lékařství a ve styku s potravou.

Polyisoprenové kaučuky se nepoužívají do běhounů pneumatik pro osobní automobily, neboť jsou méně odolné vůči opotřebení než SBR, který je navíc levnější. Polyisopreny se přidávají do jiných kaučuků ke zlepšení zpracovatelnosti. Přídavek IR do SBR nebo BR zlepšuje jejich pevnost v tahu a strukturní pevnost.

#### ***1.1.2.4 Polybutadienové kaučuky (BR)***

Vznikají řízenou polymerací butadienu, jsou to tedy kaučuky stereoregulované (s pravidelně prostorově uspořádanou strukturou molekul). Polybutadien má lepší odrazovou pružnost než přírodní kaučuk a výbornou odolnost proti oděru a pryže z něj vyrobené mohou být využívány v širokém rozmezí teplot.

Jeho strukturní pevnost je však horší a také má vyšší dynamický modul než přírodní kaučuk.

Jeho hlavní použití je v běhounech pláštů pneumatik a spodkovém obuvnickém materiálu.

Hodnota pevnosti v tahu je přibližně 360 kPa a tažnost je přibližně 500%.

#### ***1.1.2.5 Silikonový kaučuk (Q)***

Silikonový kaučuk je nejmladší z hlavních výrobků organokřemičité chemie.

Vlivem malých mezimolekulových sil dosahují mechanické vlastnosti silikonových kaučuků

nízkých hodnot. Hodnoty pevnosti v tahu u silikonové pryže činí asi čtvrtinu až třetinu hodnot běžných organických elastomerů. Hodnoty tažnosti byly značně zlepšeny a silikonová pryž tak byla postavena na úroveň ostatních elastomerů. Tažnost směsí pro všeobecné použití je 250-350%, tvrdších směsí 150-250% a vysoce pevné nebo mrazuvzdorné směsi mají tažnost 500-800%.

Tepelně izolační vlastnosti silikonové pryže jsou vyšší než u ostatních materiálů a projevují

se i v odolnosti proti hoření a v samozhášivosti. Silikonový kaučuk je též velmi šetrný vůči lidskému organismu.

Použití silikonové pryže: ve stavebnictví, u profilového těsnění oken, izolace elektrických vodičů, v lékařství, farmaceutickém a potravinářském průmyslu.

## 1.2 Gumárenské směsi

Základní proces, kterým z kaučuku vzniká pryž, je zesíťování. Zesíťování se dosahuje různými činidly a nazývá se také vulkanizace. Podstatou vulkanizace je vytváření chemických vazeb mezi molekulami kaučuku. Původně se pod pojmem vulkanizace rozumělo jen použití síry jako vulkanizačního činidla, ale dnes se hovoří např. o vulkanizaci butylkaučuku i tehdy, použije-li se jako síťovacího činidla pryskyřice. Mezi kaučukem a pryží neexistuje ostrý přechod. Síťové vazby můžeme zavádět postupně; získá se tak řada přechodných produktů mezi kaučukem a pryží. Mluvíme-li však obecně o pryži, myslíme tím obvykle vysoce elastický materiál, pokud výslovně nevedeme, že jde o tvrdou pryž.

Z hlediska vlastností pryže je rozhodující struktura a vlastnosti prostorové sítě. Pro výrobní technologii jsou ovšem významné i podmínky, za kterých prostorová síť vzniká, protože podstatně ovlivňují produktivitu práce a celkovou ekonomii výroby [2].

### 1.2.1 Vulkanizační činidla

Nejpoužívanějším vulkanizačním činidlem pro přírodní i syntetické kaučuky je síra.

Je to žlutý prášek tající při 115 °C. Chemicky lze čistou síru získávat odsířováním zemního plynu a ropných produktů nebo spalováním sirovodíku horkým vzduchem v tzv. Clausových pecích. Síra se rozemílá na potřebnou jemnost buď za mokra, nebo v atmosféře inertního plynu. Dopravuje a skladuje se v papírových pytlích nebo v dřevěných sudech. Protože je hořlavá, musí se skladovat odděleně od ostatních přísad. Při jejím prosévání a při manipulaci s ní vzniká statická elektřina, která může způsobit požár.

Jako vulkanizačních činidel lze použít také selenu, telluru, nitrosloučenin, diazosloučenin, organických sloučenin kovů, organických peroxidů apod. Z těchto skupin mají větší význam jen organické peroxidy, kterých se používá pro vulkanizaci silikonových a polyuretanových kaučuků.

### 1.2.2 Urychlovače

Kaučuková směs, která by se skládala pouze z elastomeru a síry, by se musela zahřívát dlouhodobě, aby se získal elastický materiál-vulkanizovaná pryž. Pro zkrácení procesu se do směsi přidávají látky, které se nazývají urychlovače. Urychlovače zkracují vulkanizační dobu, ale nesmějí způsobit navulkanizování směsi v průběhu zpracovatelských operací; mají zlepšovat mechanické vlastnosti pryže, být nejedovaté a cenově přístupné.

V dnešní praxi se používá výhradně urychlovačů organického původu. Dělí se obvykle podle toho jak rychle ovlivní potřebnou dobu vulkanizace. Z tohoto hlediska lze urychlovače třídit do těchto skupin: *pomalou působící, se zpožděným účinkem, středně rychlé, rychle působící, ultraurychlovače.*

Urychlovačů je více než 100 druhů, při čemž i stejné chemikálie jsou dodávány pod různými obchodními názvy.

### 1.2.3 Aktivátory a retardéry

Je to skupina látek anorganického nebo organického původu, které ve směsi aktivují nebo přechodně potlačují účinek vulkanizačního činidla. Bez aktivátorů neprojevují urychlovače plně svou účinnost, a to ani v průběhu vulkanizace, ani v přímém vlivu na fyzikální vlastnosti.



Nejběžnějším aktivátorem je kysličník zinečnatý (zinková běloba), který se přidává prakticky do všech kaučukových směsí na měkkou pryž. Dalšími aktivátory jsou oxid vápenatý, oxid hořečnatý, stearan zinečnatý, oxid olovnatý, triethanolamin apod.

Retardéry jsou přísady, které nemají mít vliv na konečný stav vulkanizace, ale ovlivňují její průběh takovým způsobem, aby byla zajištěna bezpečnost zpracování při přípravných operacích, popř. aby k zahájení vulkanizace došlo u některých částí komplikovanějších výrobků později. Nejznámější retardéry jsou kyseliny salicylová, ftalová a benzoová, dále ftalanhydrid a nitrosodifenylamin.

#### 1.2.4 Změkčovadla

Změkčovadla jsou přísady, které zmenšují tuhost kaučukové směsi a usnadňují její míchání, válcování, vytlačování dále poskytují polymerům ohebnost, tvárnost, vláčnost (odtud též někdy používaný termín zvláčňovadla) a snižují jejich teplotu zesklnění a viskozitu jejich taveniny. Principem působení změkčovadel na polymery je zvyšování tzv. vnitřní pohyblivosti jejich makromolekulárních řetězců, která určuje tuhost a teplotu zesklnění polymerů a která je dána jednak ohebností makromolekul, jednak jejich vzájemnou přitažlivostí, tj. velikostí mezimolekulárních sil, která zase závisí na vzdálenosti makromolekul mezi sebou. Velikost mezimolekulárních sil se zmenšuje přímo úměrně druhé mocnině střední mezimolekulární vzdálenosti (podle stejného pravidla jako u nízkomolekulárních látek). Aby tedy přísada do polymeru fungovala jako změkčovadlo, musí mít schopnost pronikat mezi makromolekulární řetězce a oddělovat je od sebe, tj. musí být pro daný polymer rozpouštědlem. Jelikož rozpustnost zase přímo souvisí s podobnou polaritou látek, lze zjednodušeně konstatovat, že polární látky mohou být změkčovadly polárních polymerů a nepolární látky změkčovadly polymerů nepolárních.

Změkčovadla jsou zvláště důležitá pro směsi s velkým obsahem syntetických kaučuků a pro směsi vysoce plněné. Některá změkčovadla též zvyšují lepivost kaučukových směsí, zlepšují dispergaci práškových přísad, snižují potřebnou teplotu míchání směsí a zlepšují některé vlastnosti vulkanizátu (odolnost proti stárnutí, proti slunečnímu záření, proti prostupu plynů aj.).

Jindy mohou zlepšovat některé speciální vlastnosti pryže, jako je např. přilnavost běhounu pneumatiky k vozovce, důležitá zejména při jízdě v dešti.

Nejpřirozenější je-pro jejich širokou paletu-klasifikace změkčovadel podle původu:

- *produkty ropného původu*- parafin, vazelína, ropné minerální oleje,
- *produkty zpracování uhlí a uhelných dehtů*- kumaronová pryskyřice, anthracenový olej
- *produkty zpracování dřeva*- kalafuna, smrkový dehet,
- *syntetická změkčovadla*- dybutylftalát, dioktylftalát, dioktylsebakát,
- *přírodní tuky a oleje*- stearin (zvaný též Acidax, směs kyseliny stearové a kyseliny palmitové).

### 1.2.5 Antioxidanty

Antioxidanty, prostředky proti stárnutí, jsou přísady, které chrání pryž před přirozeným stárnutím, jež způsobuje kyslík, ozón a další vnější vlivy. Za běžné teploty se toto tzv. *oxidační stárnutí* projeví až po velmi dlouhé době, např. po deseti a více letech. Za zvýšené teploty se však významně urychluje a mluvíme o tzv. *tepelně oxidačním stárnutí*. Podléhají mu nejvíce nenasycené polymery, v jejichž makromolekulárních řetězcích vznikají reakcí s kyslíkem na atomech uhlíku sousedících s uhlíkovými atomy, z nichž vychází dvojná vazba, hydroperoxidové skupiny –O-O-H. Ty se pak snadno stěpí na radikály, které zahajují řetězovou oxidační reakci vedoucí k degradaci polymeru.

Ochrana polymerů spočívá hlavně v zabránění řetězovému průběhu oxidace, která má v nechráněném polymeru autokatalytický průběh (je katalyzována vlastními reakčními produkty). Jak velký je její vliv na vlastnosti polymerů lze názorně ukázat na příkladu pryže z přírodního kaučuku. Naváže-li se na ni pouhé 1% kyslíku, klesne její pevnost v tahu přibližně na polovinu původní hodnoty.

Proto látky, které zpomalují tepelně-oxidační stárnutí polymerů, právem nazýváme *antioxidanty*. Pouze v případech, kdy se, většinou v koncentraci desetin dsp nebo dsk, používají k ochraně polymerů v závěrečných fázích jejich výroby (např. při sušení) a během skladování, a kdy je do polymeru přidává jeho výrobce a nikoli zpracovatel, jsou označovány pojmem *stabilizátory*.

Podle jejich chemického účinku můžeme antioxidanty rozdělit do dvou skupin na:

- *látky, které přerušují řetězovou autooxidační reakci* tím, že ukončují (inhibují) buď radikály vzniklé rozpadem hydroperoxidu nebo radikály vzniklé reakcí primárně vytvořených radikálů s makromolekulami polymeru. Jejich představiteli jsou např. derivátyaminů a fenolů.
- *látky, které zabraňují vzniku (iniciaci) řetězové reakce* tím, že rozkládají (desaktivují) hydroperoxydy. Proto bývají někdy nazývány *desaktivátory hydroperoxidů* nebo *preventivními antioxidanty*. Patří k nim např. estery kyseliny fosforité a některé organické sloučeniny obsahující síru, zejména trioly a sulfidy.

Antioxidanty se při svém ochranném působení mění na produkty, které jsou buď bezbarvé nebo různě, většinou tmavě zbarvené. Podle kohopak rozeznáváme antioxidanty:

- *nebarvící*, jejichž rozkladné produkty jsou bezbarvé,
- *barvící*, jejichž barevné produkty zbarvují polymer, ale toto zbarvení nepřechází na jiné předměty, s nimiž je polymerní výrobek v přímém styku a
- *-zbarvující*, jejichž barevné produkty zbarvují nejen chráněný výrobek, ale i jiné předměty, zejména z polymerů, které se s nimi dostanou do bezprostředního kontaktu. Známé jsou např. tmavé stopy na světlých podlahových krytinách z polvinylchloridu po pryžových chráničích kovových noh nábytku.

### 1.2.6 Plniva

Jako ztužovala označujeme přísady, které zvyšují houževnatost a odolnost směsi proti opotřebení, její pevnost a odpor proti natržení, a nezhoršují při tom podstatně tažnost a elasticitu. Obecně možno konstatovat, že přísady mají tím větší ztužující účinek, čím jsou jejich částice jemnější. Z toho vyplývá, že i látky chemicky totožné mohou mít naprosto rozdílné ztužující účinky (např. aktivní a málo aktivní saze, křída a uhličitan vápenatý).

Nejdůležitějšími ztužovaly jsou saze. Dřívější rozdělení na aktivní, poloaktivní a málo aktivní již nevyhovuje a saze jsou rozdělovány podle výrobních technologií na: kanálové saze, retortové saze a termické saze.

Plniva jsou přísady, které především snižují cenu směsi, ale zmenšují také její tvrdost a tuhost. Mezi ztužovaly a plnivy lze jen obtížně vést přesnou hranici. Při tom je třeba si uvědomit, že absolutně neaktivní plniva neexistují. Vlastnosti pryže se plněním vždycky mění a o tom, zda k horšímu nebo k lepšímu rozhoduje hledisko, podle něhož je posuzujeme.

S přihlédnutím k těmto výhradám lze mezi ztužovala řadit saze, zásaditý uhličitan hořečnatý, srážený uhličitan hořečnatý a bílé saze.

Jako reprezentanty plniv je možno uvést křidu, kaolín, těživec a blanc fix.

### 1.2.7 Ostatní přísady a polotovary

Do kaučukových směsí se přidává řada dalších přísad, z nichž nejdůležitější jsou tyto:

- *Pigmenty*-titanová běloba, litopon, červeň H, kadmínová žlut', citrónová žlut', okry, ultramarín, saze, vulkánová barviva.
- *Faktivy*-faktis bílý, faktiv hnědý (jejich přidavek zlepšuje jakost povrchu a rozměrovou stabilitu, při nadměrném množství zhoršuje odolnost proti opotřebení, čehož se využívá při výrobě stěrací pryže).

- *Nadouvadla*-jsou přísady, které se přidávají do směsí pro výrobu lehčené pryže. Tyto látky se teplem rozkládají za vzniku plynu. Používá se hydrogenuhličitanu sodného a uhličitanu amonného.
- *Separáční činidla*-zamezují lepení směsí při manipulaci a skladování. Dále se používají k usnadnění vyjímání výrobků (výlisků, výstřiků, laminátů) z forem a mnohdy tak přispívají ke zvýšení produktivity tvářecího zařízení (lisu, vstřikovacího stroje). Jejich představiteli jsou klouzek, velmi jemně mletý vápenec, ebonitový prach, škrob, slída, silikonové oleje a polytetrafluorethylenové disperze ve formě nátěru nebo nástřiku tvářecích ploch. Mají vynikající tepelnou stabilitu (do  $300^{\circ}\text{C}$ ). Nesnáze však mohou vzniknout při následujícím potiskování nebo pokovování povrchu výrobku. Tiskové barvy nebo kovové vrstvy pak někdy totiž na polymeru špatně drží.

Těchto i jiných důvodů se proto mnohdy pro snazší vyjímání výrobků z tvářecích forem používá separáčních fólií, např. z celofánu nebo polyvinylalkoholu.

Velmi známé je také používání vodného roztoku polyvinylalkoholu nebo karboxymethylcelulózy k separaci laminovaných výrobků (např. sportovních lodí nebo windsurfových prken) od tvarovacích povrchů forem.

- *Rozpouštědla*-používají se k přípravě lepidel, k oživení povrchu neztvrděných směsí při konfekci, pro výrobu máčené pryže, pryžových nití apod. Patří mezi ně především benzín, benzen, toluen, xylen, aceton, methylethylketon, ethylacetát a trichlorethylen.
- *Regenerát*-je vyráběn z vytríděných pryžových odpadů. Odpady se nejdříve rozřežou a rozdrtí, odstraní se z nich kovové a jiné předměty a pak se podrobí vlastní regeneraci, která spočívá v tepelném, chemickém a mechanickém zpracování. I když se regenerací nezíská plnohodnotná náhrada kaučuku, přece je regenerát důležitou surovinou, která umožňuje zmenšit při zpracovatelských operacích spotřebu energií a zlepšuje tak hospodárnost výroby. S rostoucím podílem spotřeby syntetických kaučuků význam regenerátu klesá.

- *Plastikační činidla*-plastikační činidla jsou přísady usnadňující první operaci zpracování kaučuku, tzv. plastikaci, tj. úpravu kaučuku intenzivním hnětením. Plastikační činidla, zvaná též peptizační činidla, nebo krátce peptizátory, zvětšují účinnost a rychlost plastikace, protože usnadňují štěpení makromolekul kaučuku, způsobené hnětením, stabilizací přechodně vzniklých radikálů. Proto se používají také při zpracování odpadní pryže na tzv. regenerát. Nejrozšířenějšími plastikačními činidly jsou v současné době: Peptazin BAFD chemicky bis (o-benzamidofenyl) bisulfid a Peptazin BFT chemicky N,S-dibenzoyl-aminothiofenol. Plastikační činidla se dávkuje pro plastikaci přírodního a izoprenového kaučuku v množství 0,05 dsk až 0,2 dsk, pro plastikaci nitrilkaučuku a regeneraci odpadní pryže v koncentraci vyšší, od 1 dsk do 4dsk.
- *Maziva*-tato skupina přísad byla původně vyvinuta pro usnadnění zpracování obtížně zpracovatelných plastů, např. polvinylchloridu, polystyrenu, polytetrafluorethylenu. Teprve nedávno se stala základem zpracovatelských přísad do kaučuků, které dnes označujeme jako pomocné zpracovatelské prostředky. Maziva často nejen usnadňují zpracovatelský proces, ale i zlepšují mnohé vlastnosti výrobků, např. vzhled povrchu, tepelnou a světelnou stabilitu, odolnost vůči povětrnosti. Podle účinku lze maziva rozdělit do dvou základních skupin na
  - *maziva s vnějším účinkem*, tj. látky málo rozpustné v polymeru, a proto vystupující na jeho povrch a vytvářející na něm vrstvu, která usnadní oddělení výrobku od pracovního povrchu zpracovatelského zařízení, a
  - *maziva s vnitřním účinkem*, která jsou dobře rozpustná v polymeru, a proto snižují viskozitu jeho taveniny a navíc do určité míry zmenšují množství tepla vznikajícího třením při zpracování polymerní směsi.

Zdá se však, že všechna maziva plní více nebo méně obě úlohy. Mez rozpustnosti mezi polymerem a mazivem může být vzata jako kritérium jejich klasifikace. Když je překročena, začne i vnitřní mazivo hrát současně roli vnějšího.

Podle chemického složení můžeme maziva rozdělit do pěti charakteristických skupin, a to na:

- *uhlovodíky* - jejich mazací účinek roste s délkou jejich řetězce. Proto tuhé parafíny jsou účinnější než parafinické oleje (s 5 až 15 atomy uhlíku v molekule).
- *mastné kyseliny a jejich deriváty*-(soli, především vápníku a zinku; estery, především butanolu a oktanolu; amidy), sloužící hlavně jako vnější maziva.
- *vosky*-tj. původně přírodní (např. včelí vosk), dnes hlavně syntetické estery
- *těžké alkoholy*-(tj. s více než 30 atomy uhlíku v molekule), snášející se ze stejných důvodů dobře s polymery, jsou rovněž vnitřními mazivy.
- *vícesytné alkoholy*-např. glycerol, esterifikované částečně mastnými kyselinami jsou naopak mazivy vnějšími.

Někdy se uvedené typy maziv kombinují k dosažení určitých speciálních vlastností. Dávkují se obvykle v rozmezí 0,5 dsp do 3dsp.

*Tepelné stabilizátory*-tepelné stabilizátory jsou látky, které umožňují tvarování za tepla a tváření polymerů, jejichž teploty měknutí a rozkladu leží v úzkém rozmezí. Patří k nim především homopolymery a kopolymery vinylchloridu.

