

# Optimalizace výroby flexibelu ve výrobě vulkanizačních forem

Bc. Zdeněk Minařík

---

Diplomová práce  
2018



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta technologická

---

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

akademický rok: 2017/2018

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Zdeněk Minařík**

Osobní číslo: **T16804**

Studijní program: **N3909 Procesní inženýrství**

Studijní obor: **Výrobní inženýrství**

Forma studia: **kombinovaná**

Téma práce: **Optimalizace výroby flexibelu ve výrobě vulkanizačních forem**

Zásady pro vypracování:

1. Teoretická rešerže na dané téma
2. Test kvality materiálů pro flexibel vulkanizačních forem
3. Nastavení podmínek a vazeb pro zvolený materiál
4. Vyhodnocení a sestavení grafů na dané téma
5. Diskuze výsledků a doporučení pro praxi

Rozsah diplomové práce:

Rozsah příloh:

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

**Dle doporučení vedoucího práce**

Vedoucí diplomové práce:

**Ing. Lubomír Beníček, Ph.D.**  
Ústav inženýrství polymerů

Datum zadání diplomové práce:

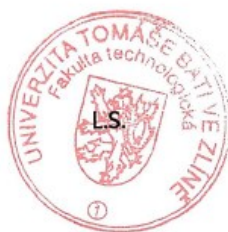
**2. ledna 2018**

Termín odevzdání diplomové práce:

**18. května 2018**

Ve Zlíně dne 4. května 2018

doc. Ing. František Buňka, Ph.D.  
*děkan*



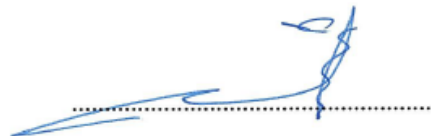
prof. Ing. Berenika Hausnerová, Ph.D.  
*ředitel ústavu*

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové/bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby <sup>1)</sup>;
- beru na vědomí, že diplomová/bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k nahlédnutí, že jeden výtisk diplomové/bakalářské práce bude uložen na příslušném ústavu Fakulty technologické UTB ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji diplomovou/bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3 <sup>2)</sup>;
- beru na vědomí, že podle § 60 <sup>3)</sup> odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 <sup>3)</sup> odst. 2 a 3 mohu užít své dílo – diplomovou/bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování diplomové/bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové/bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové/bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Ve Zlíně 15.5.2018



<sup>1)</sup> zákon č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, § 47 Zveřejňování závěrečných prací:

(1) Vysoká škola nevydělečně zveřejňuje disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce, u kterých proběhla obhajoba, včetně posudků oponentů a výsledku obhajoby prostřednictvím databáze kvalifikačních prací, kterou spravuje. Způsob zveřejnění stanoví vnitřní předpis vysoké školy.

(2) Disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce odevzdané uchazečem k obhajobě musí být též nejméně pět pracovních dnů před konáním obhajoby zveřejněny k nahlížení veřejnosti v místě určeném vnitřním předpisem vysoké školy nebo není-li tak určeno, v místě pracoviště vysoké školy, kde se má konat obhajoba práce. Každý si může ze zveřejněné práce pořizovat na své náklady výpisy, opisy nebo rozmnoženiny.

(3) Platí, že odevzdáním práce autor souhlasí se zveřejněním své práce podle tohoto zákona, bez ohledu na výsledek obhajoby.

<sup>2)</sup> zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 35 odst. 3:

(3) Do práva autorského také nezasahuje škola nebo školské či vzdělávací zařízení, užije-li nikoli za účelem přímého nebo nepřímého hospodářského nebo obchodního prospěchu k výuce nebo k vlastní potřebě dílo vytvořené žákem nebo studentem ke splnění školních nebo studijních povinností vyplývajících z jeho právního vztahu ke škole nebo školskému či vzdělávacího zařízení (školní dílo).

<sup>3)</sup> zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 60 Školní dílo:

(1) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení mají za obvyklých podmínek právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla (§ 35 odst. 3). Odpirá-li autor takového díla udělit svolení bez vážného důvodu, mohou se tyto osoby domáhat nahrazení chybějícího projevu jeho vůle u soudu. Ustanovení § 35 odst. 3 zůstává nedotčeno.

(2) Není-li sjednáno jinak, může autor školního díla své dílo užít či poskytnout jinému licenci, není-li to v rozporu s oprávněnými zájmy školy nebo školského či vzdělávacího zařízení.

(3) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení jsou oprávněny požadovat, aby jim autor školního díla z výdělku jím dosaženého v souvislosti s užitím díla či poskytnutím licence podle odstavce 2 přiměřeně přispěl na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložily, a to podle okolností až do jejich skutečné výše; přitom se přihlédne k výši výdělku dosaženého školou nebo školským či vzdělávacím zařízením z užití školního díla podle odstavce 1.

## **ABSTRAKT**

Cílem zpracované diplomové práce je testování a výběr nevhodnějšího materiálu pro výrobu pryžových forem nazvaných jako flexibel a jeho použití ve slévárenském procesu výroby segmentových vulkanizačních forem pro výrobu osobních pneumatik. Teoretická část se věnuje rozdělení polymerních materiálů se zaměřením na pryže, měření jejich vlastností a vytýčení cílů práce. V praktické části je popsána výroba forem, selekce vhodných materiálů, samotné testování vzorků a vyhodnocení výsledků.