Při volbě vhodných stabilizátorů je třeba mít na zřeteli i další přísady v polymerní směsi, zejména změkčovadla a plniva.

Na tepelný stabilizátor jsou kladeny následující požadavky:

- *zamezit odštěpování* chlorovodíku, nebo odštěpený chlorovodík alespoň odstraňovat a zabraňovat tím korozi zpracovatelských zařízení,
- *zabraňovat vzniku barevných struktur*, nebo tyto struktury vzniklé tepelnou destrukcí alespoň rozrušovat,
- *být snášitelný s polymerem*, nevyluhovat se vodou, nezhoršovat mechanické a elektroizolační vlastnosti polymeru, *být netoxický*.

Během posledních desetiletí bylo objeveno velké množství látek, které uvedené požadavky v podstatě splňují. Tento pokrok v oblasti tepelné stabilizace polymerů umožnil jejich bezpečné zpracování i takovými technologickými způsoby, při nichž zpracovatelská teplota dokonce převyšuje teplotu rozkladu čistého polymeru (např. při vstřikování nebo výrobě neměkčených fólií vyfukováním).

*Světelné stabilizátory*-jako světelné stabilizátory se uplatňují přísady, které absorbují ultrafialové záření, tj. tu část světelného spektra, jejíž energie je dostatečně velká, aby způsobovala degradaci polymeru. Proto je někdy nazýváme absorbéry ultrafialového záření.

Klademe na ně následující požadavky:

- nesmějí propouštět ultrafialové světlo, tj. elektromagnetické záření o vlnových délkách od 300 nm do 400 nm, ale musejí je naopak absorbovat;
- přijaté (absorbované) ultrafialové záření musejí přeměnit na energeticky chudší, pro polymery neškodné, tj. dlouhovlnné např. tepelné záření, jehož energie musí ležet pod hodnotou potřebnou k degradaci polymeru;
- samy musejí být vůči ultrafialovému záření odolné, tj. přijatou energii musí přeměňovat bez jakékoliv další změny;
- mezi nimi, polymerem a dalšími přísadami ve směsi nesmí docházet k žádné chemické reakci. Mohla by se totiž projevit minimálně změnou barvy výrobku.

Látky, které tyto požadavky převážně splňují, jsou bezbarvé a podle jejich chemické struktury je lze rozdělit na:

- deriváty benzofenolu,
- deriváty kyseliny salicylové,
- deriváty benzotriazolu a
- tzv. stéricky (tzn. prostorově) stíněné aminy.

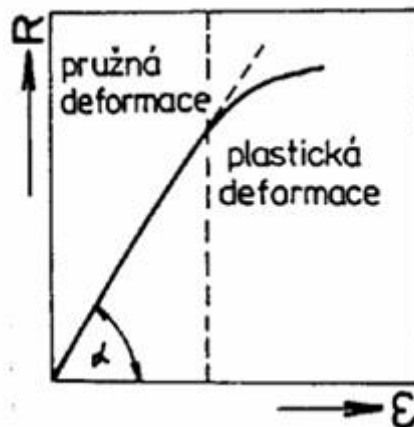


## 1.3 Mechanické chování elastomerů

### 1.3.1 Deformace

Deformace tělesa je změna jeho tvaru díky působení síly. Tyto síly mohou být tažné, tlakové, smykové, ohybové nebo torzní. Těleso se po deformaci nachází v deformovaném stavu. Pokud se vrátí do původního stavu po odeznění síly, deformace se nazývá elastická. Pokud zůstane nějak deformované, jedná se o deformaci plastickou.

Napětí vyvolané v tělese vnějšími silami způsobuje jeho deformaci. Proti vnějším silám působí síly vnitřní, snažící se udržet atomy (ionty) v původních polohách a tak deformaci zabránit.



Obr. 1.: Závislost mezi napětím  $\sigma$  a deformací  $\varepsilon$

### 1.3.2 Elasticita

Působí-li na těleso více sil nebo silových dvojic, které jsou v rovnováze, nezmění se kinetický stav tělesa. Tyto síly však způsobí deformaci tělesa: změni jeho velikost, tvar anebo obojí.

Elasticita neboli pružnost je schopnost látek deformovat se vratně. Přestane-li síla

působit, vrátí se elastické těleso téměř okamžitě do původního stavu. Tato schopnost je dána zvláštnostmi molekulárních charakteristik pryže a výrazně odlišuje kaučuky od jiných materiálů. Vnějšími projevy a molekulárním mechanismem se od sebe odlišují elasticita ideální a elasticita kaučuková.

### 1.3.2.1 Ideální elasticita

Krystalické látky a kovy se pod účinkem vnější síly deformují prakticky okamžitě a mezi silou a jí odpovídající deformací existuje přímá úměrnost. Takové deformační chování se označuje jako ideálně elastické a vztah mezi silou a deformací formuluje Hookův zákon.

Pro deformaci v tahu je možno jej psát ve tvaru:

$$F = k_1 \cdot (l - l_0) \quad (1)$$

kde  $F$  je působící síla,

$l_0$  - délka tělesa v neprotáženém stavu,

$l$  - délka protaženého tělesa,

$(l - l_0)$  - tzv. prodloužení a

$k_1$  - konstanta úměrnosti zvaná tuhost; udává sílu potřebnou k dosažení jednotkového prodloužení.

Pro deformaci ve smyku analogicky platí:

$$F = k_2 \cdot u \quad (2)$$

kde  $u$  je tzv. posunutí a

$k_2$  - konstanta úměrnosti, zvaná smyková tuhost.

Hookův zákon je možné psát ve tvaru:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (3)$$

kde  $\sigma = F / S_0$  je tahové napětí,

$S_0$  - průřez vzorku,

$\varepsilon = (l - l_0) / l_0$  -poměrné prodloužení (protažení),

E-Youngův modul pružnosti v tahu ( $E = k_1 \cdot S_0 / l_0$ ).

Pro smykovou deformaci pak platí:

$$\sigma = G \cdot \gamma \quad (4)$$

kde  $\sigma = F / S_0$  je smykové napětí,

$\gamma = u / y = \operatorname{tg} \alpha$  -smyková deformace(relativní posunutí) a

G-modul pružnosti ve smyku ( $G = k_2 \cdot S_0 / y$ ).

Modul pružnosti ve smyku má u ideálně elastických látek (např. kovů) vysokou hodnotu (G je řádu  $10^5 \text{ kp/cm}^2$ ;  $10^4 \text{ MPa}$ ). S teplotou se téměř nemění (mírně klesá).

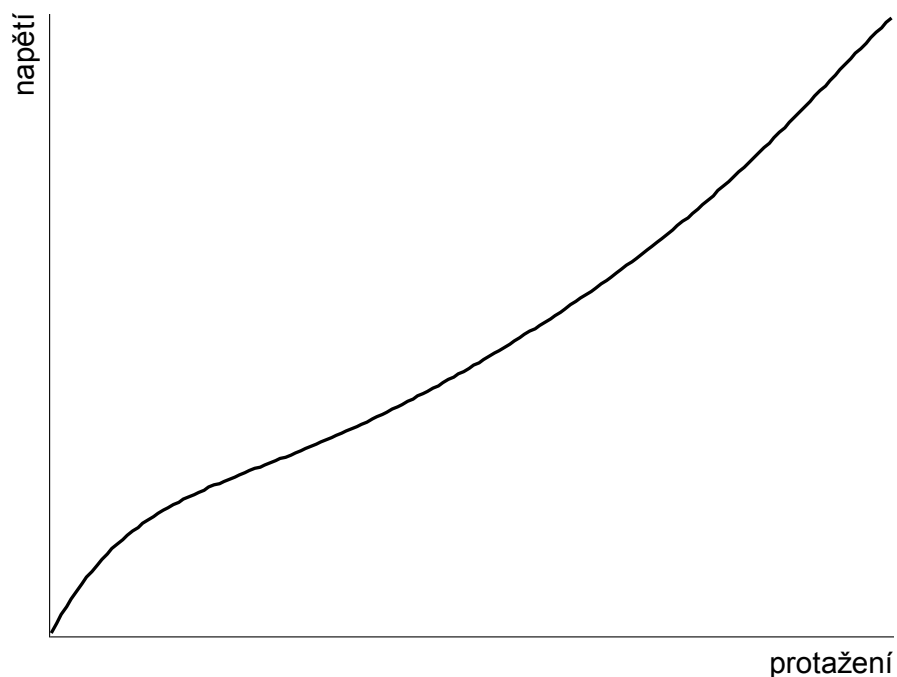
Ideálně elastické deformační chování je charakterizováno vratnými, časově nezávislými, malými deformacemi, platností Hookova zákona a vysokou hodnotou modulu s malou teplotní závislostí. Objevuje se u látek s krystalickou strukturou. V krystalické mřížce jsou uloženy částice hmoty (molekuly, atomy, ionty), které jsou vzájemně poutány velikými silami.

Při působení vnější síly se tyto částice jen nepatrně vychylují ze svých rovnovážných poloh a po oddálení síly se velmi rychle, prakticky okamžitě do těchto poloh vracejí. Uskutečnit se mohou jen malé deformace (několik procent nebo desetin procenta).

### 1.3.2.2 *Kaučuková elasticita*

Elasticita pryže se odlišuje od ideální elasticity kovů a krystalů v těchto nejvýznamnějších rysech:

1. Dosažitelné deformace jsou veliké, mnohonásobně vyšší než u ideálně elastických látek. Tažnost (protažení při přetržení) dosahuje několika set procent původní délky.
2. Závislost napětí na deformaci je lineární jen v oblasti malých deformací. Hookův zákon platí při smykové deformaci přibližně, při protahování jen v oblasti prvních několika procent. Tvar závislosti napětí na protažení má zpravidla charakteristický esovitý průběh.
3. Pryž se deformuje již účinkem malých sil. Poměr napětí a deformace v oblasti malých deformací (modul pružnosti) je asi desettisíckrát menší než u ideálně elastických látek a má řádovou hodnotu 1 MPa [18].



Obr. 2.: Závislost mezi napětím v tahu a deformací při zatěžování elastomerů

4. Objemová tuhost většiny elastomerů je obvykle o dva až tři řády větší než tuhost ve smyku. Objemový modul pružnosti dosahuje hodnot řádově stovek až tisíců MPa, čemuž (s uvážením hodnoty  $E_0$ ) odpovídá Poissonův poměr

$\nu$  o hodnotě blízké 0,5 (v závislosti na obsahu plniv). Hodnota  $\nu = 0,5$  přísluší objemově nestlačitelným materiálům.

5. Deformace pryže je *časově závislá*. Elastické deformační přeměny tu probíhají s určitým zpožděním, protože jsou brzděny vnitřními viskózními odpory uvnitř kaučukové hmoty. Deformační chování pryže má obecně elastické i viskózní projevy současně. Takové chování se označuje jako *viskoelastické*. Mechanické chování elastomerů je dále velmi závislé na teplotě. Při nízkých teplotách (pod  $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) tuhost materiálu výrazně roste a může se přiblížit vlastnostem kovů. Při vysokých teplotách (nad  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) naopak dochází k velkému poklesu tuhosti .

Dnes je už plně dokázáno, že viskoelasticita pryže určuje nejenom zvláštnosti jejího chování deformačního, ale že podmiňuje i některé zvláštnosti a komplikovanost jejího chování destruktčního (pevnosti, tažnosti, strukturní pevnosti, odolnosti proti odírání apod.).

Z tohoto popisu je zřejmé, že pro použití Hookeova zákona nejsou splněny dvě základní podmínky: závislost deformace na napětí není lineární a dochází k velkým deformacím ( $> 2\%$ ). Přesto je tento vztah s dostatečnou přesností použitelný v aplikacích kde se nepředpokládají větší deformace zatěžovaného prvku. Pro přesné výpočty a pro případy větších deformací je nutno použít nelineární popis závislosti napětí-deformace .

Na základě teoretických představ o kaučukové elasticitě je možno vyjmenovat předpoklady pro vysokou elasticitu:

1. dlouhé molekuly,
2. volná otáčivost kolem jednoduchých vazeb,
3. pravidelnost stavby řetězce,
4. slabé mezimolekulové síly,
5. silné primární vazby rozmístěné podél řetězců ve vhodných intervalech, takže tvoří trojrozměrnou síť.

Ohebnost řetězce způsobená možností otáčet se kolem jednoduchých vazeb uhlík-uhlík, dovoluje, aby se řetězec prodloužil při rozvinutí, a naopak smrštil při opětovém svinutí do své původní polohy.

Smrštění je způsobeno kinetickou energií atomů v řetězci, jejichž příčné pohyby mají snahu svinout protažený řetězec do náhodného klubka.

Aby bylo možno kvantitativně řešit elasticitu, bylo nutno definovat segment sítě jako část řetězové molekuly mezi dvěma uzlovými body sítě. Molekulová váha tohoto segmentu se obvykle označuje  $M_c$ . Každý segment v síti se chová obdobně jako molekula v plynu či v roztoku.

Elasticitu je možno řešit podobně jako jiné molekulární jevy, jak z kinetického, tak z termodynamického hlediska. Termodynamické řešení předpokládá, že náhodně svinutý řetězec sítě je ve stavu nejvyšší entropie a že se entropie snižuje, když je řetězec vnější silou protahován.

Kinetický přístup k řešení vztahu mezi napětím a protažením vede ke kinetické rovnici elasticity:

$$\frac{F}{A_0} = nRT(\lambda - \lambda^{-2}) \quad (5)$$

Kde  $F$  je vnitřní síla

$A_0$  -původní průřez vzorku,

$\lambda$  -poměr délky v protaženém stavu k délce původní,

$n$  – počet molů řetězců sítě v objemové jednotce,

$R$ -plynová konstanta,

$T$ -absolutní teplota.

V oblasti nízkých a středních protažení je tato rovnice v poměrně dobrém souladu s experimentem. Při vyšších protaženích vzrůstá napětí rychleji, než rovnice předpovídá. Tyto odchylky jsou způsobeny konečnou roztažností sítě.

Jedním z předpokladů při odvozování rovnice (5) bylo, že všechny řetězce sítě jsou navázány na obou koncích. Vzhledem k tomu, že tento předpoklad není často splněn, poněvadž síť je obvykle tvořena zesíťováním primárních řetězců s původním číselným průměrem molekulové váhy  $M_n$ , zůstanou v síti nepřipojené konce řetězců.

Zavedením korekce na volné konce řetězců dostáváme vztah

$$\frac{F}{A_0} = nRT \left( 1 - \frac{2M_c}{M_n} \right) (\lambda - \lambda^{-2}) \quad (6)$$

Lepšího souhlasu s experimentálními hodnotami při vyšších deformacích se dosahuje při použití empirické Mooney-Rivlinovy rovnice

$$\frac{F}{A_0} = 2C_1(\lambda - \lambda^{-2}) + 2C_2(1 - \lambda^{-3}) \quad (7)$$

kde  $C_1$  a  $C_2$  jsou nezávislé parametry daného materiálu.

### 1.3.3 Tahové vlastnosti pryže

#### 1.3.3.1 Pevnost v tahu

Pevnost pryže bývá velmi často předepisována, ne však jako hodnota využívaná při použití, ale jako hodnota kontrolní, zaručující ještě s jinými vlastnostmi určitou kvalitu výrobku.

Pevnost lze upravovat:

- a) volbou eleastomeru
- b) plnivem a dávkováním a
- c) vulkanizačním systémem.

V neplněných směsích má na pevnost v tahu rozhodující vliv volba eleastomeru.

Dalším faktorem, který nejvíce ovlivňuje konečnou pevnost, je povaha a objem plnění, přičemž se ovšem uplatňuje i vliv eleastomeru, tak např. pevnost přírodního kaučuku lze zlepšit jen některými plnivými a jen v omezeném rozsahu; u kaučuku butadienstyrenového a butadienakrylonitrilového se zlepšuje jejich špatná výchozí pevnost téměř každým plněním.

Všeobecně se nejlepších pevností dosahuje přidávkem aktivních plniv, tzv. ztužovadel.

Nejvýznačnější skutečnost, s níž se setkáváme při měření pevnosti pryže, je poměrně značná nereprodukovatelnost hodnot. Vyplývá to z vlastní povahy procesu trhání a nemožnosti připravit naprosto dokonalé zkušební těleso. K přetržení dojde vždy ve vadném místě a vadná místa jsou vždy v tělese přítomna. Pečlivou přípravou je sice možno odstranit hrubé vady, jako cizí příměsy, bubliny, poškrábání povrchu apod., ale není možno vyloučit zdroje vad ve vzorku zcela a beze zbytku. Tyto vady mohou být způsobeny během přípravy zkušební tělesa statickými chybami, které mají původ v mikroskopických fluktuacích hustoty, koncentrace plniva a síťové hustoty.

Čím větší je zkušební těleso, tím je pravděpodobnější, že se v něm vyskytuje nějaké vadné místo. Průměrné pevnosti proto poněkud vzrůstají se zmenšováním rozměrů zkušební těliska. Většinou se při měření pevnosti počítá průměr ze všech výsledků a vypouštějí se hodnoty naměřené u vzorků, které podle dodatečné kontroly obsahovaly zjevné vady.

Snad žádná fyzikální vlastnost pryže nebyla měřena častěji než pevnost. Je však překvapující, že z tohoto velkého množství údajů jen málo jich má význam pro pochopení



podstaty procesu přetržení pryže. U údajů pevnosti většinou chybí kontrola všech proměnných, které pevnost ovlivňují a nichž nejdůležitější jsou původní molekulová váha a absolutní stupeň zesílení.

Podle teorie dokonalé sítě jsou molekulové řetězce ve vulkanizovaném kaučuku uspořádány do krychlí. Každý řetězec sítě mezi uzlovými body má molekulovou váhu  $M_c$  a v původním nedeformovaném stavu jsou prameny řetězců uspořádány v prostoru ve třech na sebe kolmých směrech.

Při tahové deformaci sítě v jednom směru se jedna třetina řetězců napíná a řetězce kolmé na směr napětí se stlačují. Celkové napětí se rovnoměrně rozloží na všechny řetězce ve směru síly. Je-li  $n$  počet těchto řetězců a každý řetězec může udržet zatížení  $F_c$ , pak pevnost celého zkušebního tělesa je

$$F = n \cdot F_c \quad (8)$$

Je-li počet pramenů v jednom směru  $n$ , je celkový počet pramenů v jednotkové krychli o hraně  $1\text{ cm}$   $3n$ . Každý pramen však obsahuje  $p$  řetězců, z nichž každý má molekulovou váhu  $M_c$ . Celkový počet řetězců sítě v  $1\text{ cm}^3$  je proto  $3pn$ . Poněvadž  $M_c$  gramů kaučuku musí obsahovat počet řetězců odpovídající Avogadrovu číslu  $N$ , bude  $1\text{ cm}^3$  sítě obsahovat  $\rho N / M_c$  řetězců, kde  $\rho$  je hustota kaučuku.

Máme tedy

$$3pn = \frac{\rho N}{M_c} \quad (9)$$

Dále přímým výpočtem dostáváme počet řetězců sítě v  $1\text{ cm}^3$   $3p^3$ .

Máme proto také

$$3p^3 = \frac{N}{M_c} \quad (10)$$

Spojením rovnic (9) a (10) vypočteme  $n$ :

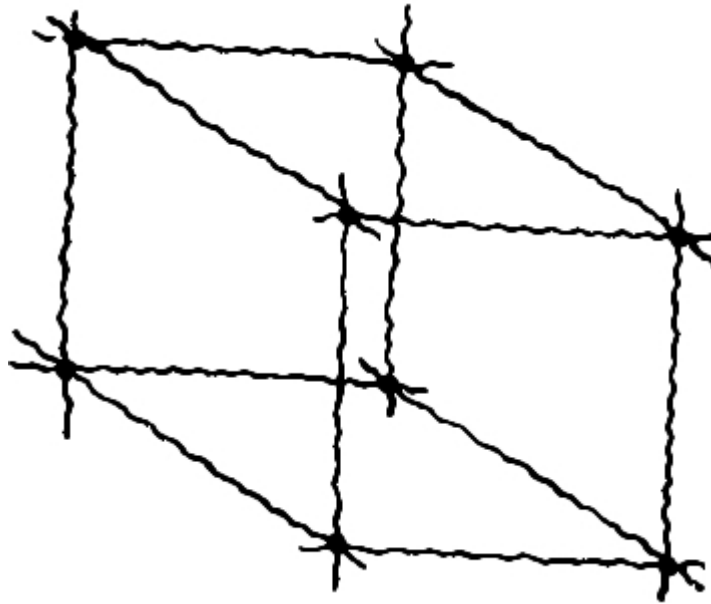
$$n = \left( \frac{\rho N}{3M_c} \right)^{2/3} \quad (11)$$

Podle rovnice (8) je pevnost

$$F = \left( \frac{\rho N}{3M_c} \right)^{2/3} F_c \quad (12)$$

Tento jednoduchý výraz je však zatížen značnou chybou (např. pro  $M_c = 1000$  je odhad pevnosti v tahu 343,23 MPa) a nedává výsledky srovnatelné s experimentálně stanovenou pevností, neboť při jeho odvození se vycházelo z příliš hrubých zjednodušených předpokladů:

1. Všechny molekuly ve vzorku jsou svázány do sítě. Konce řetězců jsou zanedbány.
2. Všechny řetězce mají přesně stejnou délku.
3. Vždy jedna třetina řetězců je navzájem kolmá ve třech hlavních směrech.
4. Zanedbávají se vadná místa zkušebního tělesa.
5. Zanedbává se krystalizace.
6. Zanedbávají se všechny časově závislé viskozitní vlivy.



Obr. 3.: Schematický model uspořádání sítě vulkanizovaného kaučuku

Pevnost v tahu u pryže je udávána v přepočtu na původní průřez tělesa-i přesto, že změna průřezu v tahu je značná-není možné změřit průřez v okamžiku přetržení. Z toho pramení poměrně značné rozdíly mezi pevností v tahu počítanou na původní a okamžitý průřez.

### 1.3.3.2 Tažnost

Tažnost měkké pryže se pohybuje ve velmi značném rozmezí, a to od 150 do 900%.

Podobně jako pevnost je i tažnost ovlivňována základním použitým kaučukem. Kaučuky krystalující mají, a to hlavně v neplněném nebo málo plněném stavu, tažnost podstatně větší než např. kaučuk butadienstyrenový, který při malé pevnosti nemůže mít ani větší tažnost.

S plněním zásadně tažnost klesá; ve směsích kaučuků nekrystalujících s plněním tažnost nejdříve stoupá jako důsledek rychle se zvětšující pevnosti; při větším plnění tažnost opět postupně klesá.

## 1.4 Hyperelasticita

### 1.4.1 Obecný vztah mezi napětím a deformací

Vztah mezi napětím a deformací obdržíme z funkce hustoty deformační energie, vyjádřením virtuální práce, uvažované jako:

$$\delta W = (\sigma_1 / \lambda_1) \cdot (\partial W / \partial \lambda_1) \delta \lambda_1 \quad (13)$$

analogicky lze vyjádřit vztah pro  $\lambda_2, \lambda_3$ . Pro  $\sigma_1$  obdržíme:

$$\sigma_1 = 2 \left[ \lambda_1^2 \left( \frac{\partial W}{\partial I_1} \right) - \left( \frac{1}{\lambda_1^2} \right) \left( \frac{\partial W}{\partial I_2} \right) \right] + P \quad (14)$$

s analogickými vztahy pro  $\sigma_2$  a  $\sigma_3$ , kde  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  jsou jednotlivá skutečná napětí. Množství  $P$  udává nespecifikovaný tlak.  $P$  se stanovuje na základě známých hodnot  $\sigma$  a  $\lambda$  při základních módech zatěžování.

### 1.4.2 Jednoosý tah

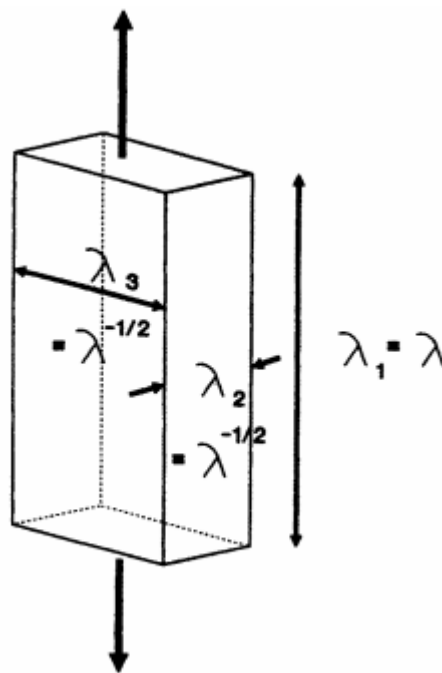
Při jednoosém tahu (prostém protažení) působí na daný vzorek materiálu tahová síla pouze v jednom směru. Jednoduché prodloužení je definováno poměrným protažením  $\lambda_1 = \lambda, \lambda_2 = \lambda_3 = \lambda^{-1/2}$ . Tato deformace vyplývá ze stavu nestlačitelnosti, kdy objem zůstává nezměněn a tudíž  $\lambda_1 \cdot \lambda_2 \cdot \lambda_3 = 1$ . Pro tento stav napětí, kde jsou boční strany daného vzorku nezatížené, platí  $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$  a rovnice pro  $\sigma_2$  a  $\sigma_3$  se stane rovnicí neznámého stlačení  $P$ :

$$P = -2 \left[ \lambda^{-1} \left( \frac{\partial W}{\partial I_1} \right) - \lambda \left( \frac{\partial W}{\partial I_2} \right) \right] \quad (15)$$

Když tuto rovnici dosadíme do vztahu (14) výsledek je:

$$\sigma = 2 \left[ \left( \frac{\partial W}{\partial I_1} \right) + \lambda^{-1} \left( \frac{\partial W}{\partial I_2} \right) \right] (\lambda^2 - \lambda^{-1}) \quad (16)$$

kde  $\sigma$  udává skutečné napětí.



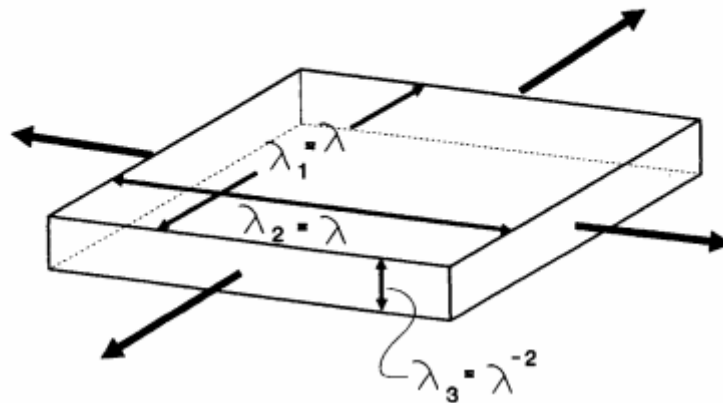
Obr. 4.: Jednoosý tah

Předchozí rovnice je velko-deformační ekvivalent jednoduchého vztahu Hookova zákona  $\sigma = E \cdot \varepsilon$ , který lze aplikovat při malých deformacích [16].

### 1.4.3 Dvouosý tah

Vztah pro dvouosý tah můžeme získat ze vztahů pro jednoosou napjatost. Poměrné protažení je dáno jako  $\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda; \lambda_3 = 1/\lambda^2$ . Napětí  $\sigma_3 = 0$ , protože tato strana vzorku je nezatížena. Tlak  $P$  tudíž přechází na  $P = -2(\lambda^{-4}W_1 - \lambda^4W_2)$ . Napětí  $\sigma_1$  a  $\sigma_2$  jsou dány

jako:  $\sigma_1 = \sigma_2 = 2(W_1 + \lambda^2 W_2) \cdot (\lambda^2 - \lambda^{-4})$ . Toto nám ukazuje, že mezi deformací a napětím je vysoce nelineární vztah [16].



Obr. 5.: Dvouosý tah

#### 1.4.4 Čistý smyk

Tento deformační stav je definován napětím aplikovaným ve směru 1, v takové formě, že je zabráněno změně šířky ve směru 2, tzn.  $\lambda_2 = 1$ . Tato skutečnost je odůvodněním pro název smyk. Při smykové deformaci linie rovnoběžná s jednou z hlavních os nepodléhá žádnému prodloužení. Název čistý znamená, že hlavní osy nerotují během deformace. Výška vzorku  $h$  ve vertikálním směru (směr namáhání) je značně menší, než horizontální šířka  $w$  ve směru druhém a to řádově méně než jedna desetina  $w$ . Dlouhé horizontální svorky zabraňují kontrakci vedlejších stran vzorku a dochází pouze k napětí ve vertikálním směru, takže je dáno  $\lambda_2 = 1$ .

Poměrné prodloužení je při deformaci dáno jako:  $\lambda_1 = \lambda, \lambda_2 = 1$  a  $\lambda_3 = 1/\lambda$ , zatímco napětí  $\sigma_3 = 0$ . Napětí  $\sigma_2$  je vyvoláno tuhými svorkami, takže není rovno nule. Z rovnice (14) tlak  $P$  obdržíme jako:

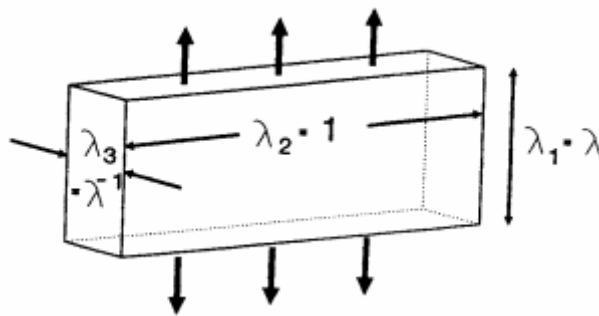
$$P = -2(\lambda^{-2}W_1 - \lambda^2W_2) \quad (17)$$

Tudíž napětí  $\sigma_1 (= \sigma)$  v protáhném směru je dáno jako:

$$\sigma = 2(W_1 + W_2) \cdot (\lambda^2 - \lambda^{-2}) \quad (18)$$

A vedlejší napětí  $\sigma_2$  je:

$$\sigma_2 = 2(W_1 + \lambda^2 W_2) \cdot (1 - \lambda^{-2}) \quad (19)$$



Obr. 6.: Čistý smyk

[16].

## 1.5 Hyperelastické modely

Tyto modely jsou založeny na definici vztahu pro hustotu potenciálu deformační energie  $W$ . V průběhu posledních 60 let bylo různými autory postupně navrženo velké množství hyperelastických modelů. Tyto modely jsou nezávislé na rychlosti a historii deformace. V posledních letech jsou však publikovány práce zabývající se modelováním zahrnujícím i tyto efekty.

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 [17].

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

$$W = W(I_1, I_2, I_3 \{M\}) \quad \text{nebo} \quad W = W(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3 \{M\}) \quad (20)$$

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

Protažení  $\lambda_i$  je poměrem deformované délky  $l_i$  ve směru osy  $i$  ku původní délce  $l_0$ .

$$\lambda_i = \frac{l_i}{l_{0i}} \quad (21)$$

Deformační invarianty  $I_i$  jsou definovány vztahy:

$$\begin{aligned} I_1 &= \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2 \\ I_2 &= \lambda_1^2 \lambda_2^2 + \lambda_2^2 \lambda_3^2 + \lambda_3^2 \lambda_1^2 \\ I_3 &= \lambda_1^2 \lambda_2^2 \lambda_3^2 \end{aligned} \quad (22)$$

Pro nestlačitelné materiály je invariant  $I_3 = 1$ .

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



$$S_{ij} = 2 \frac{\partial W}{\partial C_{ij}} \quad (23)$$

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:

$$[C] = \begin{bmatrix} \lambda_1^2 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_2^2 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_3^2 \end{bmatrix} \quad (24)$$

Z rovnice 23 lze tedy odvodit vztah pro složky Cauchyova tenzoru napětí (skutečné napětí).

$$\sigma_{ij} = -p\delta_{ij} + 2 \frac{\partial W}{\partial I_1} C_{ij} - 2 \frac{\partial W}{\partial I_2} C_{ij}^{-1} \quad (25)$$

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

#### Přehled hyperelastických modelů:

Jednotlivé hyperelastické modely se liší definicí funkce hustoty deformační energie  $W$ . Níže jsou uvedeny dnes nejpoužívanější tvary funkce  $W$ , které jsou většinou pojmenovány po svých autorech [17].

**Polynomická funkce:**

*Polynomická* forma je založena na prvním a druhém deformačním invariantu ( $I_1, I_2$ ). Jde o model, jenž má formu:

$$W = \sum_{i+j=1}^N c_{ij} (I_1 - 3)^i (I_2 - 3)^j \quad (26)$$

kde  $c_{ij}$  jsou materiálové konstanty a za  $N$  se dosazují hodnoty od jedné do nekonečna, ale obvykle není hodnota  $N$  vyšší než 3. Tato forma může být aplikována pro deformaci dosahující až 300 % [17].

**Neo-Hookean**

Model *Neo-Hookean* patří k nejstarším a nejjednodušším modelům. Je možné ho brát, jako podmnožinu *polynomické* formy pro  $N = 1$ ,  $c_{01} = 0$ ,  $c_{10} = \mu/2$ . 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.

$$W = \frac{\mu}{2} (I_1 - 3) \quad (27)$$

kde  $\mu$  je počáteční smykový modul.

$$\mu = nkT \quad (28)$$

kde  $n$  je počet polymerních řetězců v jednotkovém objemu,  $k$  je Boltzmannova konstanta a  $T$  je absolutní teplota.

Model je použitelný pro deformaci do 40 % v jednoosém namáhání [17].

### ***Yeoh***

Model *Yeoh* je podobný polynomické formě, ale nepoužívá druhého deformačního invariantu a jako takový se obtížněji vyhodnocuje a poskytuje méně přesné výsledky. Jeho výhodou je naopak jeho jednoduchost. Je definován jako:

$$W = \sum_{i=1}^N c_{i0} (I_1 - 3)^i \quad (29)$$

kde  $c_{i0}$  je materiálová konstanta a za  $N$  se dosazují hodnoty od jedné do nekonečna, ale obvykle není hodnota  $N$  vyšší než 3. Pokud  $N = 1$  jde o model *Neo-Hookean*.

*Yeoh* model je obvykle uvažován s  $N = 3$ . Tří-parametrový *Yeoh* model obecně poskytuje dobré výsledky pro deformace velkého rozsahu i když nemusí být přesný pro nižší hodnoty deformace [17].

### ***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  $N = 1$ :

$$W = c_{10}(I_1 - 3) + c_{01}(I_2 - 3) \quad (30)$$

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

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

$$W = c_{10}(I_1 - 3) + c_{01}(I_2 - 3) + c_{11}(I_1 - 3)(I_2 - 3) \quad (31)$$

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

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

$$\begin{aligned} W = & c_{10}(I_1 - 3) + c_{01}(I_2 - 3) + c_{20}(I_1 - 3)^2 \\ & + c_{11}(I_1 - 3)(I_2 - 3) + c_{02}(I_2 - 3)^2 \end{aligned} \quad (32)$$

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

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

$$\begin{aligned} W = & c_{10}(I_1 - 3) + c_{01}(I_2 - 3) \\ & + c_{20}(I_1 - 3)^2 + c_{11}(I_1 - 3)(I_2 - 3) + c_{02}(I_2 - 3)^2 \\ & + c_{30}(I_1 - 3)^3 + c_{21}(I_1 - 3)^2(I_2 - 3) \\ & + c_{12}(I_1 - 3)(I_2 - 3)^2 + c_{03}(I_2 - 3)^3 \end{aligned} \quad (33)$$

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. Pět nebo devíti-parametrové modely mohou být používány pro deformace až do 300 % [17].

### **Arruda-Boyce**

*Arruda-Boyce* je model založený na mikromechanice vnitřní struktury elastomerů. *Arruda-Boyce* může být uvažován jako rozšíření modelu *Yeoh* pro  $N = 5$ , kde konstanty mají reálný význam.

$$W = \mu \sum_{i=1}^5 \frac{C_i}{\lambda_L^{2i-2}} (I_1^i - 3^i) \quad (34)$$

kde konstanty  $C_i$  jsou definovány jako:

$$\begin{aligned} C_1 &= \frac{1}{2}, & C_2 &= \frac{1}{20}, & C_3 &= \frac{11}{1050}, \\ C_4 &= \frac{19}{7000}, & C_5 &= \frac{519}{673750} \end{aligned} \quad (35)$$

kde  $\mu$  je počáteční smykový modul (stejně jako u modelu *Neo-Hookean*) a  $\lambda_L$  je tzv. "limitní protažení" sítě mikromechanického modelu struktury materiálu, při kterém už se síť dál neprotahuje a napětí se začíná blížit nekonečnu. Jestliže se  $\lambda_L$  rovná nekonečnu, forma *Arruda-Boyce* přechází na *Neo-Hookean*. Model je vhodný pro deformaci do 300 % [17].

### **Gent**

Gentův model je podobný formulačně složitějšímu modelu *Arruda-Boyce*, jelikož také užívá konceptu limitního síťového protažení, nevychází však z modelu vnitřní struktury elastomerů.

$$W = -\frac{EI_m}{6} \ln\left(1 - \frac{I_1 - 3}{I_m}\right) \quad (35)$$

kde  $E$  je počáteční modul pružnosti, který je pro nestlačitelné materiály  $3\mu$ .  $I_m$  je limitní hodnota členu  $(I_1 - 3)$ , analogická k  $\lambda_L$  v *Arruda-Boyce* modelu. Jestliže hodnota přirozeného logaritmu narůstá, výsledná forma se bude podobat modelu *Yeoh*. Jestliže se  $I_m$  bude rovnat nekonečnu model opět přejde na formu *Neo-Hookean*. Výhody modelu spočívají v jeho jednoduchosti (pouze dvě materiálové konstanty) a schopnosti postihnout závěrečnou vyztužovací fázi napět'ově deformační odezvy [17].

### *Ogden*

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

$$W = \sum_{i=1}^N \frac{\mu_i}{\alpha_i} (\lambda_1^{\alpha_i} + \lambda_2^{\alpha_i} + \lambda_3^{\alpha_i} - 3) \quad (36)$$

kde  $\mu_i$  a  $\alpha_i$  jsou materiálové konstanty bez konkrétního fyzikálního významu ( $\mu_i$  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  $\alpha_1 = 2$  se Ogden stává ekvivalentní k modelu *Neo-Hookean*. Pro  $N = 2$ ,  $\alpha_1 = 2$  a  $\alpha_2 = -2$  *Ogden* přechází na dvou-parametrový Mooney-Rivlin model. *Ogden* může být obecně aplikován pro deformaci do 700 % [17].

Výše uvedené vztahy jsou v důsledku předpokládané objemové nestlačitelnosti elastomerů nezávislé na třetím invariantu  $I_3$  pravého Cauchy-Greenova deformačního tenzoru. Pro případné zahrnutí objemové stlačitelnosti "téměř nestlačitelných" elastomerů je funkce  $W$  doplněna o aditivní člen  $W_{vol}$  závislý na  $I_3$  (respektive poměrné objemové deformaci  $J$ , pro kterou platí  $I_3 = J^2$ ) a objemovém modulu  $K$ . Níže je stručný přehled tvarů  $W_{vol}$  používaných v uvedených modelech:

$$\begin{aligned}
 W_{vol} &= \frac{K}{2}(J-1)^2 \\
 W_{vol} &= \frac{K}{4}\left((J-1)^2 + (\ln J)\right) \\
 W_{vol} &= K(J \ln J - J + 1) \\
 W_{vol} &= \frac{9K}{2}\left(J^{\frac{1}{3}} - 1\right)^2 \\
 W_{vol} &= \frac{K}{2}\left(\frac{J-1}{2} - \ln J\right)
 \end{aligned} \tag{38}$$

### Stanovení materiálových konstant pro hyperelastické modely

Jednoduché lineární modely jsou založeny na modulu pružnosti a Poissonově konstantě. Tyto parametry lze stanovit poměrně jednoduše na standardních sériově vyráběných zařízeních. Avšak, pro stanovení materiálových konstant nelineárních hyperelastických modelů je nutno v materiálu dosáhnout i dalších módů namáhání. Pro tento způsob zatížení jsou nezbytné speciální přístroje a vybavení.