Klíčová slova: eleastomery, pryžové formy, flexibel,

## **ABSTRACT**

The goal of this theses is to test and select the most suitable material for the production of rubber molds called flexibel and its use in the foundry process for production of segment vulcanization molds for the production of tires. The theoretical part deals with the distribution of polymer materials with a focus on rubbers, measuring their properties and setting goals of the thesis. The practical part describes mold production, selection of suitable materials, testing of samples with evaluation and discussion of results.

Keywords: elastomers rubber molds, flexibel,

Za důsledné vedení, odborné rady a podnětné připomínky děkuji vedoucímu práce panu Ing. Lubomíru Beníčkoví, Ph.D. Také za spolupráci na experimentální části děkuji panu Ing. Pavlu Bažantovi, Ph.D. V neposlední řadě patří poděkování celé rodině za podporu a trpělivost po dobu mého studia.

Prohlašuji, že odevzdaná verze bakalářské/diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

# OBSAH

<b>ÚVOD</b> .....	<b>10</b>
<b>I TEORETICKÁ ČÁST</b> .....	<b>11</b>
<b>1 MATERIÁLY VHODNÉ PRO VÝROBU FLEXIBELU</b> .....	<b>12</b>
1.1 ZÁKLADNÍ ROZDĚLENÍ POLYMERŮ .....	12
1.2 ELASTOMERY .....	12
1.2.1 Kaučuky .....	12
1.2.2 Syntetické kaučuky .....	13
1.3 SILIKONY .....	14
1.3.1 Silikonová pryskyřice.....	15
1.3.2 Silikonové oleje a tmely.....	15
1.4 SILIKONOVÝ KAUČUK.....	16
1.4.1 Zpracování silikonového kaučuku .....	16
1.4.2 Polykondenzace silikonové hmoty.....	16
1.4.3 Polyadice silikonové hmoty .....	17
1.5 POLYURETANY .....	17
1.6 TYPY PUR MATERIÁLŮ .....	18
1.6.1 Lehčené hmoty .....	18
1.6.2 Integrované pěny .....	18
1.6.3 Vlákná .....	19
1.6.4 Nátěrové hmoty.....	19
1.7 POLYURETANOVÝ ELASTOMER.....	19
<b>2 ZKOUŠENÍ MATERIÁLŮ</b> .....	<b>20</b>
2.1 VIZKOZITA .....	20
2.1.1 Vlastnosti viskozity .....	20
2.1.2 Dynamická viskozita .....	21
2.1.3 Kinematická viskozita .....	22
2.1.4 Newtonská kapalina .....	22
2.2 ZÁKLADNÍ PRINCIPY MĚŘENÍ VIZKOZITY .....	22
2.2.1 Rotační viskozimetry .....	23
2.2.2 Kapilární viskozimetry.....	24
2.2.3 Výtokový viskozimetr .....	24
2.2.4 Kuličkové viskozimetry .....	25
2.3 TVRDOST.....	27
2.4 METODA SHORE.....	27
2.4.1 Zkušební vzorky.....	28
2.4.2 Provedení zkoušky .....	28
2.4.3 Hodnoty tvrdosti.....	29
2.5 MĚŘENÍ SMRŠTĚNÍ.....	30
2.5.1 Souřadnicové měřicí stroje.....	31
2.5.2 3D skenery kontaktní .....	32
2.5.3 3D skenery bezkontaktní.....	34
<b>3 VÝROBA SEGMENTOVÝCH FOREM VE VFC</b> .....	<b>36</b>



3.1	VÝROBNÍ POSTUP SEGMENTOVÝCH FOREM.....	36
3.1.1	Výroba segmentů ve slévárně odlitků .....	38
3.1.2	Dokončení segmentů .....	39
3.1.3	Výroba bočnic a patních kruhů .....	39
<b>4</b>	<b>CÍLE PRÁCE .....</b>	<b>40</b>
<b>II</b>	<b>PRAKTICKÁ ČÁST .....</b>	<b>41</b>
<b>5</b>	<b>VÝROBA FLEXIBELU.....</b>	<b>42</b>
5.1	MODEL .....	42
5.2	SESTAVENÍ PŘÍPRAVKU .....	43
5.3	ZALÉVÁNÍ PRYŽOVOU SMĚSÍ .....	44
5.4	ODFORMOVÁNÍ FLEXIBELOVÉ FORMY .....	44
5.5	POŽADAVKY NA MATERIÁL .....	44
5.6	MATERIÁLY VYBRANÉ K TESTOVÁNÍ.....	45
<b>6</b>	<b>MĚŘENÍ POŽADOVANÝCH VLASTNOSTÍ .....</b>	<b>46</b>
6.1	TVRDOST.....	46
6.1.1	Metoda měření .....	46
6.1.2	Naměřené hodnoty .....	49
6.1.3	Vyhodnocení tvrdosti .....	51
6.2	VISKOZITA .....	53
6.2.1	Metoda měření .....	53
6.2.2	Naměřené hodnoty .....	55
6.2.3	Vyhodnocení viskozity a síťování.....	58
6.2.4	Vyhodnocení gelace .....	59
6.3	SMRŠTĚNÍ.....	60
6.3.1	Metoda měření .....	60
6.3.2	Naměřené hodnoty .....	65
6.3.3	Vyhodnocení smrštění .....	80
<b>7</b>	<b>DISKUZE K VÝSLEDKŮM.....</b>	<b>82</b>
	<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>84</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....</b>	<b>85</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....</b>	<b>88</b>
	<b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>	<b>90</b>
	<b>SEZNAM TABULEK.....</b>	<b>91</b>
	<b>SEZNAM PŘÍLOH.....</b>	<b>95</b>

## ÚVOD

Dnešní výrobní technologie si žádají mnohem větší mezioborovou symbiózu, za účelem dokonalejšího prolínání jednotlivých technologických oblastí. Spolupracovat je nutno napříč těmi obory kde lze úspěšně sdružovat tradiční procesy s novými s cílem dosáhnout dokonalého výrobku. Také nové možnosti v oblasti detekce materiálů a nástrojů, dovoluje neustálé zlepšování procesů a s tím jdou ruku v ruce požadavky na výrobek samotný. Tyto požadavky mohou být směřovány na vyšší kvalitu, ale také s ohledem na nové možnosti výroby, které mohou s úspěchem využívat designeři, konstruktéři a výrobní inženýři.