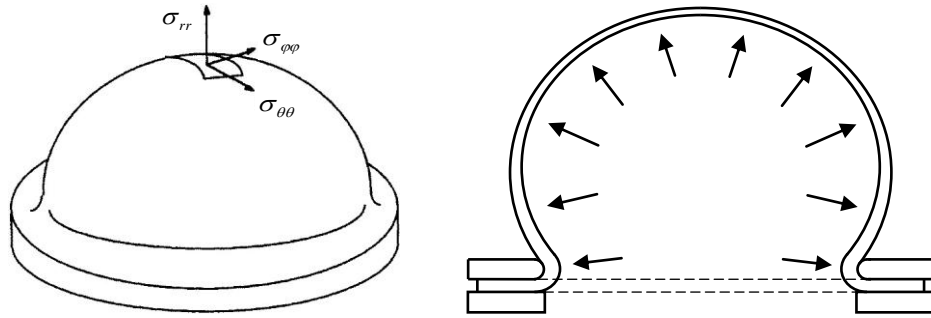
Abychom získali přesné parametry do hyperelastických modelů musíme materiál zkoušet v jednoosém tahu, dvouosém tahu a čistém smyku. Vzhledem k různorodosti elastomerů je nutné pro každou konkrétní analýzu přesně stanovit materiálové konstanty daného materiálu. Požadovaným výstupem z testů je vždy celá křivka závislosti napětí/deformace pro daný způsob zatěžování.

Jednoosý tah lze testovat na univerzálních zkušebních strojích. V tomto případě je vzorek materiálu roztahován ve směru jediné osy.

Při dvouosém zatížení je nutno plochý vzorek materiálu napínat ve všech směrech jeho roviny (dohází k tomu např. při nafukování míče). Tohoto stavu lze dosáhnout několika způsoby, již zmíněním vydutím plochého vzorku stlačeným vzduchem (obr. 7), roztahováním čtvercového vzorku do dvou navzájem kolmých směrů, nebo roztahováním kruhového vzorku radiálně ve směru od středu .

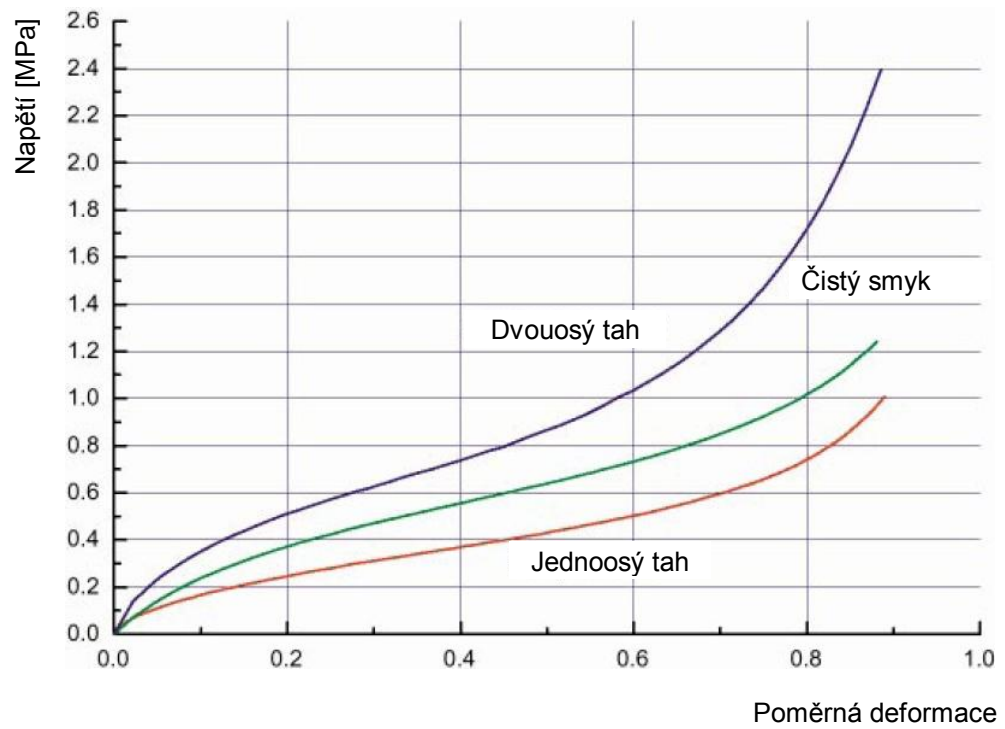
Čistého smyku lze v tělese dosáhnout natahováním podélného vzorku jehož výška je alespoň 10x menší než jeho šířka.





Obr. 7.: Metoda dvouosého tahu pomocí nafouknutí vzorku

Obecný průběh výsledných křivek závislosti napětí a deformace je znázorněn na obr. 8. Z těchto dat jsou pak pomocí metody nejmenších čtverců určeny materiálové parametry pro zvolený hyperelastický model. Počet těchto konstant se liší na základě zvoleného modelu (viz výše) a při dnešních možnostech výpočetní techniky může být docela vysoký, ale v běžných výpočtech se zpravidla volí modely, které nevyžadují více než 6 materiálových konstant.



Obr. 8.: Příklad chování konkrétního elastomeru v jednotlivých módech zatěžování



## **II. PRAKTICKÁ ČÁST**

## 2 PRAKTICKÁ ČÁST

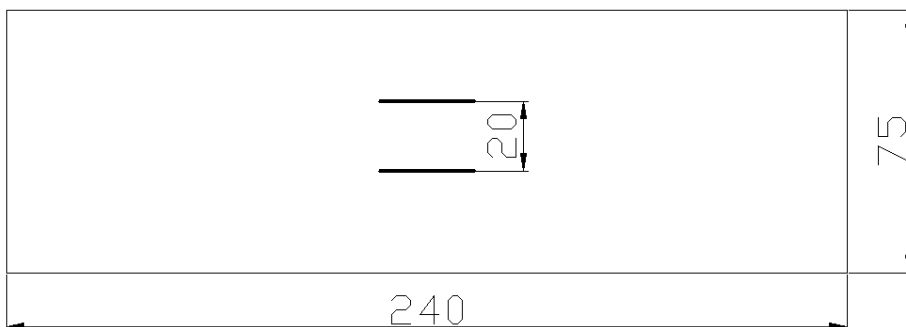
### 2.1 Cíl práce

Cílem této práce je srovnání snímání deformace elastomerů při tahové zkoušce na trhacím stroji Zwick. Jde tedy o porovnání dat získaných z videonahrávky pořízené při tahové zkoušce, s daty získanými z trhacího stroje Zwick.

### 2.2 Metodika práce

#### 2.2.1 Zkušební vzorky

Jako zkušebních vzorků bylo použito dvacet pryžových pásků o rozměrech 240x75x1,57 mm.



Obr. 9.: Zkušební vzorek

#### 2.2.2 Zkušební zařízení

##### Digitální posuvné měřítko

Posuvným měřítkem byly změřeny tloušťky elastomerů.

##### Trhací stroj ZWICK

Trhací stroj vyhovoval požadavkům ISO 5893:1993.

Celý název: Zwick 145 665

Maximální zkušební síla: 20 kN

Celková výška: 2012 mm

Strojová výška: 1284 mm

Pracovní šířka: 420 mm

Rozpětí čelistí: 15 mm

Hmotnost: 150 kg

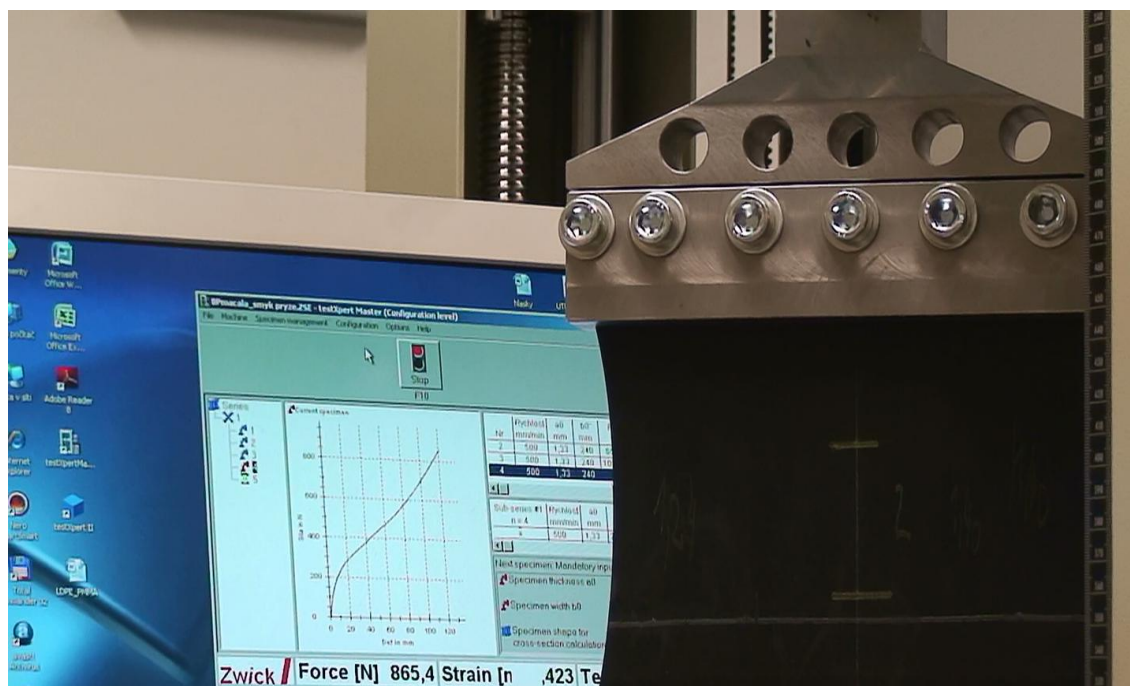
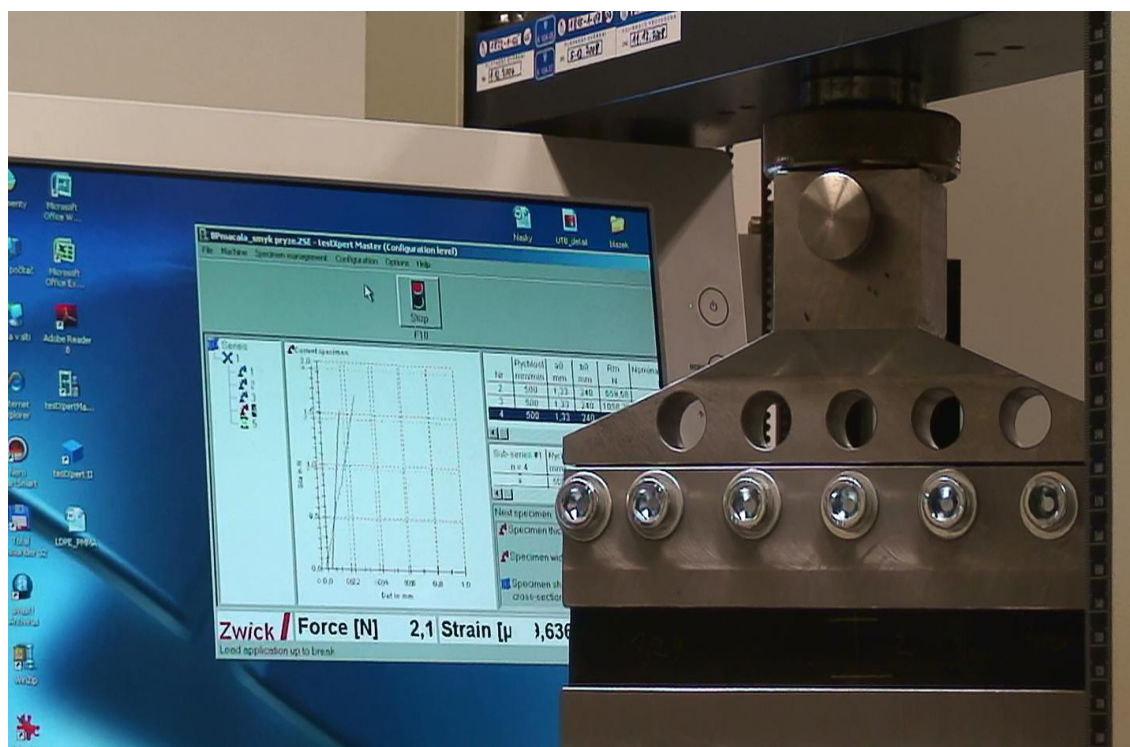
Rychlost posuvu čelistí: 500 mm/min

### **Zkušební teplota**

Zkouška probíhala při laboratorní teplotě.

#### **2.2.3 Průběh zkoušky**

- 1) bylo provedeno nastříhání vzorků elastomerů na požadované rozměry (240x75 mm) a každý ze vzorků byl orýsován dle obr. 9
- 2) u každého vzorku byla změřena jeho tloušťka a naměřená hodnota napsána na vzorek. Každý ze vzorků byl opatřen pořadovým číslem
- 3) byly nastaveny vstupní parametry ( délka vzorku=240 mm a tloušťka vzorku) do počítače připojeného k trhacímu stroji
- 4) přichystání kamery, na kterou byl průběh zkoušky zaznamenán
- 5) upnutí vzorku do čelistí stroje
- 6) sepnutí posuvu čelistí – začátek zkoušky
- 7) vzorek byl natahován až do přetržení (resp. vytržení vzorku z čelisti). Na monitoru počítače byl v průběhu zkoušky znázorněn graf závislosti napětí v tahu  $\sigma$  na prodloužení  $\varepsilon$  a síla F, kterou byl vzorek natahován
- 8) po přetržení vzorku byl stejný postup aplikován u zbylých vzorků.



Obr. 10, 11.: Průběh tahové zkoušky

#### 2.2.4 Zpracování naměřených dat

Data byla zpracována pro dvacet vzorků elastomerů. Průběh tahové zkoušky byl natáčen na kameru, která snímala natahovaný vzorek i monitor počítače, na němž byla napsána síla působící na materiál. Tato videa byla poté sestřihána na jednotlivé snímky. Sestřihání snímků bylo provedeno následovně: první snímek u každého ze vzorků byl vytvořen těsně před přetržením vzorku a dále bylo navázáno snímky v sekundových intervalech, až do nulové hodnoty síly a protažení vzorku. Pro každý ze vzorků tak bylo pořízeno 15-20 snímků. Z každého z takto vzniklých obrázků byla následovně odečtena velikost síly  $F$ . Poté byly jednotlivé snímky vloženy do programu AutoCAD 2002, pomocí něhož byly odměřeny velikosti protažení vzorků. Z hodnot síly  $F$ , bylo vypočteno napětí  $\sigma$  podle vzorce  $\sigma = \frac{F}{S}$

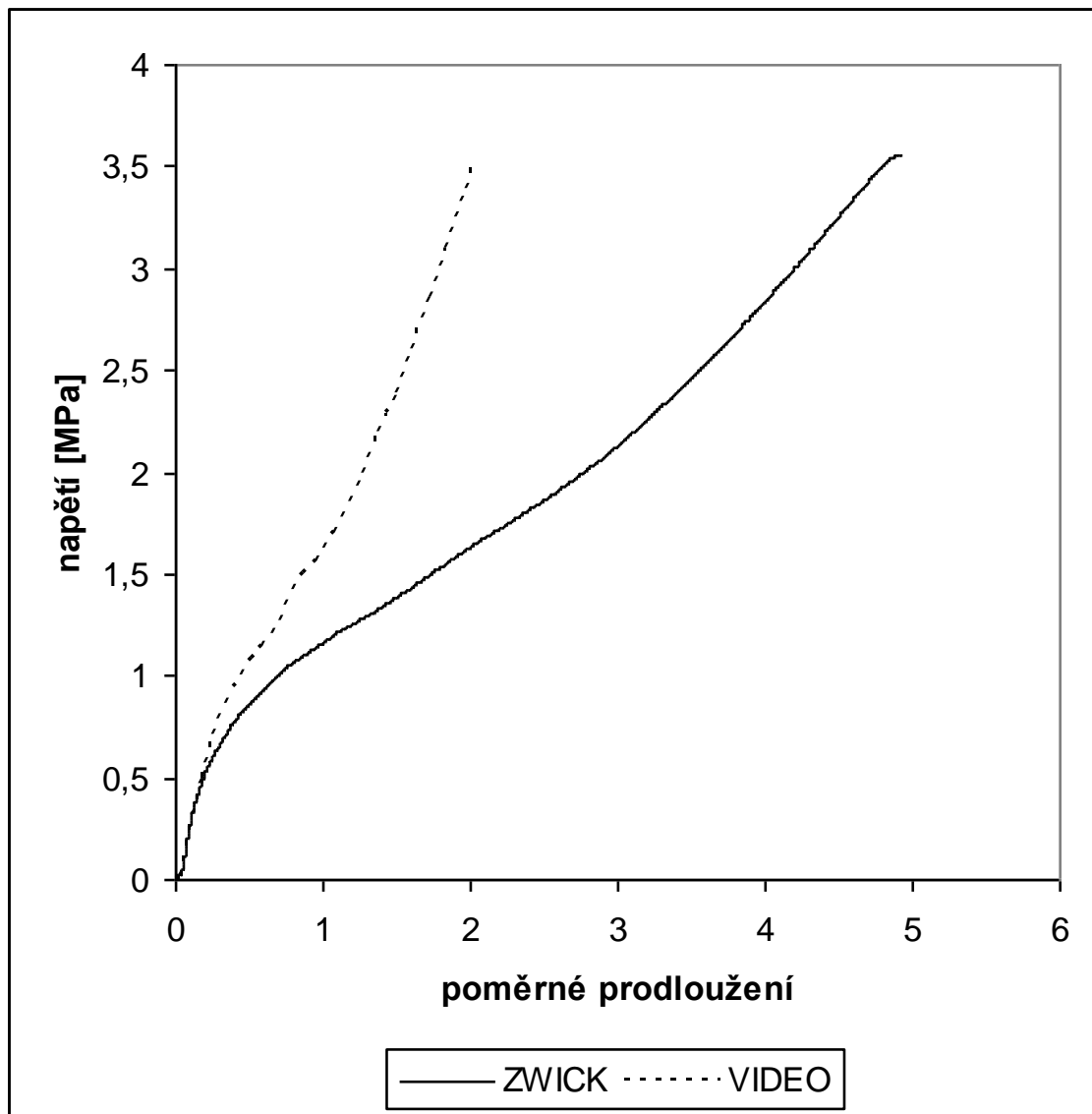
a z protažení vzorku poměrné prodloužení  $\varepsilon = \frac{l - l_0}{l_0}$ . Následně byl vyhotoven graf,

znázorňující závislost napětí  $\sigma$  na poměrném prodloužení  $\varepsilon$  pro každý z dvaceti vzorků. Z trhacího stroje ZWICK byla dodána tato data: hodnoty síly  $F$  a poměrného prodloužení v % taktéž pro všech dvacet vzorků, přičemž toto poměrné prodloužení bylo vypočítáno ze vzdálenosti upínacích čelistí stroje. Ze síly bylo podobně jako v předešlém případě vypočteno napětí  $\sigma$ . Poté byla zhotovena grafická závislost těchto dvou hodnot, čímž vzniklo opět dvacet grafů. V dalším kroku byly přiřazeny vždy příslušně dva grafy k sobě a vloženy oba do jednoho obrázku.

Dále byla zhotovena tabulka s hodnotami poměrného prodloužení  $\varepsilon$  získaného jak ze snímků sestřihávaných z videí, tak z dat trhacího stroje Zwick. Hodnoty poměrného prodloužení byly odečteny pro jednotnou hodnotu tahového napětí  $\sigma = 2,3\text{MPa}$ . Tyto hodnoty byly následně porovnány jak absolutním, tak i procentuálním rozdílem hodnot.



### 3 VÝSLEDKY A DISKUZE



Obr. 12.: Tahová křivka - křivka závislosti poměrného prodloužení na napětí

Na obrázcích umístěných v přílohách jsou vyobrazeny závislosti napětí v tahu na poměrném prodloužení získaných z videí a z dat trhacího stroje Zwick, přičemž hodnoty poměrného prodloužení získané z videí, byly zjišťovány odměřováním vzdálenosti dvou svislých čar narysovaných na vzorku vzdálených v nezatíženém stavu 20 mm od sebe (viz obr.9). Naproti tomu hodnoty poměrného prodloužení ze stroje Zwick, byly odečítány ze vzájemné vzdálenosti upínacích čelistí stroje. Jak je patrné z grafů, u dat získaných z trhacího stroje Zwick bylo zjištěno zhruba dvojnásobné velikosti poměrného prodloužení  $\varepsilon$ , z čehož plyne, že velikost poměrného prodloužení získaná ze vzdálenosti upínacích čelistí je značně zkreslená a nelze ji tedy použít. Tato skutečnost je způsobena zmenšením tloušťky průřezu vzorku v průběhu tahové zkoušky, které umožní vykluzování z upínacích čelistí. Možným řešením tohoto faktu by bylo použití pneumatických upínacích čelistí.

Číslo vzorku	$\varepsilon$ - video	$\varepsilon$ - Zwick	Absolutní rozdíl	%
1	1,45	3,269	1,819	225,448
2	1,8	4,06	2,26	225,556
3	1,62	3,572	1,952	220,494
4	1,7	3,869	2,169	227,588
5	1,68	3,793	2,113	225,774
6	1,66	3,789	2,129	228,253
7	1,68	3,85	2,17	229,167
8	1,72	3,916	2,196	227,674
9	1,76	3,963	2,203	225,170
10	1,78	3,942	2,162	221,461
11	1,6	3,467	1,867	216,688
12	1,6	3,388	1,788	211,750
13	1,57	3,566	1,996	227,134
14	1,52	3,222	1,702	211,974
15	1,48	3,116	1,636	210,541
16	1,54	3,269	1,729	212,273
17	1,5	3,217	1,717	214,467
18	1,51	3,177	1,667	210,397
19	1,51	3,223	1,713	213,444
20	1,56	3,285	1,725	210,577
Aritmetický průměr	1,61	3,548	1,936	219,791
Směrodatná odchylka	0,11	0,320	0,220	7,214

*Tab.1.: Tabulka naměřených hodnot poměrného prodloužení*

Poměrné prodloužení bylo odečteno pro hodnotu napětí v tahu

$$\sigma = 2,3 \text{ MPa.}$$



## ZÁVĚR

V rámci této práce byla provedena tahová zkouška elastomerů. Vzorky byly podrobeny jednoosému namáhání. Cílem této práce bylo pomocí této zkoušky zjistit, zda lze brát hodnoty poměrného prodloužení získané z trhacího stroje Zwick jako směrodatné. Bylo prokázáno, že tomu tak není a tyto hodnoty jsou značně nepřesné a zkreslené.

## SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] Drobný, J. *Přehled technologie pryže*, Praha: SNTL, 1962
- [2] Franta, I. *Gumárenské suroviny*, Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1979
- [3] Franta, I. *Zpracování kaučukových směsí a vlastnosti pryže*, Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1969
- [4] Holzmüller, W. *Fyzika polymerů*, Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1966
- [5] Knedla, B. *Technická pryž*, Praha: SNTL, 1975
- [6] Kubík, J. *Zkušební metody v gumárenství*, Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1962
- [7] Marcín, J. *Příprava gumárenských směsí*, Praha: SNTL, 1961
- [8] Meissner, B. *Fyzika polymerů*, Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1987
- [9] Novotný, J. *Technologie plastů ve strojírenství*, Praha: Dům techniky ČSVTS, 1987
- [10] Pech, J. *Syntetický kaučuk*, Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1971
- [11] Schätz, M. *Zkoušení polymerů*, Praha: VŠCHT, 1988
- [12] Schätz, M. *Kaučuk*, Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1965
- [13] Štěpán, M. *Teoretické základy*, Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1965
- [14] Ducháček, V. *Polymery-výroba, vlastnosti, zpracování*, Praha: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, Praha 2006, dostupný z <http://vydavatelstvi.vscht.cz/>
- [15] *Strojírenské materiály* dostupný z [http://www.ateam.zcu.cz/download/SMA\\_1\\_2008.pdf](http://www.ateam.zcu.cz/download/SMA_1_2008.pdf)

- 
- [16] Jančík, M. *Zkoušení hyperelastických materiálů*, UTB ve Zlíně, 2005, [Bakalářská práce]
- [17] Přednášky předmětu *Aplikace výpočetních metod*
- [18] Dlouhý, O. *Konstrukce přípravku pro analýzu smykové napjatosti elastomerů*, UTB ve Zlíně, 2008, [Bakalářská práce]

**SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK**

$\sigma$	napětí [Pa]
$\varepsilon$	poměrná deformace
$F$	síla [N]
$l_0$	původní délka [m]
$l$	délka po protažení [m]
$k_1$	tuhost [ $N \cdot m^{-1}$ ]
$E$	modul pružnosti v tahu [Pa]
$S_0$	původní průřez vzorku [ $m^2$ ]
$\gamma$	smyková deformace
$G$	modul pružnosti ve smyku [Pa]
$\nu$	Poissonův poměr
$\lambda_i$	poměrné protažení
$n$	počet molů řetězců sítě v objemové jednotce
$R$	plynová konstanta [ $J \cdot mol^{-1} \cdot K^{-1}$ ]
$T$	absolutní teplota [K]
$W$	potenciál deformační energie [ $J \cdot m^{-3}, Pa$ ]
$I_1, I_2, I_3$	deformační invarianty
$c_{ij}$	složky Cauchy-Greenova deformačního tenzoru [Pa]
$S_{ij}$	složky 2.Piola-Kirchhoffova tenzoru napětí [Pa]
$p$	Tlak [Pa]
$\delta_{ij}$	Kronekerovo delta



$\mu$	počáteční smykový modul [Pa]
$\alpha_{ij}$	materiálová konstanta
$K$	objemový modul pružnosti [Pa]
$J$	poměrná objemová deformace
$k$	Boltzmannova konstanta [ $J \cdot K^{-1}$ ]

**SEZNAM OBRÁZKŮ**

<i>Obr. 1.: Závislost mezi napětím <math>\sigma</math> a deformací <math>\varepsilon</math> .....</i>	25
<i>Obr. 2.: Závislost mezi napětím v tahu a deformací při zatěžování elastomerů .....</i>	28
<i>Obr. 3.: Schematický model uspořádání sítě vulkanizovaného kaučuku .....</i>	35
<i>Obr. 4.: Jednoosý tah .....</i>	37
<i>Obr. 5.: Dvouosý tah .....</i>	38
<i>Obr. 6.: Čistý smyk.....</i>	39
<i>Obr. 7.: Metoda dvouosého tahu pomocí nafouknutí vzorku .....</i>	49
<i>Obr. 8.: Příklad chování konkrétního elastomeru v jednotlivých módech zatěžování .....</i>	50
<i>Obr. 9.: Zkušební vzorek.....</i>	53
<i>Obr. 10, 11.: Průběh tahové zkoušky .....</i>	55
<i>Obr. 12.: Tahová křivka - křivka závislosti poměrného prodloužení na napětí .....</i>	57

## SEZNAM TABULEK

<b>Tab.1.:</b>	Tabulka naměřených hodnot poměrného prodloužení .....	59
----------------	---	----