Výroba Forem Continental tak úspěšně realizuje požadavky na náročnější technologická vylepšení, neobvyklé tvary a doplňky, požadované na nových dezénech pneumatik. Soubor tradičních slévárenských postupů se prolíná s využitím nových technologií 3D tisku do výsledných geometricky náročných objektů, které jsou součástí vulkanizačních forem pro výrobu osobních pláštěů.

Aby bylo možno tyto výzvy akceptovat, je nutno hledat stále nové výhody a limity uvnitř výrobního procesu. To je hlavním důvodem, proč se ve své práci zabývám optimalizací výroby flexibelu, což je jeden z nejdůležitějších kroků při přenosu požadovaného tvaru modelu dezénu do sádrového jádra odlitku, pomocí formy pryžového otisku. Technologie přenášení tvarů tímto způsobem je poměrně konzervativní, proto zaměřuji své zkoumání na detekci materiálů a možnosti využití při znalosti jejich vlastností.

V teoretické části se zabývám rozdělením a výběrem vhodných materiálů pro potřeby dané výroby. Dále zde věnuji prostor pro možné způsoby zkoušení daných materiálů, se zaměřením na reologické otázky v oblasti viskozity, mechanické vlastnosti při detekci tvrdosti a možné geometrické změny materiálu i s ohledem na časovou přímku po zpracování.

Praktická část je rozdělena na představení společnosti, pro kterou je také práce vytvořena a některé detaily výroby a výrobku, což je segmentová vulkanizační forma pro výrobu osobních pneumatik. Dále se již práce soustředí na způsoby a rozsah měření, které je vždy doplněno vyhodnocením jednotlivých vlastností materiálů.

Cílem této diplomové práce je vyhodnotit testované materiály i jejich vlastnosti a na základě dosažených výsledků dále doporučit vhodnost těchto materiálů pro použití ve výrobě.

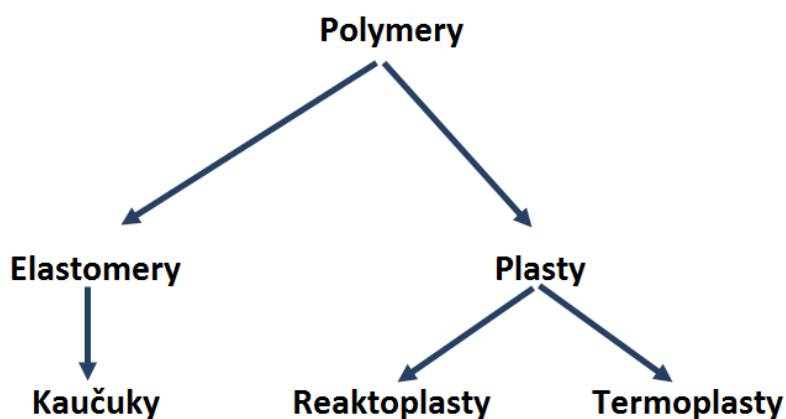
## **I. TEORETICKÁ ČÁST**

# 1 MATERIÁLY VHODNÉ PRO VÝROBU FLEXIBELU

## 1.1 Základní rozdělení polymerů

Polymery jsou chemické látky rozmanitých vlastností, obsahující na úrovni molekul většinou atomy uhlíku, vodíku, kyslíku, křemíku a často také dusíku, chloru případně jiných prvků. Polymery jsou ve formě výrobku převážně v tuhém stavu, ale ve stádiu zpracování, prochází fází pastovitou, téměř kapalnou, umožňujícím zpravidla za zvýšené teploty a tlaku, udělit požadovanému výrobku nejrůznější tvar, dle požadovaného použití. Polymery jsou děleny do dvou základních skupin polymerů, v tabulce 1. Skupiny plastů, která se dále rozpadá na reaktoplasty a termoplasty, další skupinou jsou elastomery. [1]

Tabulka 1 Polymery - základní rozdělení [2]



## 1.2 Elastomery

Jedná se o vysoce elastický polymer, který je možno malou silou deformovat bez porušení, i za běžných podmínek. Tato deformace je také vratná. Elastomery se dále dělí na přírodní či syntetické kaučuky, jako směs amorfních polymerů a dalších přísad kdy výsledné produkty jsou pryž, nebo guma. [2]

### 1.2.1 Kaučuky

Nejpočetnější podmnožinou elastomerů je kaučuk. Ten je znám ve dvou charakteristikách, a to přírodní a syntetické. [1]

Přírodní kaučuk je obsažen v podobě latexu v řadě rostlin. Hospodářsky je nejvýznamnější strom *Hevea brasiliensis* z čeledi Euphorbiace, původem z pralesů Jižní Ameriky z povodí řeky Amazonky. Odtud pocházel veškerý kaučuk, až do založení plantáží v Malajsii a na Srí Lance.