**SEZNAM PŘÍLOH**

**P 1: Materiál č.1**

**P 2: Materiál č.2**

**P 3: Materiál č.3**

**P 4: Materiál č.4**

**P 5: Materiál č.5**

**P 6: Materiál č.6**

**P 7: Materiál č.7**

**P 8: Materiál č.8**

**P 9: Materiál č.9**

**P 10: Materiál č.10**

**P 11: Materiál č.11**

**P 12: Materiál č.12**

**P 13: Materiál č.13**

**P 14: Materiál č.14**

**P 15: Materiál č.15**

**P 16: Materiál č.16**

**P 17: Materiál č.17**

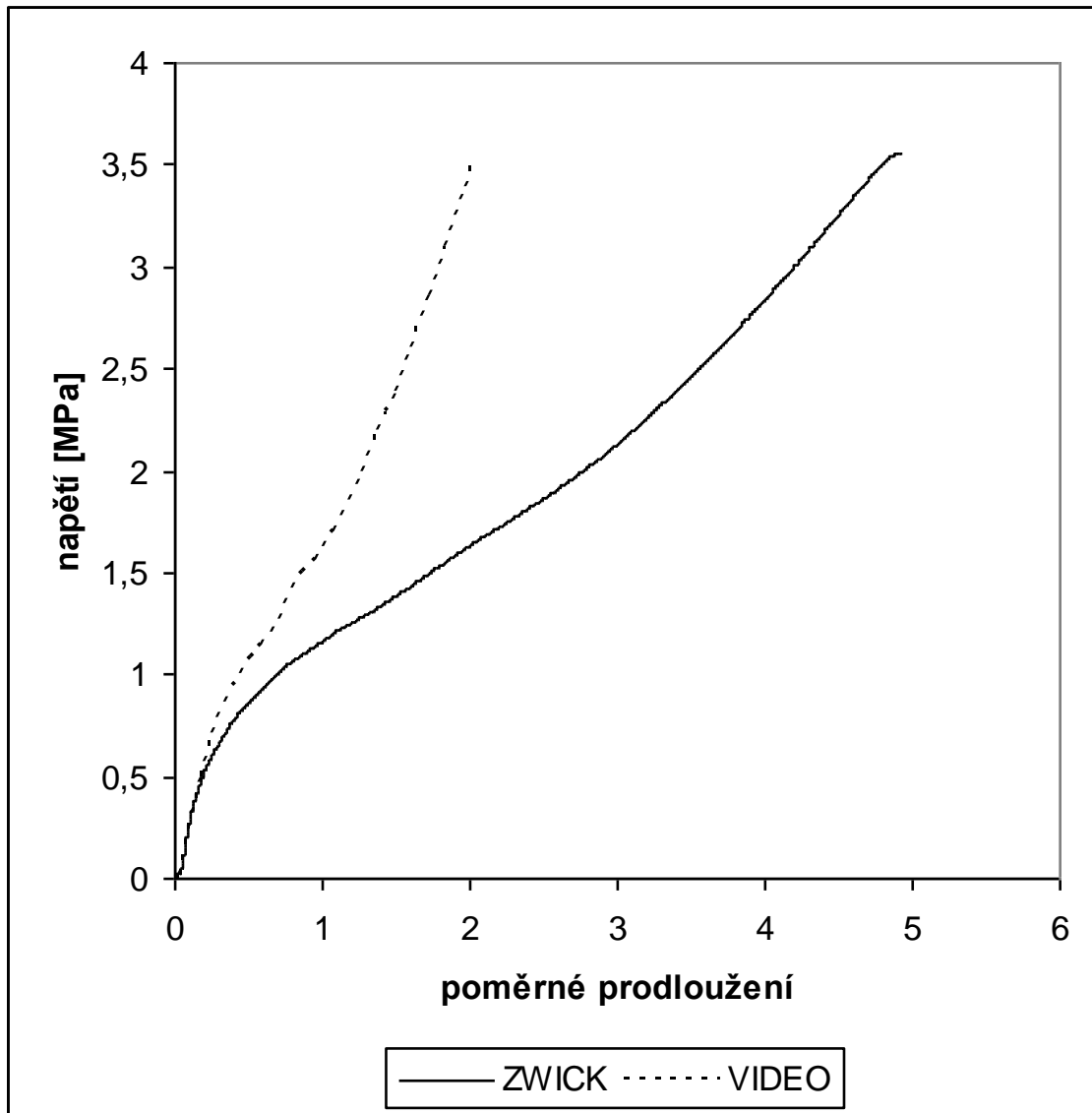
**P 18: Materiál č.18**

**P 19: Materiál č.19**

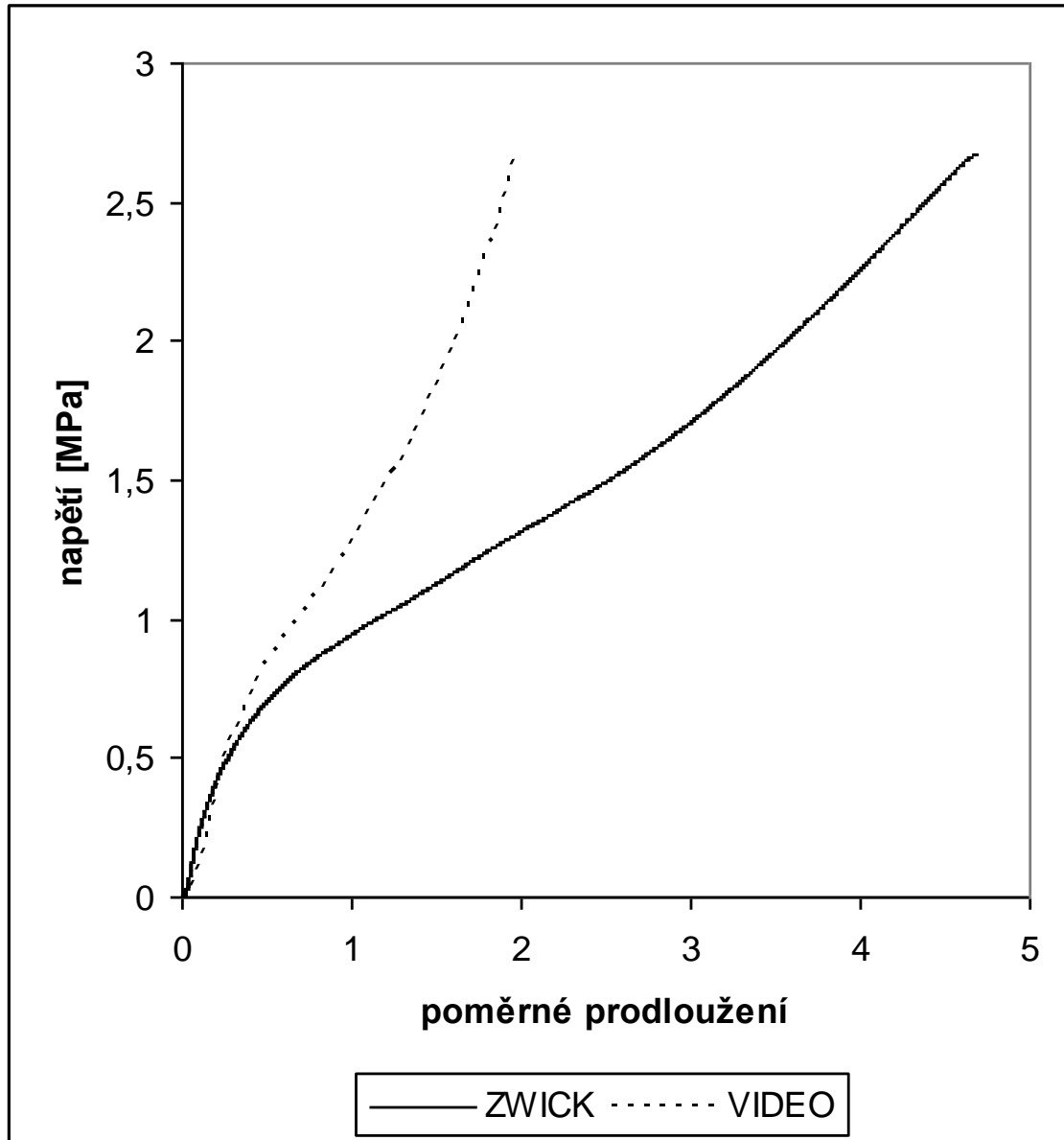
**P 20: Materiál č.20**



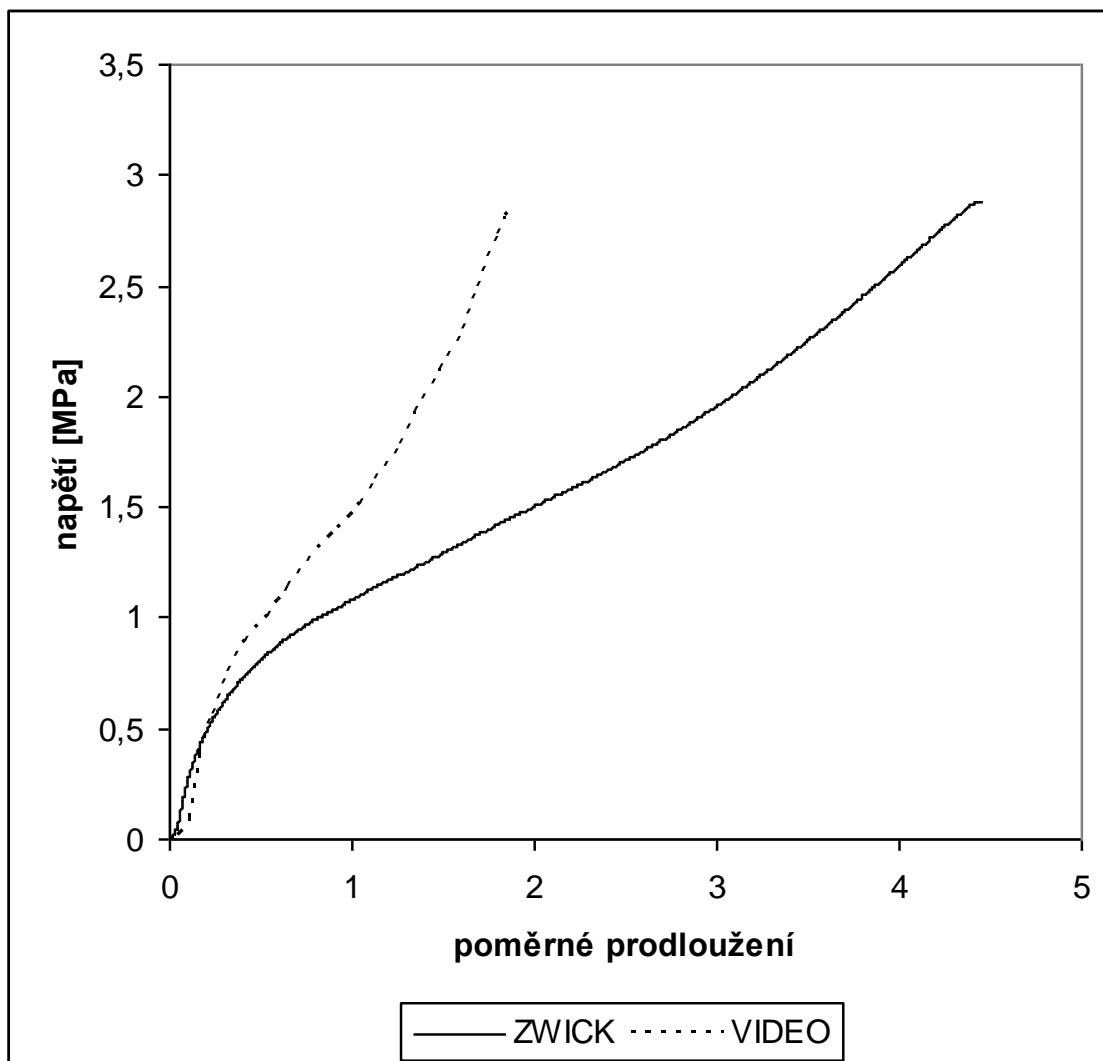
## PŘÍLOHA P I: MATERIÁL Č. 1



## PŘÍLOHA P 2: MATERIÁL Č. 2

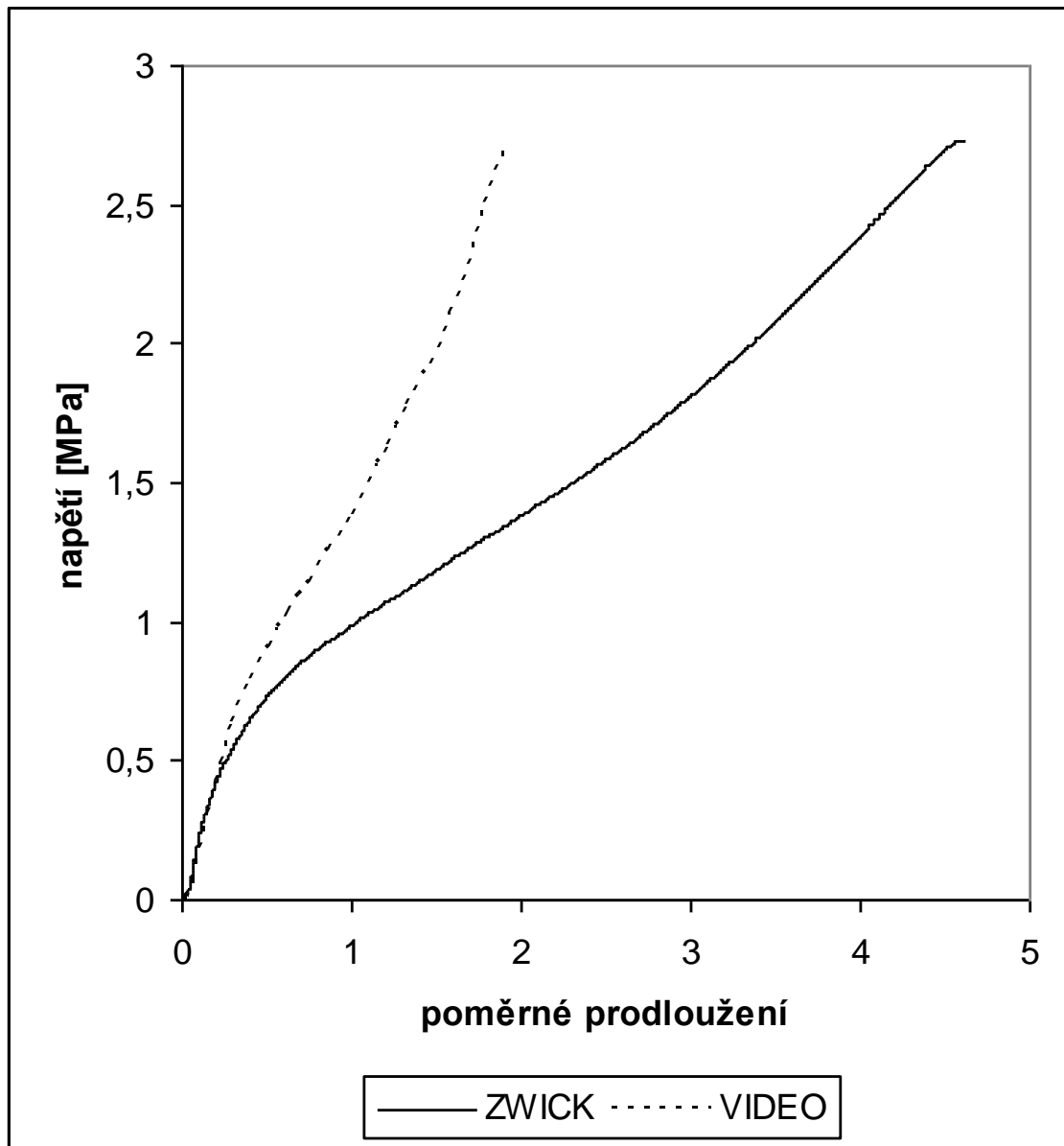


### PŘÍLOHA P 3: MATERIÁL Č. 3

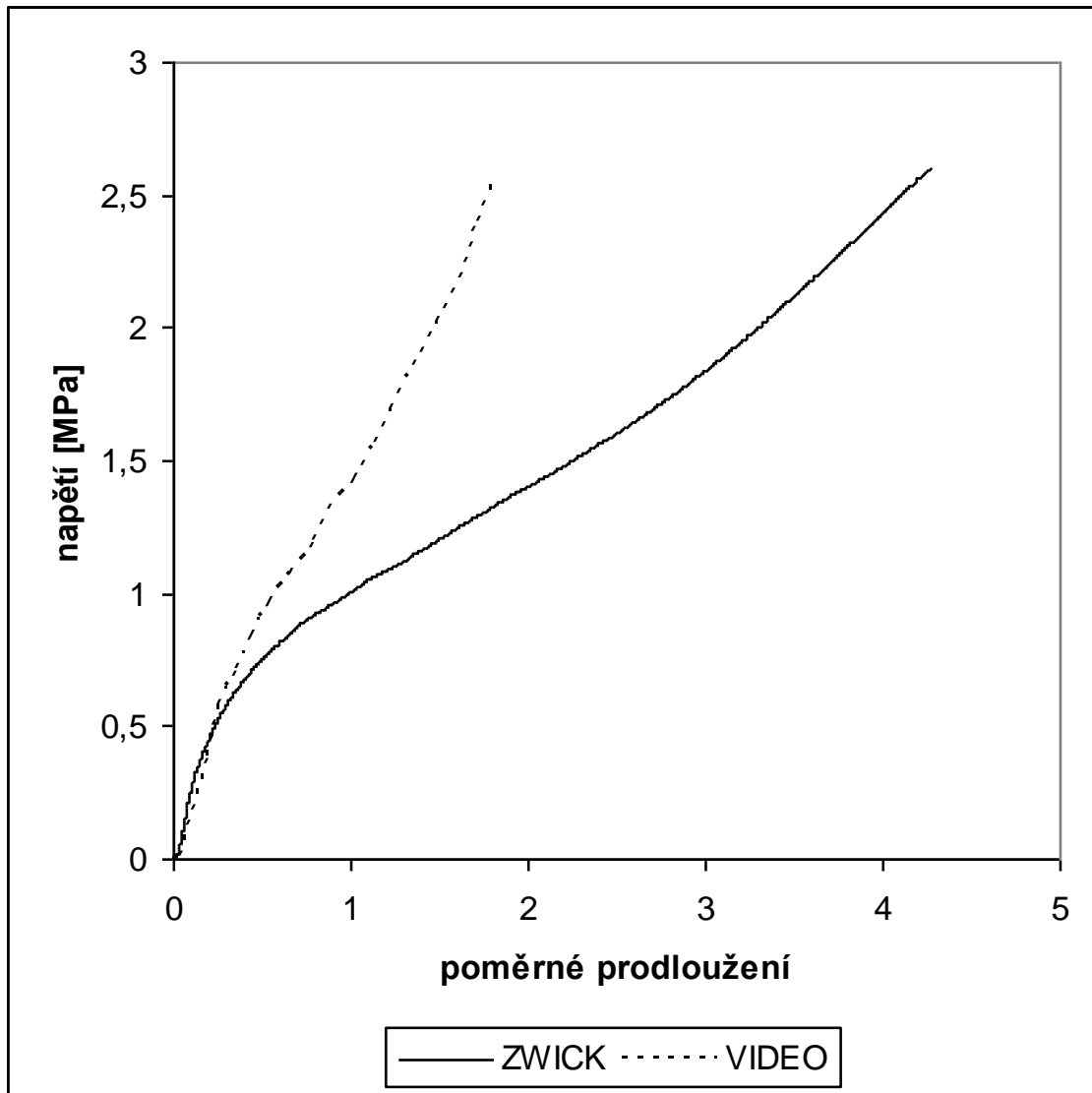




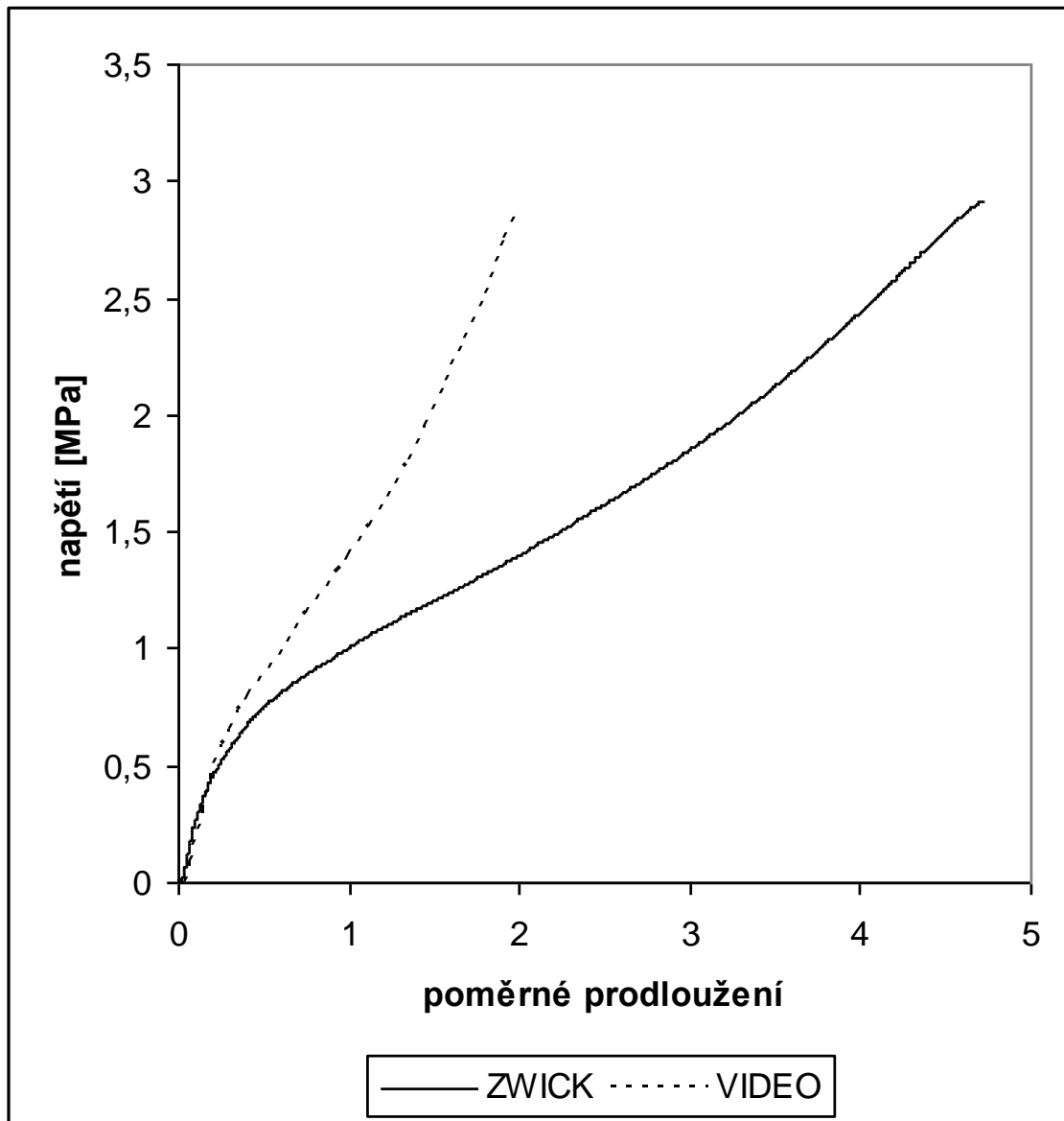
## PŘÍLOHA P 4: MATERIÁL Č. 4



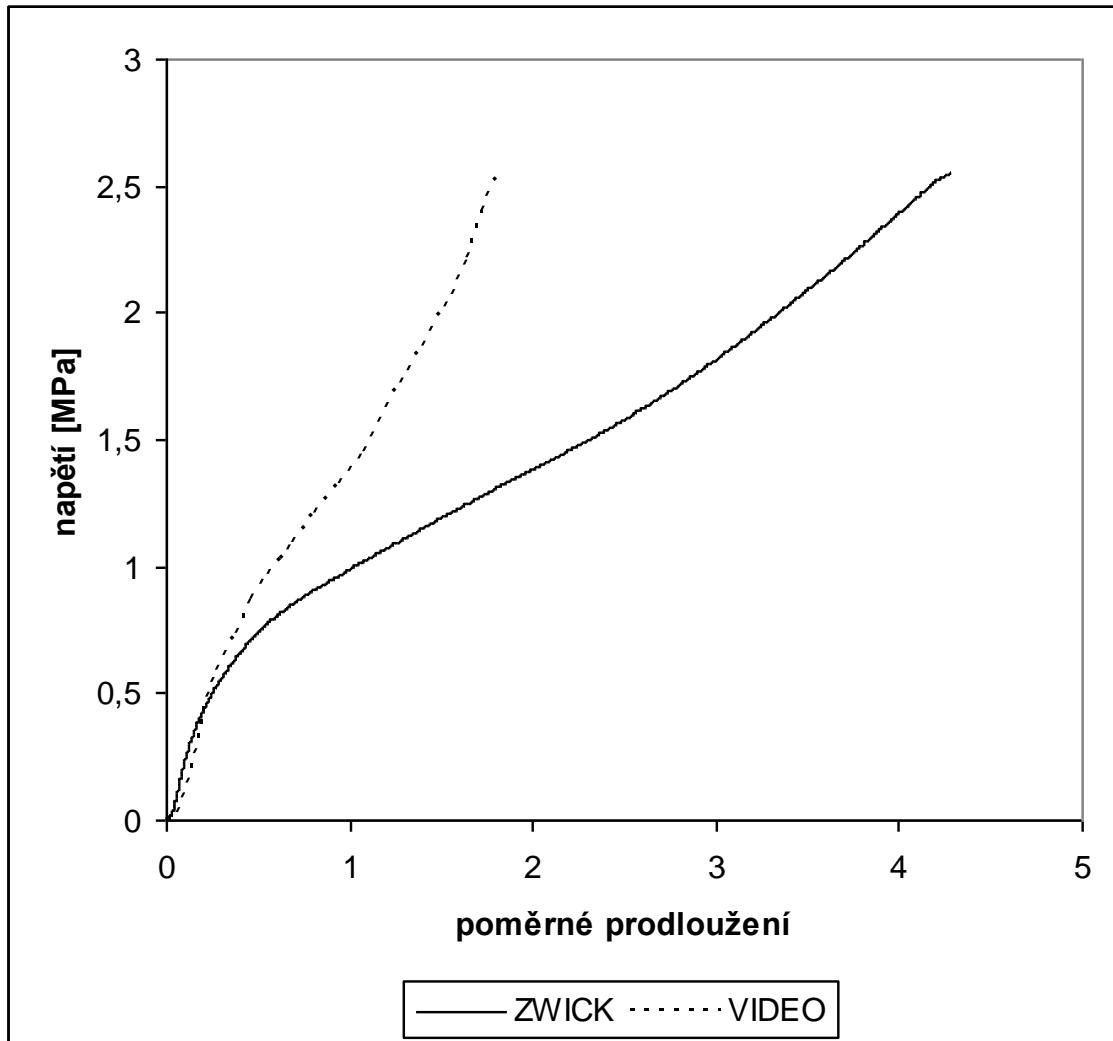
## PŘÍLOHA P 5: MATERIÁL Č. 5



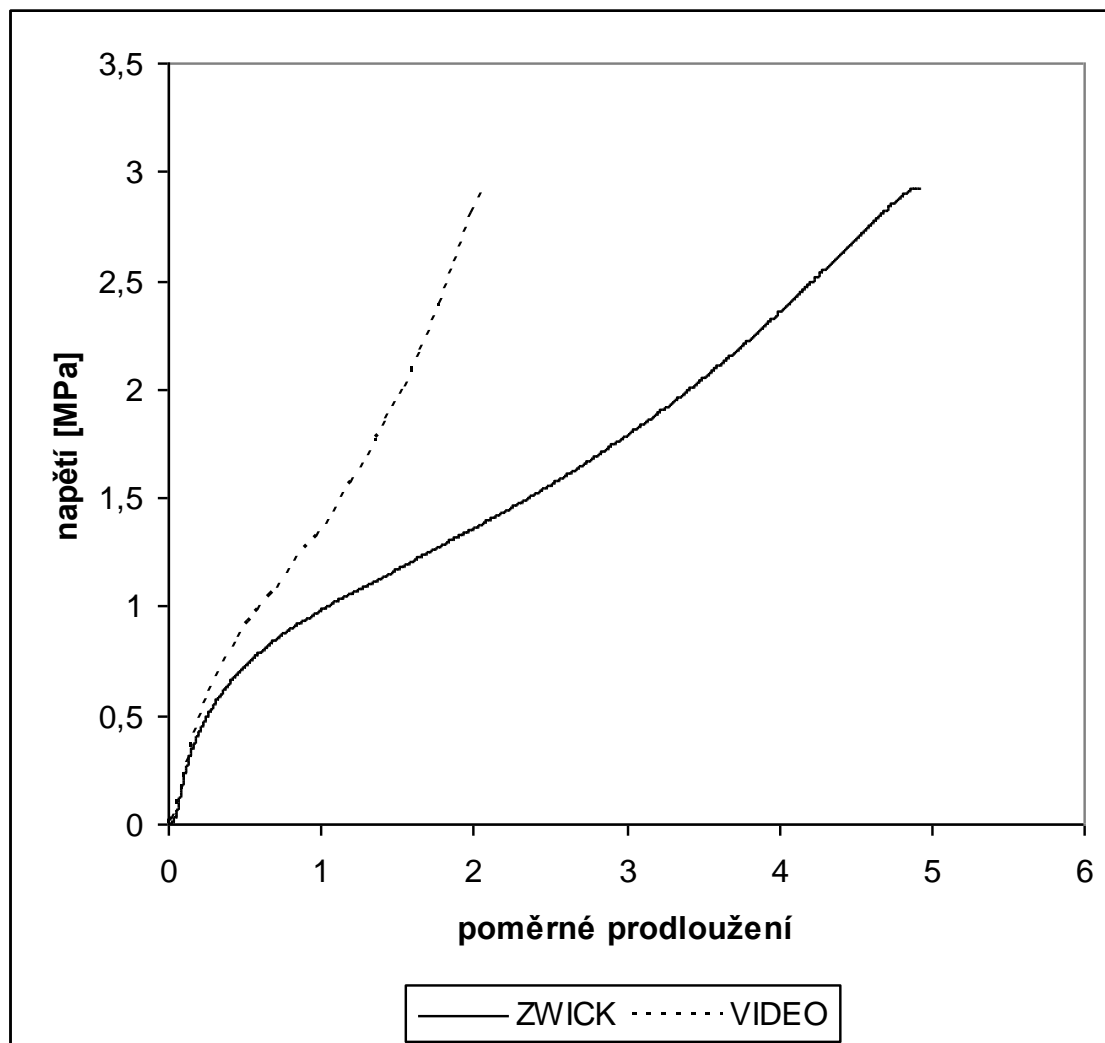
## PŘÍLOHA P 6: MATERIÁL Č. 6



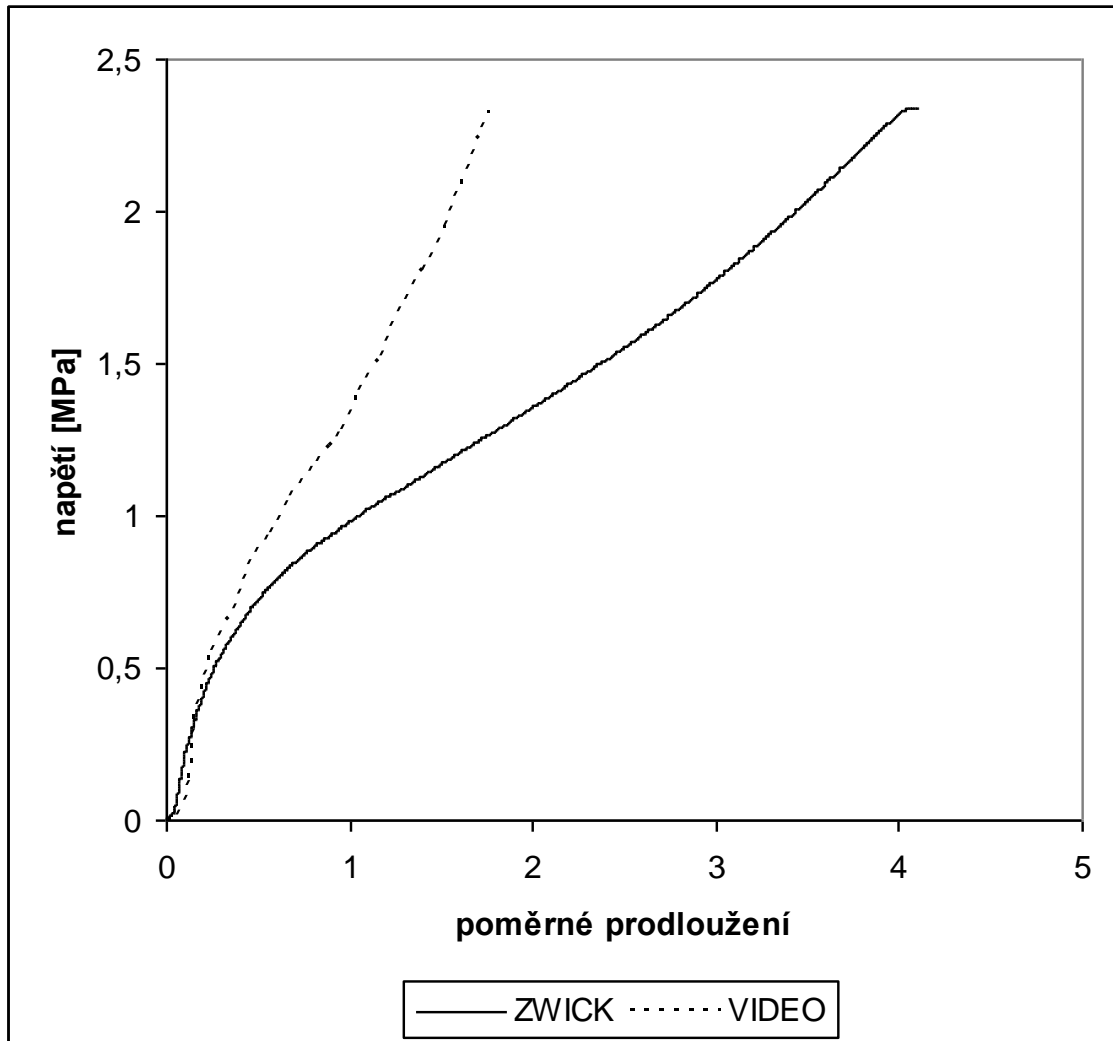
## PŘÍLOHA P 7: MATERIÁL Č. 7



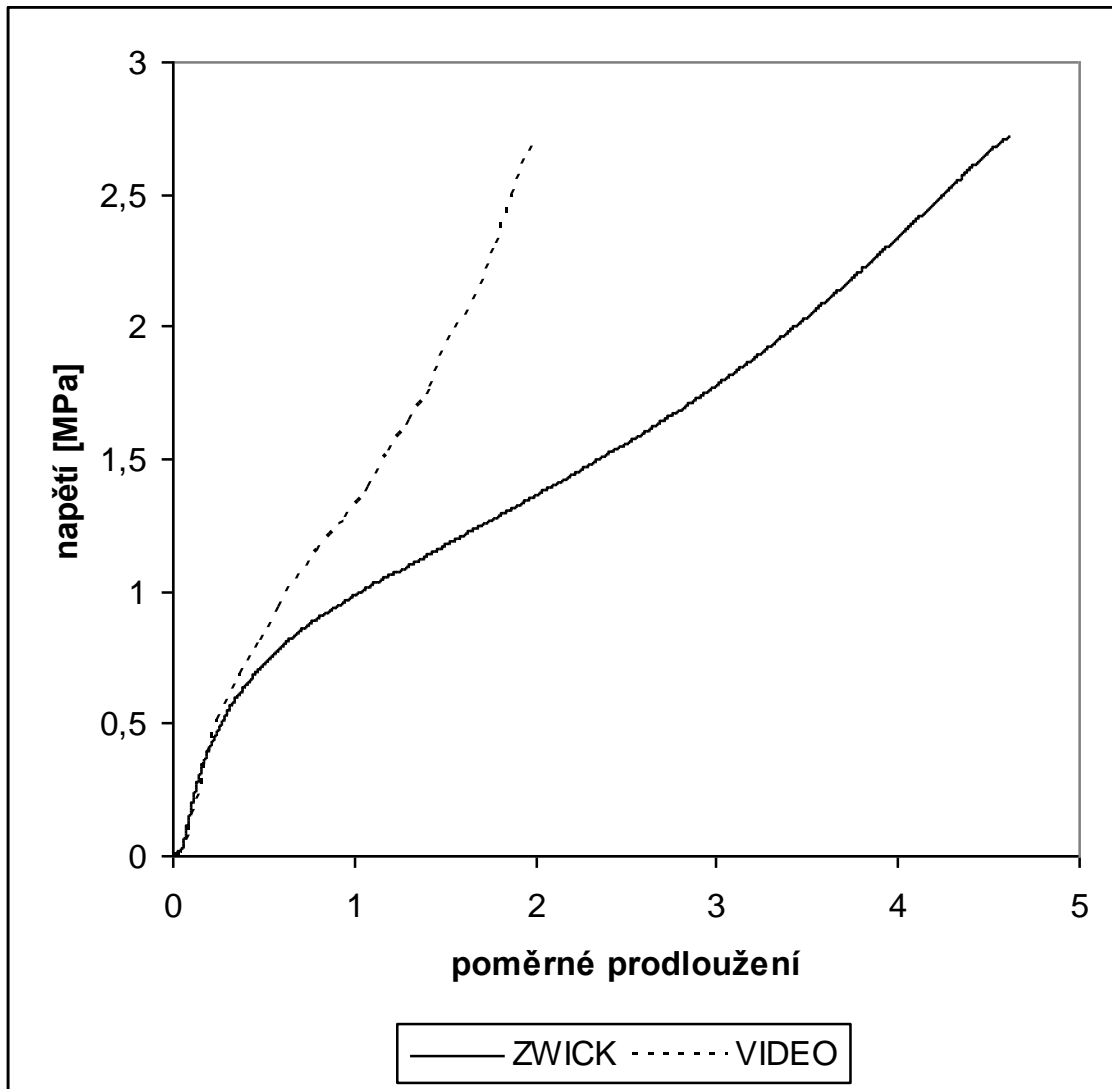
## PŘÍLOHA P 8: MATERIÁL Č. 8



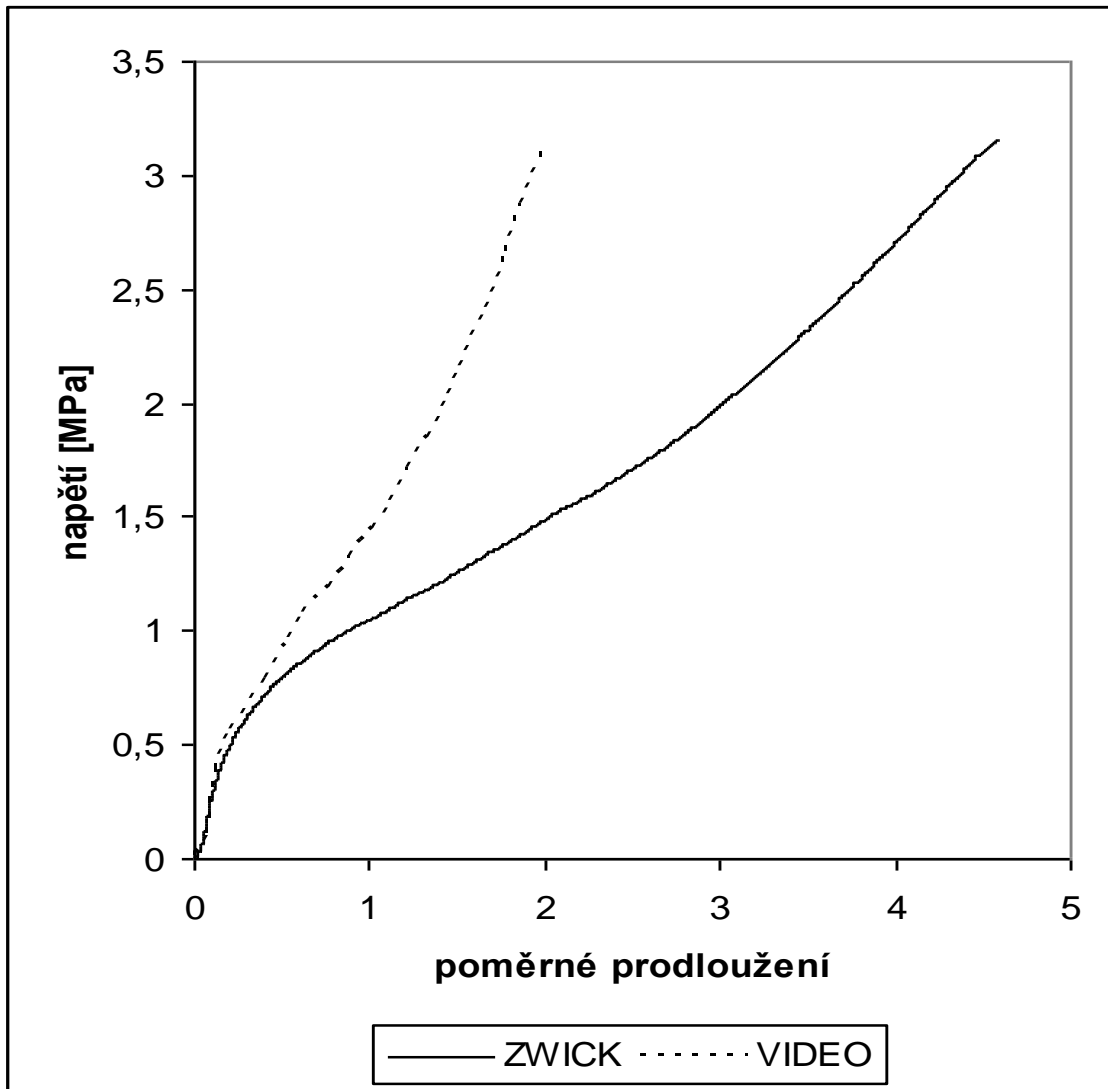
## PŘÍLOHA P 9: MATERIÁL Č. 9



## PŘÍLOHA P 10: MATERIÁL Č. 10

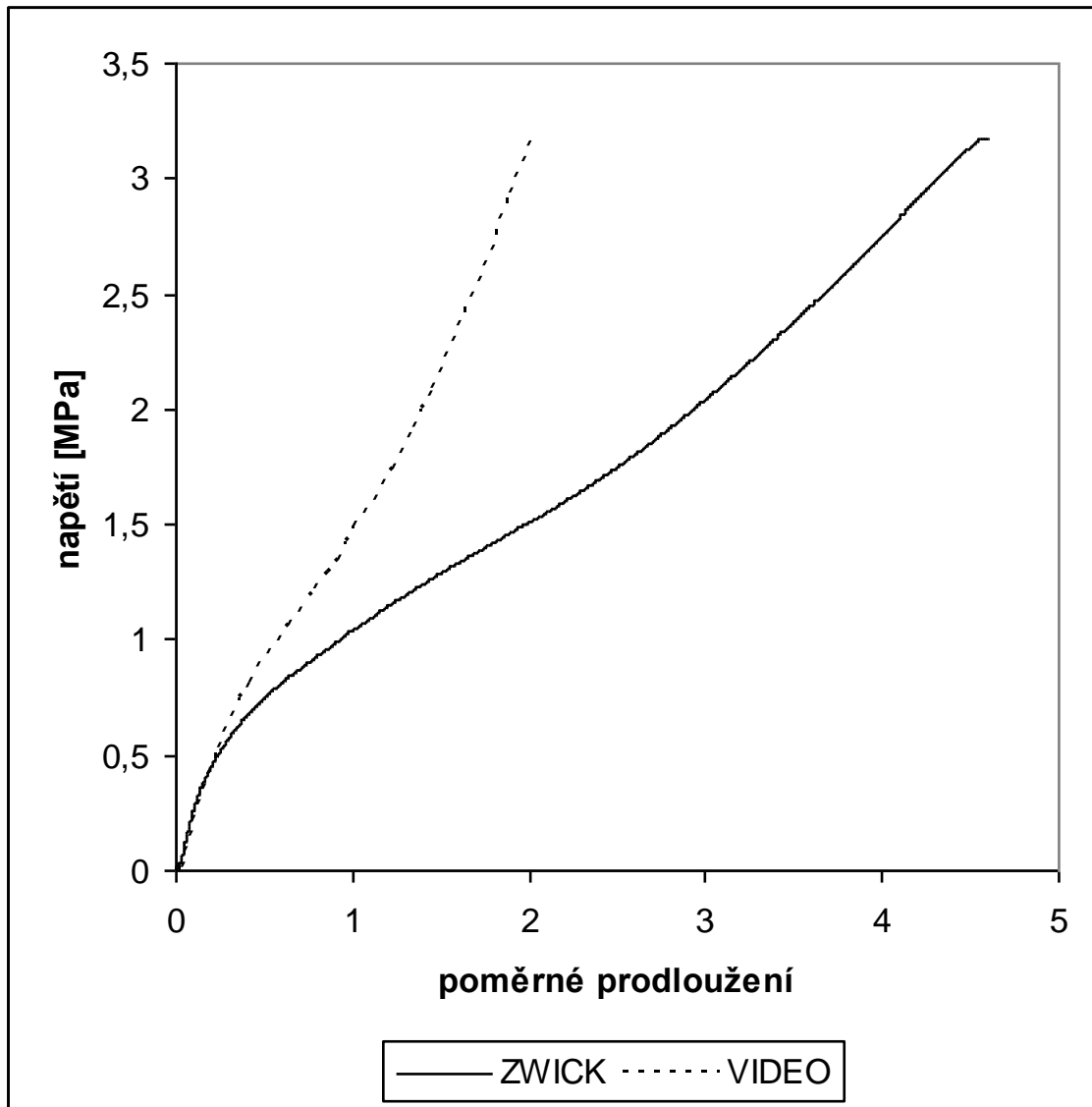