K výrobě syntetického kaučuku jsou použity monomery vyrobeny převážně z petrochemických surovin, poté následuje jejich polymerace. Dále je technologie pro mnohé kaučuky podobná, neboť mají formu vodné suspenze kaučukových částic – latexu.

Kaučuk se stává důležitou technickou surovinou až po objevení vulkanizace Charlesem Goodyearem v r. 1839. [1][3]

### 1.2.2 Syntetické kaučuky

Průmyslově vyráběné kaučuky zaznamenaly velký druhový rozptyl. Proto se přistoupilo na základní dělení dle kritérií použitého základního materiálu, jejich použití, či dosahovaných vlastností.

#### **Kaučuky pro všeobecné použití**

- Izoprenové kaučuky (IR)
- Butadienstyrenové kaučuky (SBR)
- Butadienové kaučuky (BR)
- Ethylenpropylenové kaučuky (EPM, EPDM)
- Butylkaučuky (IIR)

#### **Olejevzdorné kaučuky**

- Chloroprenové kaučuky
- Butadienakrylonitrilové kaučuky (NBR)
- Akrylátové kaučuky (ACM)
- Polysulfidové kaučuky (OT)

#### **Teplovzdorné kaučuky**

- Silikonové kaučuky (MQ, MVQ, MPVQ, MPQ)
- Fluorouhlíkové kaučuky (FPM, FKM, FFKM, CFM)

Jejich dlouhé názvy vedly k používání jejich zkratk, které primárně vychází z jejich chemických struktur, jejichž rozdělení je uvedeno v tabulce 2. [2]

Tabulka 2 Mezinárodní klasifikace kaučuků do základních skupin [3]

Označení skupiny	Chemická struktura makromolekulárního řetězce
M	Nasycený uhlovodíkový řetězec
R	Nenasycený uhlovodíkový řetězec
N	Řetězec obsahující atomy dusíku
O	Řetězec obsahující atomy kyslíku
Q	Řetězec obsahující siloxanové vazby (-Si-O-)
T	Řetězec obsahující atomy síry
U	Řetězec obsahující současně atomy dusíku a kyslíku
Z	Řetězec obsahující současně atomy fosforu a dusíku

Mezi materiály vhodné pro přenos tvaru modelu, použitelnosti a požadavkům na aplikaci, jsou silikonové a polyuretanové kaučuky. [1]

### 1.3 Silikony

Pod pojmem silikony  $(\text{OSiOR}_1\text{R}_2)_n$  jsou zpravidla zahrnuty všechny organokřemičité sloučeniny. Nejvýznamnější jsou látky, u nichž jsou křemíkové atomy spojovány s kyslíkovými atomy a zbylé valence jsou vázány na uhlovodíkové zbytky – polyorganosiloxany. Silikony jsou rozšířeny téměř do všech průmyslových oblastí. Je možno je používat jako nátěrové látky, ochranné prostředky, výrobu forem, nebo jako spojovací materiály.

Podle průměrné molekulové hmotnosti (délky řetězce) mohou být silikonové polymery připraveny v těchto formách produktu.

- Silikonové pryskyřice
- Silikonové tmely
- Silikonové kaučuky
- Silikonové oleje

### Silikony se obecně vyznačují

- Výbornou odolností proti vyšším teplotám
- Skvělé výsledky mají mezi elektroizolačními materiály
- Mají malou závislost fyzikálních veličin na teplotě
- Velmi nízkým povrchovým napětím
- Chemickou a fyziologickou indiferentností [4]

#### 1.3.1 Silikonová pryskyřice

Silikonové pryskyřice jsou připravovány z chemického hlediska na bázi polymethylsiloxanu s reaktivními skupinami makromolekul, obvykle hydroxylovými. Jsou dodávány ve formě roztoku v toluenu o koncentraci 50 % až 70 %. K dokončení kondenzačních reakcí do vzniku zesíťované makromolekuly dochází teprve po odpaření rozpouštědla a zahřívání na teplotu 220 °C až 240 °C po dobu 1 až 5 hodin. Tato poměrně dlouhá vypalovací doba lze zkrátit přidáním určených kovových solí.

Vytvrzené silikonové pryskyřice, velmi dobře odolávají povětrnostním účinkům, mají vysokou tepelnou odolnost, skvělé elektroizolační vlastnosti, které se s teplotou mění jen minimálně. [1]

#### 1.3.2 Silikonové oleje a tmely

Čistý dimethyldichlorsilan, který se hydrolyzuje s okyselenou vodou, je potřeba pro přípravu silikonových olejů a tmelů. Jako terminační složku lze přidat trimethylchlorsilan, který zde funguje jako regulátor molekulové hmotnosti a viskozity.

Silikonové oleje jsou bezbarvé, vodojasné a neutrální a jsou skvěle použitelné jako maziva, neboť i při různých teplotách zůstává jejich viskozita prakticky neměnná. Jelikož jsou vodo-odpudivé, je jedním z jejich hlavních využití jako ochranná látka použita na zdi či textilie, nebo také na kůži. [5]

## 1.4 Silikonový kaučuk

Silikonový kaučuk je jeden z nejmladších z hlavních výrobků organokřemičité chemie, jejichž rozvoj nastal až v polovině 20. let. Díky jeho mechanickým vlastnostem, schopnosti odolávat velkým teplotním rozdílům, a jednoduchému zpracování, se jedná o často používané kaučukové adiční materiály. Poskytuje široký sortiment technicky významných materiálů, jako silikonové oleje, silikonové emulze, pryskyřice, vazelíny, nátěrové hmoty, odpěňovače, laky, lubrikační činidla, tuky, elektroizolační materiály, hydrofobační prostředky a různé typy silikonových kaučuků včetně licích a tmelových typů, vulkanizujících za normální teploty. [4]

### 1.4.1 Zpracování silikonového kaučuku

Při přípravě silikonového kaučuku je vycházeno z čistých cyklických siloxanů připravených hydrolýzou dimethyldichlorsilanu ve zředěném roztoku. Tento roztok je tvořen hexamethylcyclotrisiloxanu a oktamethylcyclotetrasiloxanu. Ze vzniklých meziproduktů, se kaučukovité lineární polymery připravují alkalickou nebo kyselou polymerací. [5]

### 1.4.2 Polykondenzace silikonové hmoty

Polykondenzace je sled stejně se opakujících reakcí funkčních skupin výchozích látek. Aby mohlo dojít ke vzniku polymeru, je nutno mít výchozí sloučeniny s potřebným počtem funkčních skupin v každé molekule minimálně dvě vzájemně reagující komponenty. Polykondenzace je tedy reakce, při níž vzniká polymer ze dvou nízkomolekulárních látek, nějaká jiná látka jako vedlejší produkt. Většinou se jedná o vodu nebo alkohol. [6]

Siloxanový řetězec, je chemickým základem polykondenzačních silikonových hmot, kde dle pravidelného cyklu se střídají atomy Si a O. Na čtyřvázný křemík jsou obvykle vázány metylové skupiny  $\text{CH}_3$ . Řetězec, který je oboustranně ukončen vysoce aktivními skupinami -OH. Kombinací anorganického řetězce s organickými skupinami jsou zajištěny vlastnosti otiskovací hmoty. První zajišťují stálost, druhé plasticitu.

K vulkanizaci (zesíťování) za pomoci skupin OH, jsou použity estery kyseliny křemičité. Pro urychlení reakce hmoty je možno použít přidání organických sloučenin, například sloučeniny cínu. [7]

Při vytvrzení polykondenzačních silikonů vzniká vedlejší produkt- alkohol nebo voda, v závislosti na druhu silikonového monomeru. Vedlejší produkt se během vulkanizace odpařuje.



Celý proces polykondenzace probíhá při pokojové teplotě 20°C, kde je nutno udržovat relativní vlhkost vzduchu 50 %.

Silikony se dají poměrně dobře barvit pomocí pigmentových barev, což jsou homogenní směsi silikonových olejů a pigmentů. Základní materiál je však v barvě bílé a barevné rozlišení výrobci používají pro rozlišení vlastností materiálu, nebo podle způsobu použití. [7]

### 1.4.3 Polyadice silikonové hmoty

V 70. letech minulého století, se začaly používat polyadiční silikonové hmoty. Jejich poměrně jednoduchá výroba a skvělé finální vlastnosti materiálu, měly za následek různorodá použití v průmyslu, stavebnictví, lékařství ale i v domácnosti. Na rozdíl od polykondenzační reakce, se při polyadici neuvolňují žádné vedlejší produkty a smrštění materiálu je minimální. Samotná reakce je umožněna katalyzátory, ve kterých jsou obsaženy kovy jako platina či paladium. [1]

Polymerace jako pojem má ještě jedno vysvětlení. U řetězových polymerací je často uváděno, že monomer, jako nenasycená nebo cyklická sloučenina, se v propagační reakci naduje na růstové centrum. Několikanásobné opakování růstového kroku vyžadovaného pro růst molekul, by mohlo být formálně označeno jako polyadice. Termín polyadice, je ale vyhrazen pouze polyreakcím, v nichž vznikají stabilní izolované meziprodukty a podléhají zákonitostem typickým pro stupňovitou polyreakcí. [4]

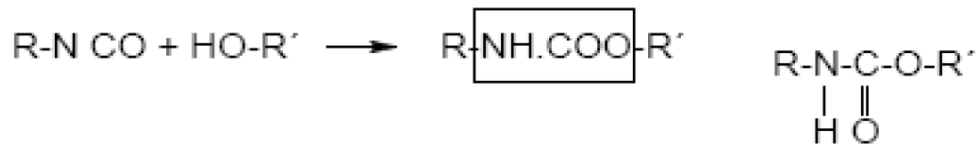
## 1.5 Polyuretany

Polyuretany (PUR) patří mezi nejvíce používané polymery na světě. Se svou širokou variabilitou tak využívají svou použitelnost ve výrobních oblastech, ale také v rozsahu využití u hotových výrobků.

Kolébkou výroby polyuretanu se ještě před 2. světovou válkou, stal tým pracovníků okolo Dr. Oto Bayera v německém Leverkusenu. Patentová evidence materiálu je z roku 1937, avšak až po roce 1952 můžeme datovat aplikační rozvoj, v čele s americkou firmou MoBay Chemical Corporation a jejím zakladatelem O. Bayerem. Zde díky rozvoji nových typů polyolů na bázi polyesterů, pomohl zařadit polyuretan do velkého portfolia systémů.