# PŘÍLOHA P 11: MATERIÁL Č. 11

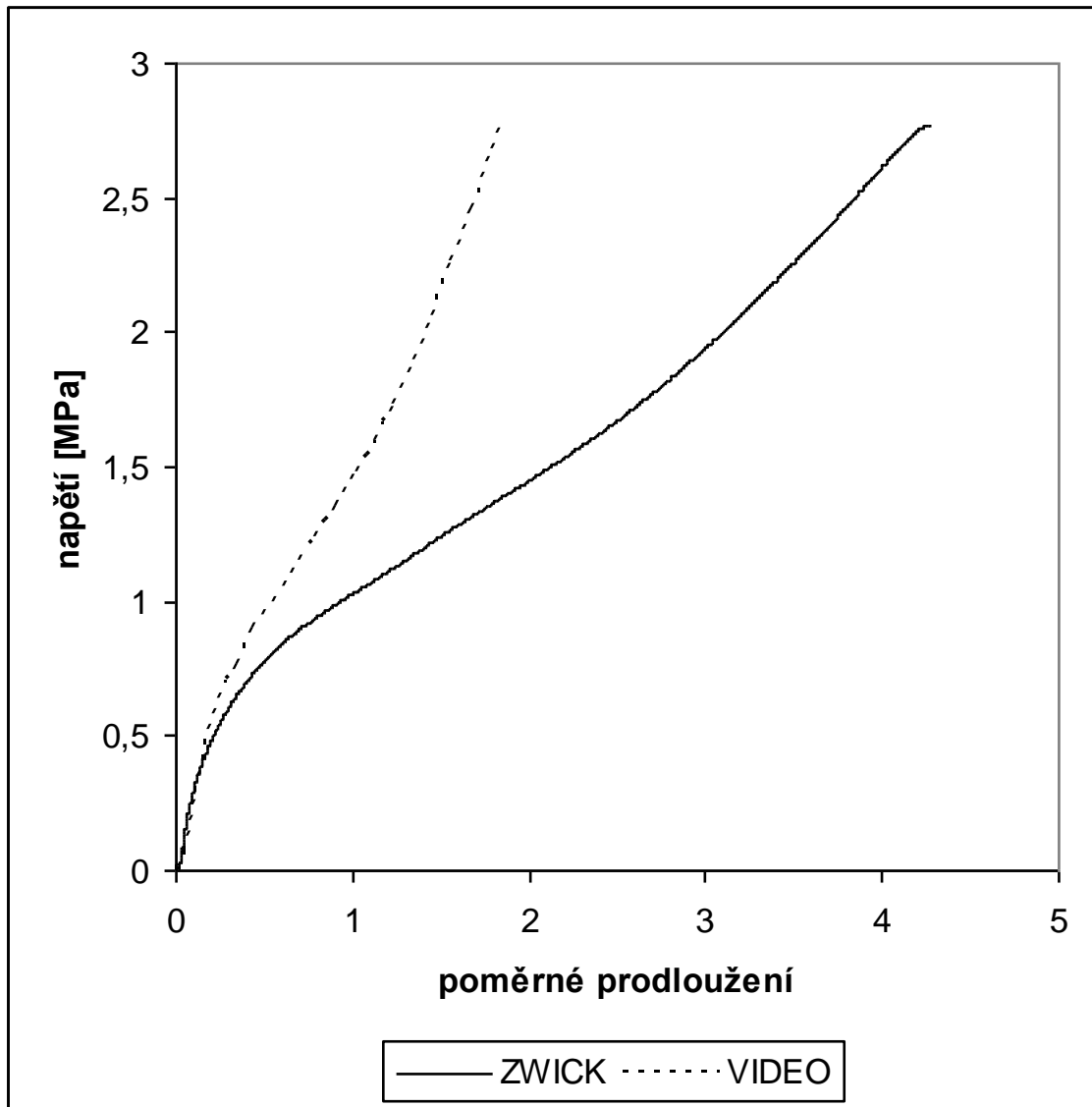




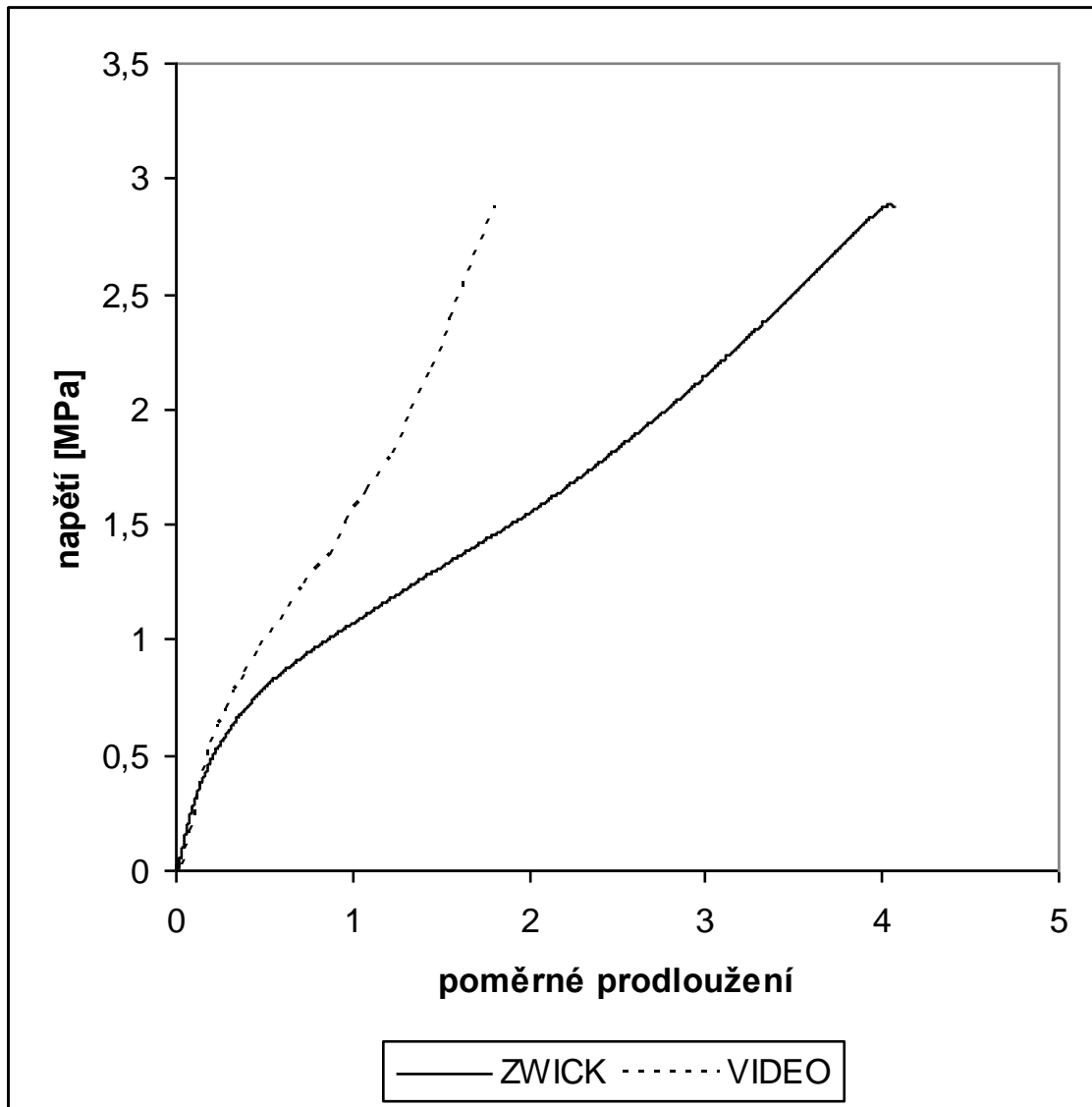
## PŘÍLOHA P 12: MATERIÁL Č. 12



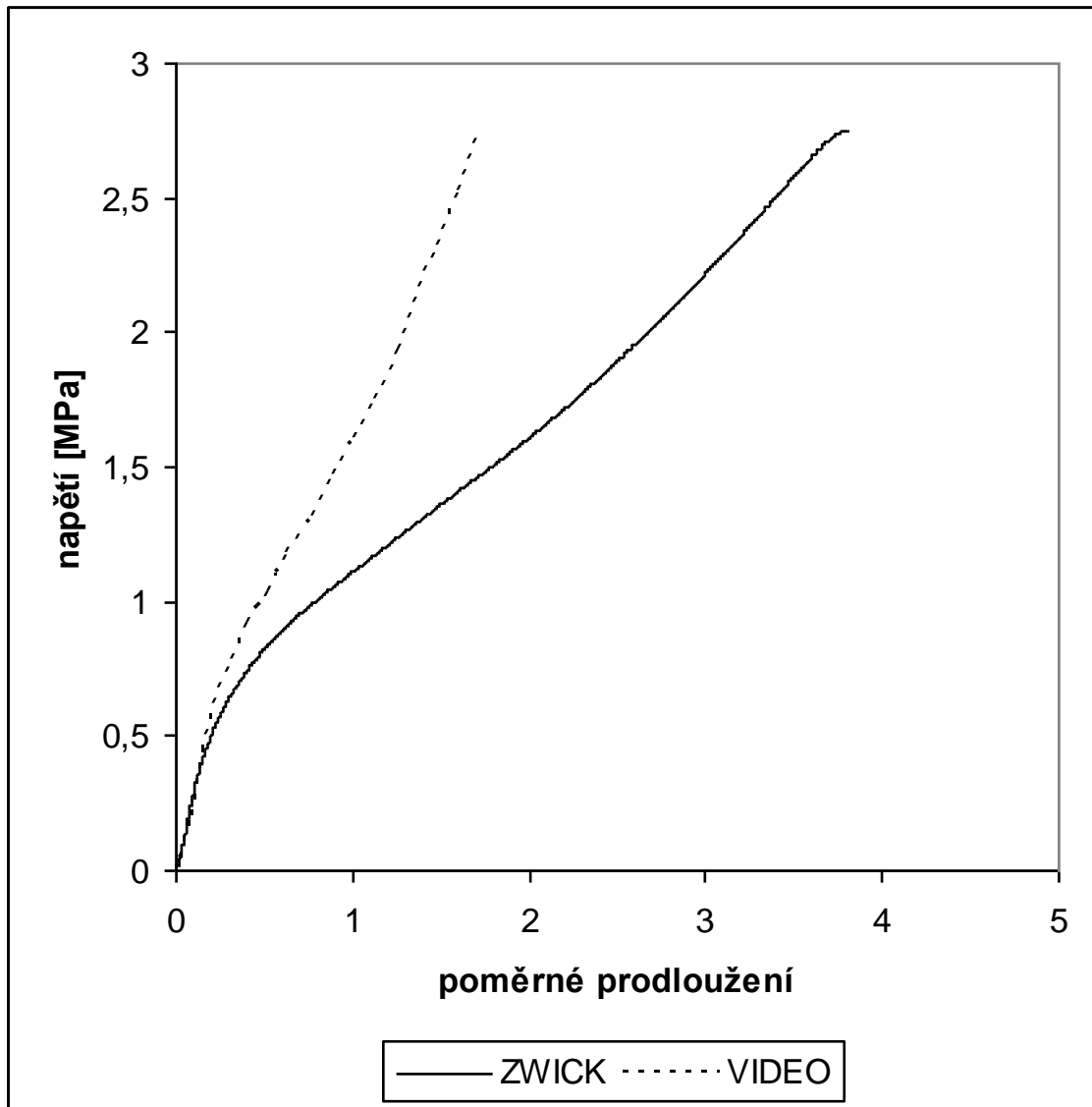
# PŘÍLOHA P 13: MATERIÁL Č. 13



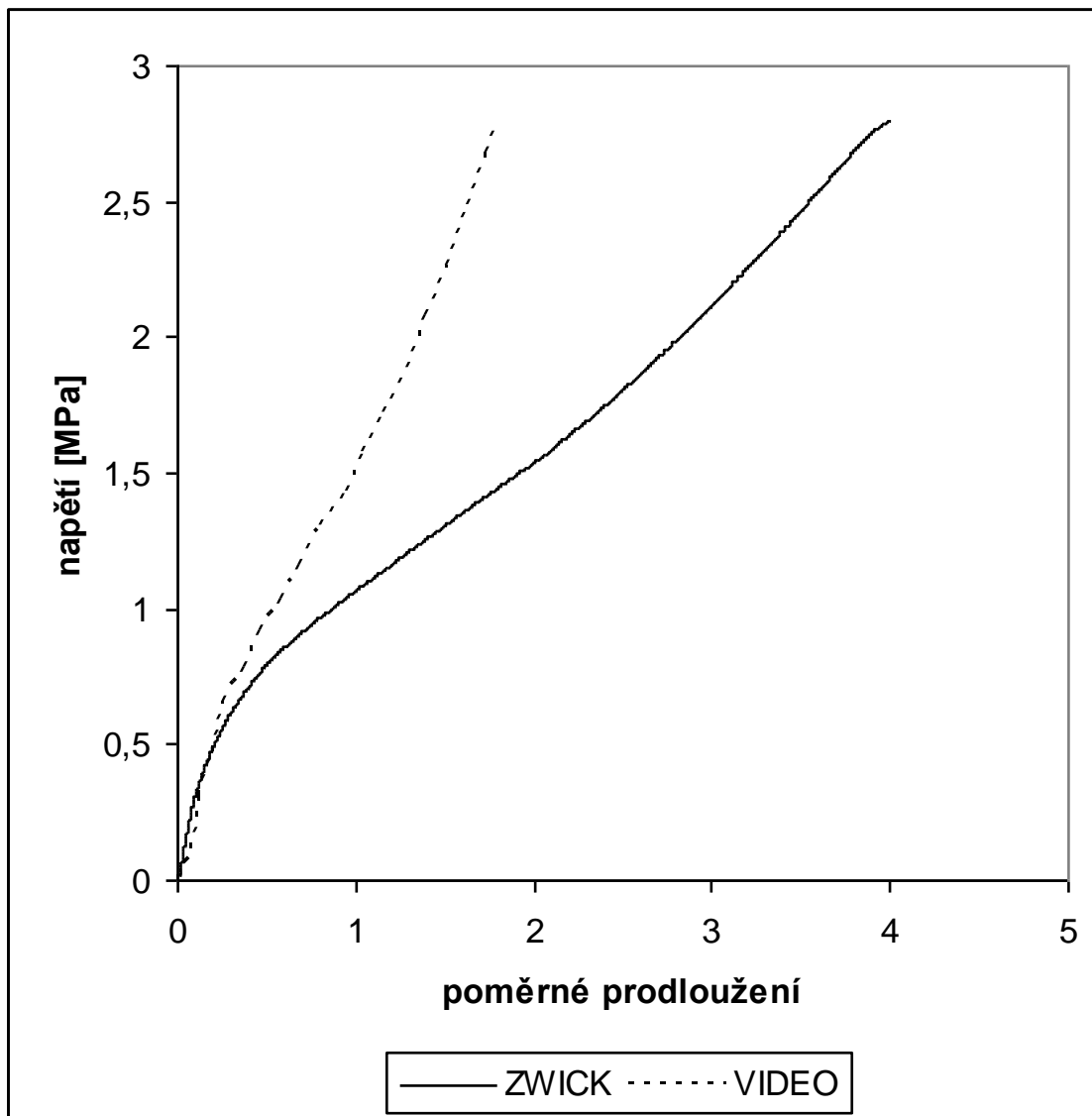
## PŘÍLOHA P 14: MATERIÁL Č. 14



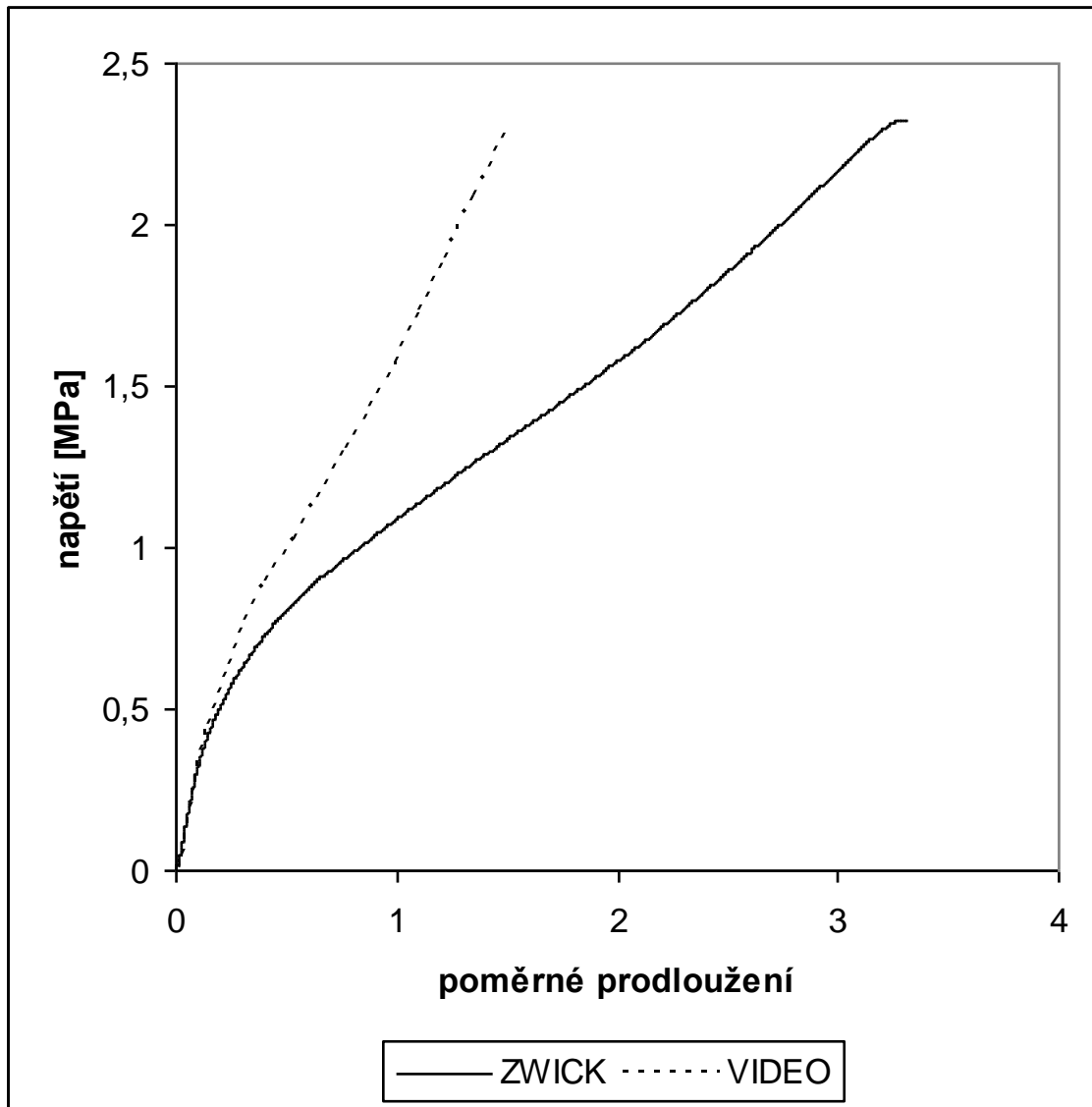
# PŘÍLOHA P 15: MATERIÁL Č. 15



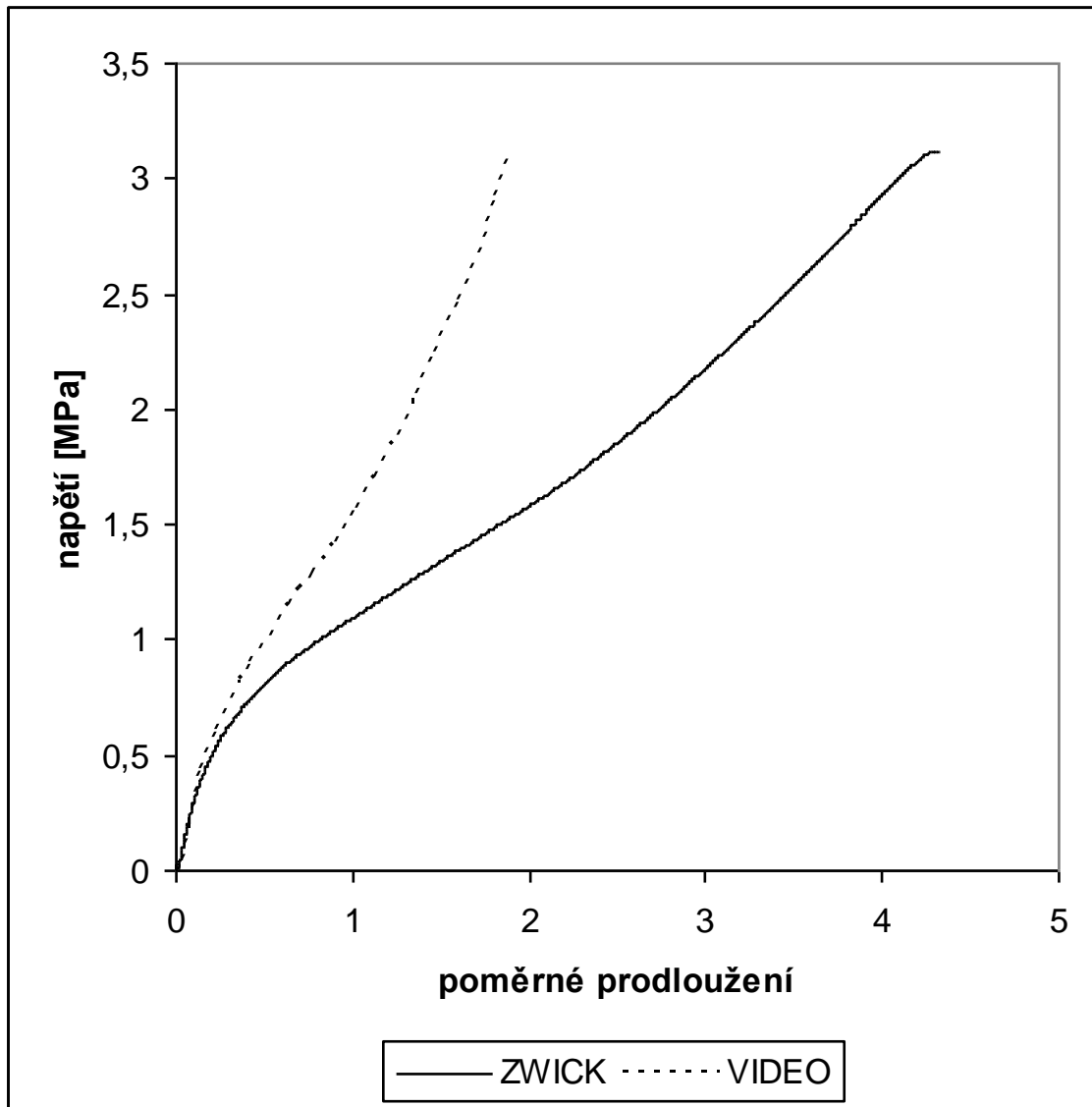
## PŘÍLOHA P 16: MATERIÁL Č. 16



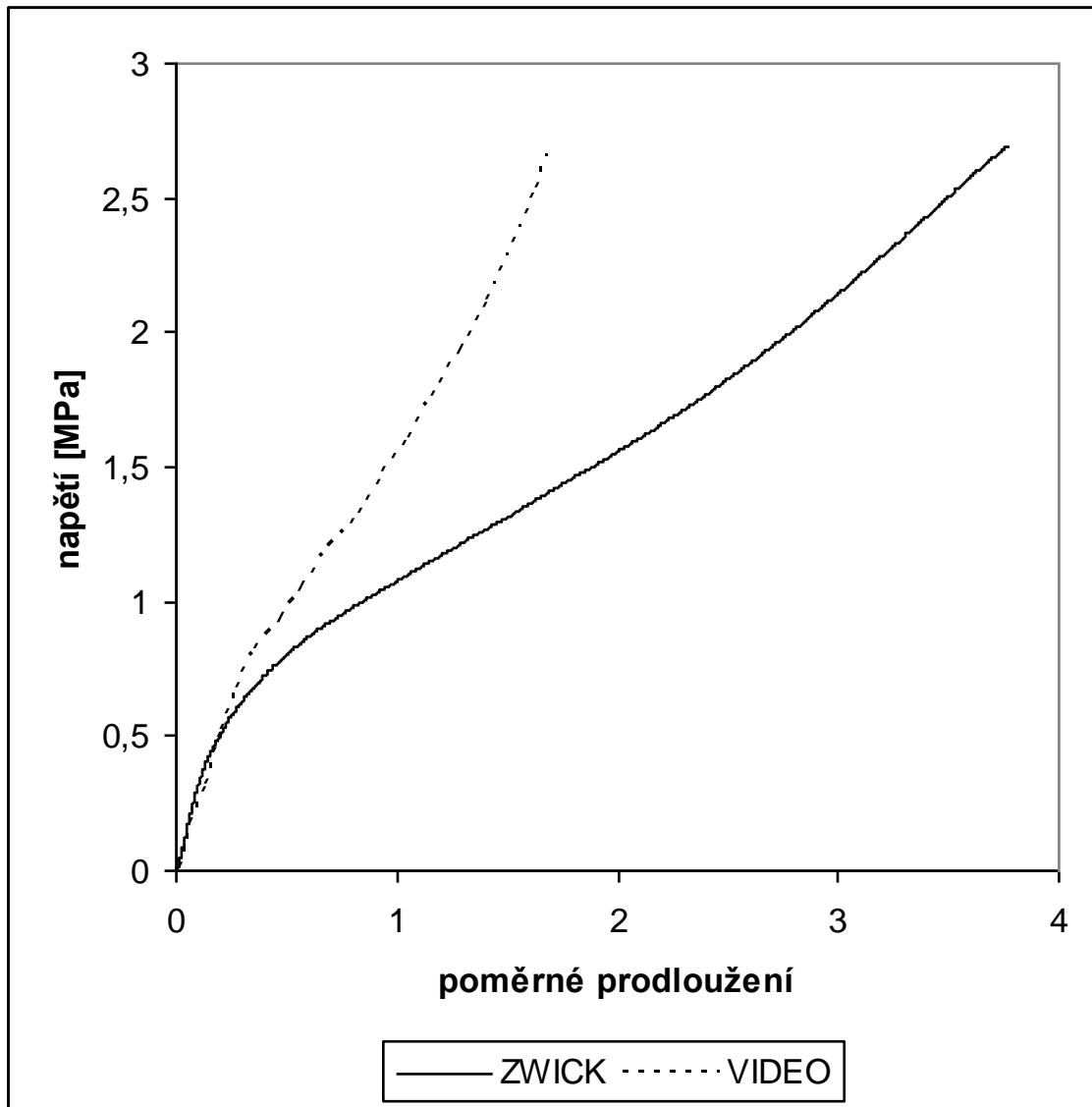
**PŘÍLOHA P 17: MATERIÁL Č. 17**



## PŘÍLOHA P 18: MATERIÁL Č. 18



**PŘÍLOHA P 19: MATERIÁL Č. 19**





## PŘÍLOHA P 20: MATERIÁL Č.20