Pod pojmem polyuretany chápeme skupinu polymerů, vzniklých reakcí vícefunkčních isokyanátů s polyalkoholy definovatelné v rovnici 1. Prvotními surovinami pro výrobu polyuretanů jsou polyisokyanáty, polyoly, extendery a katalyzátory. [5]

Rovnice 1 Chemická rovnice Polyuretanu



Základem syntézy polyuretanů je adice diisokyanátů na dvoj, nebo vícefunkční alkoholy za vzniku karbamátové (uretanové) vazby. Isokyanáty velice snadno reagují se všemi sloučeninami vodíku, například vodou, alkoholy, fenoly, aminy, karboxylovými kyselinami, thioley a dalšími. Hlavní růstová reakce je doprovázena řadou vedlejších reakcí. Polyuretany ke své výrobě používají reakci vícefunkčních izokyanátů s alkoholy, uretany čili estery kyseliny karbanové. [5]

## 1.6 Typy PUR materiálů

Polyuretan je dobře řízený materiál, který takto dovoluje vznik zcela rozdílných typů, pouze změnou chemického složení, případně rozdílným množstvím chemických látek.

### 1.6.1 Lehčené hmoty

U lehčených hmot dále ještě dělíme materiály na měkké, polotvrdé a tvrdé a to v závislosti na použití plnicích látek a technologii výroby. Přípravují se jako homogenní kapalina, která po zamíchání se všemi látky ve zpěňovacím stroji, nalije do formy a napění pomocí vzniklého CO<sub>2</sub>.

### 1.6.2 Integrální pěny

Také u integrálních pěn dělíme produkty na měkké a tvrdé. U těchto typů pěn však nadouvadlo tvoří lehčené jádro a hustota materiálu se ze vzdáleností od jádra zvyšuje. V závislosti na teplotním rozdílu mezi teplotou vnitřku pěny a teplotou formy, dochází k rozdělení pórů, což způsobuje rozdíl tvrdosti povrchu bublin a následnému rozdělení na měkké a tvrdé PUR pěny. [7]

### 1.6.3 Vlákna

Polyuretanová vlákna se vyrábí roztokovou polymerací, pomocí přehřátého diolu, k němuž se přidává diisokyanát. Při této exotermické reakci vystoupá teplota okolo 200 °C přičemž se zahájí polymerační reakce. Takto vytvořený produkt se vytlačuje jako pásek či vlákno.

### 1.6.4 Nátěrové hmoty

V současnosti je na trhu mnoho polyuretanových pojiv pro nátěrové hmoty. Základní rozdělení je na jednosložkové a dvousložkové.

Jednosložková pojiva sestávají z předpolymerů terminovaných izokyanátovými skupinami. Při reakci se vzdušnou vlhkostí, nebo s vlhkostí podkladu, dochází k vytvrzování, neboť voda zde působí jako tetrafunkční činidlo. Pro vypalovací laky se používají maskované izokyanáty, které síťují s polyhydroxysloučeninami nad 150 °C. Při zahřívání se štěpí fenylurethan, vzniklý isokyanát ihned reaguje s polyhydroxysloučeninou a oddělený fenol vytéká. Lakování elektrických vodičů, je nejznámější aplikací výrobků z jednosložkových vypalovacích laků.

Pro dvousložkové laky se používají hlavně vícemolekulární, netěkavé izokyanáty. Jednou složkou laku je roztok vybraného netěkavého isokyanátu a druhou roztok rozvětveného polyesteru nebo polyetheru s volnými hydroxylovými skupinami. Pro vázání potřebné vlhkosti se používá přídavek suspenze zeolitu. [5]

## 1.7 Polyuretanový elastomer

Polyuretanové elastomery získáváme z předpolymeru obsahujícího koncové skupiny –NCO, který je připraven při teplotách 100 – 120 °C smícháním dvojfunkčního isokyanátu v přebytku s lineárním polyesterem nebo polyetherem s koncovými skupinami –OH.

Ve druhém reakčním stupni se pro prodloužení řetězce přidávají nízkomolekulární sloučeniny, při stejné teplotě reagující se skupinami –NCO. Ve třetím stupni se při následném zahřívání zahájí síťování. Konečné řídké zesíťování vzniká po nalití evakuací odplyněné hmoty do forem, po dobu 4 až 24 hodin při 100 °C. Polyuretanové kaučuky lze připravit s různou tvrdostí a vysokou protažitelností. Tyto kaučuky se vyznačují vynikající elasticitou a skvělou odolností proti opotřebení, na rozdíl od ostatních elastomerů. Úspěšně jsou použitelné jako různá těsnění, membrány, rozvodové řemeny, ale také pro výrobu podešví. [7]

## 2 ZKOUŠENÍ MATERIÁLŮ

Výběr materiálu pro výrobu různých součástí je založen na znalosti mechanických, technologických, fyzikálních i chemických vlastností materiálu. Stejně tak jsou důležité chování materiálu při přípravě a zpracování materiálu. U polymerů se tomuto věnuje reologie, což je vědní obor zabývající se deformací a tokem.

### 2.1 Viskozita

Při zpracování polymerních materiálů, jejich roztoků či vodných disperzí, má velmi důležitou úlohu jejich schopnost reagovat na usměrněné napětí, jež vyvolává přeskupování molekul, tedy jejich tok. Tyto tokové vlastnosti, které jsou důležité pro tváření a zpracování většiny polymerů, primárně rozhodují o dokonalém přenesení nového tvaru, ale také s ohledem na podmínky zpracování, ovlivňují fyzikálně-mechanické vlastnosti konečných výrobků. Tok jako viskózní deformace je charakterizován tím, že při působení napětí se deformace stále zvětšuje, přičemž rychlost, se kterou deformace roste, je úměrná působícímu napětí. Viskozita tedy určuje míru vnitřního odporu materiálu, vůči vnějšímu zatížení jako odpor proti toku. Podle druhu zatížení můžeme rozlišovat viskozitu elongační a smykovou.

#### 2.1.1 Vlastnosti viskozity

Podle způsobu měření rozlišujeme mezi dynamickou a kinematickou viskozitou, jež jsou na sobě také vzájemně závislé. [1][8]

Tabulka 3 Dynamická viskozita vybraných materiálů [9]

Látka	$\eta$ [mPa s]
vzduch, plyny	0,01 – 0,02
benzín	0,65
voda	1
rtuť	1,5
motorové oleje	150 - 400
mazací oleje	300 - 800
glycerín	1 500
licí kaučuky	10 000 - 20 000
pasty, tmely	500000
asfalt	1000000

### 2.1.2 Dynamická viskozita

Viskozita kapaliny ve smyku mezi dvěma rovnoběžnými deskami, z nichž se jedna vzhledem k druhé pohybuje ve své rovině rovnoměrným pohybem, je definována Newtonovou rovnicí:

*Rovnice 2 Viskozita Newtonovou rovnicí*

$$\frac{du}{dx}$$

$\tau$  ... smykové napětí [Pa]

$\eta$  ... dynamická viskozita [Pa.s]

$g$  ... rychlostní gradient neboli rychlost smykové deformace [ $s^{-1}$ ]

$u$  rychlost pohybu jedné roviny vzhledem ke druhé rovině

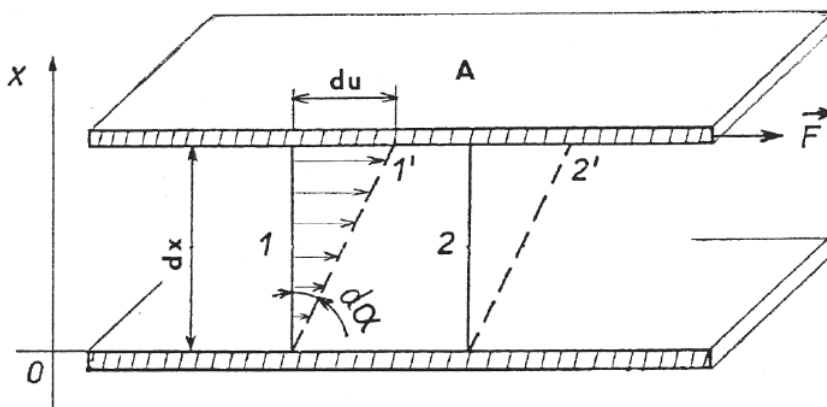
$x$  je souřadnice kolmá k těmto rovinám

Rozměr viskozity plynoucí z Newtonova zákona je Pa.s a její násobná jednotka mPa.s (dříve se používala jednotky Poise).

$$1 \text{ Pa s} = 1 \text{ N s m}^{-2} = 1 \text{ kg s}^{-1} \text{ m}^{-1}$$

$$1 \text{ P} = 100 \text{ cP}$$

$$1 \text{ cP} = 0,1 \text{ Pa s} = 100 \text{ mPa s}$$



Obrázek 1 Rychlostní profil toku v kapalině mezi nepohyblivou a pohybující se deskou [8]

### 2.1.3 Kinematická viskozita

Podíl dynamické viskozity a hustoty měřené kapaliny definuje kinematickou viskozitu, jejíž rozměrem je  $\text{m}^2\text{s}^{-1}$ . Výhodné je však používání násobných jednotek  $\text{cm}^2\text{s}^{-1}$  nebo  $\text{mm}^2\text{s}^{-1}$ , které odpovídají užívaným jednotkám St (Stokes), případně cSt. [8][9]

### 2.1.4 Newtonská kapalina

Newtonskou kapalinou je látka, jejíž smyková rychlost je přímo úměrná smykovému napětí a jejíž viskozita tak nezávisí na úrovni smykové rychlosti, ani na čase působení smykového napětí. Pro tyto kapaliny je viskozity nezávislou látkovou konstantou.

Polymerní systémy se však většinou nepodřizují jednoduchému Newtonovu zákonu. Jejich chování je tedy neneutonské a závislost napětí na rychlosti smykové deformace tak není lineární a většinou se vyjadřuje vztahem uvedeným v rovnici 2.

*Rovnice 3 Newtonské závislosti chování*

$$\tau = \eta \cdot \dot{\gamma}^n$$

$$\eta = K \cdot \dot{\gamma}^{n-1}$$

$$\tau = \tau_0 + \eta \cdot \dot{\gamma}$$

**K** ... koeficient úměrnosti (konzistence)

**n** ... exponent vyjadřující stupeň odklonu tokové křivky

$\tau = f(\dot{\gamma})$  od ideálního, newtonského průběhu

**$\tau_0$**  ... prahové smykové napětí (mez toku), při kterém se začne projevovat trvalá (plastická) deformace [10]

## 2.2 Základní principy měření viskozity

Ke stanovení viskozity, nebo průběhu tokové křivky, je nutno nadefinovat hodnoty veličin smykového napětí  $\tau$  a smykové rychlosti **D**. Jelikož nejsou tyto reologické veličiny měřitelné, je nutno zajistit přesně definovanou geometrii měřícího systému. Kvantitativnímu sta-

novení hodnot se hodí pouze principy, které zajišťují laminární tok kapaliny. Nejčastěji využívané přístroje, využívají k vyhodnocení viskozity a tokových křivek, tyto zvolené principy:

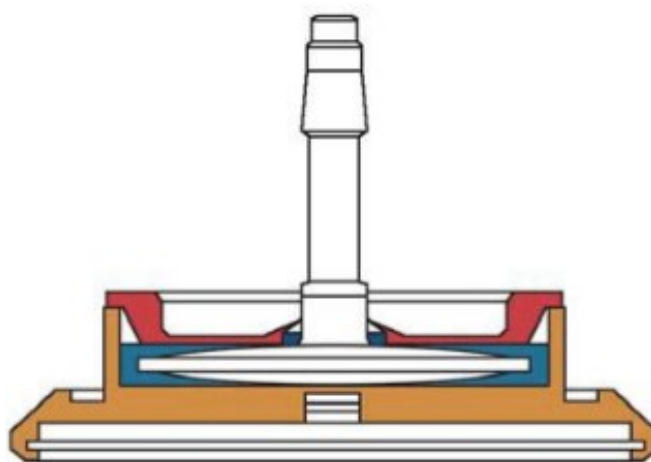
- Tok kapaliny ve štěrbině mezi rotujícími sousými válci
- Tok kapaliny ve štěrbině mezi rotujícím kuželem a deskou
- Tok kapaliny kapilárou
- Volný pád kuličky kapilárou [9]

### 2.2.1 Rotační viskozimetry

Rotační viskozimetry pracují na principu soustředěných válců, nebo také na principu kužel deska. Princip měření je založen na sousých válci, čímž se nejvíce přibližují podmínkám na stanovení viskozity mezi dvěma nekonečnými a rovnoběžnými plochami. Přesnost výsledků pak bude větší při použití válců s většími průměry.

Měřitelnými veličinami jsou rychlost ustáleného rotačního pohybu, nebo počet otáček za určený časový úsek. Druhým údajem potřebným k vyhodnocení toku, je odpor kapaliny proti vůči smykové deformaci v důsledku gradientu rychlosti v měřeném množství.

Hlavní pracovní část rotačního reometru tvoří dvě části geometrie – pohyblivá (rotor) a statická (stator), mezi kterými je umístěn zkoušený materiál. Obě části geometrie jsou sousé a používají se ve třech základních konfiguracích - válec – válec, deska – deska, kužel – deska, z nichž každá je vhodná pro určité konzistence zkoušených materiálů a různé druhy měření. [8]



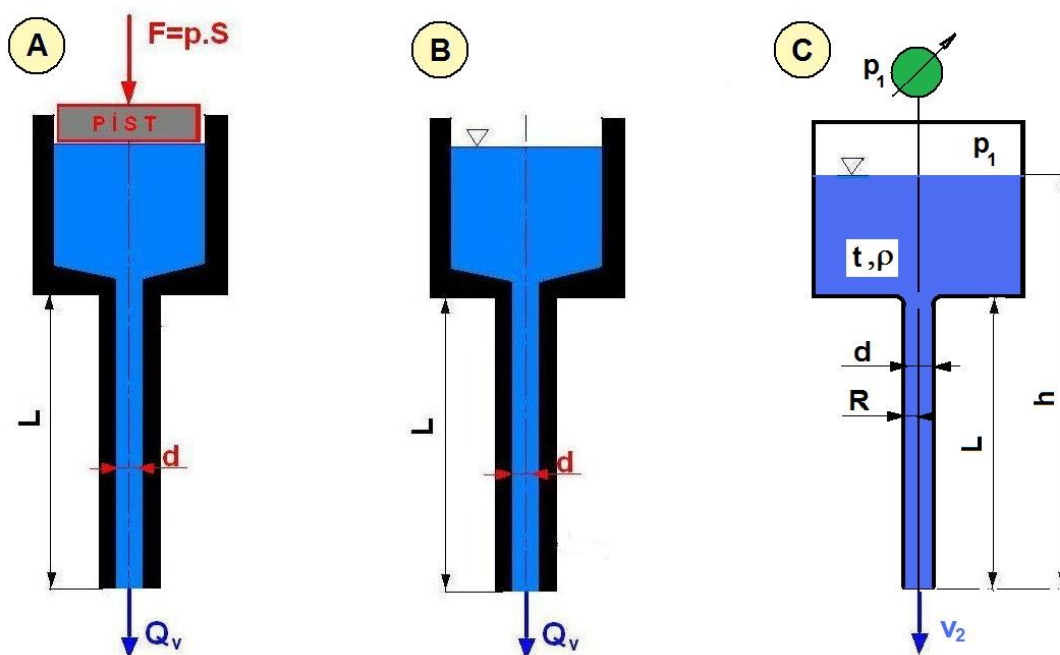
Obrázek 2 Princip měření u rotačního reometru deska – deska [10]

### 2.2.2 Kapilární viskozimetry

Měření viskozity v kapilárních viskozimetrech je jednou ze základních metod laboratorního měření viskozity. Základní princip spočívá v měření času nutného k průtoku definovaného objemu kapaliny, využívající hydrostatického tlaku vlastní tíhou objemu kapaliny, nebo také vnější silou tlaku kapilárou o poloměru  $R$  a délce  $L$ . Měřitelné veličiny při takovém postupu jsou:

- Průtoková rychlost neboli výtoková rychlost  $Q$  – množství kapaliny za daný čas
- Tlaková spád v kapiláře – rozdíl tlaku na vtokové a výtokové straně, vztažen k délce kapiláry

Viskozimetr musí být vyroben bez kazů, z čirého skla. Rozměr kapiláry pak udává měřicí rozsah, proto se pro měření používá laboratorní sada viskozimetrů s rozdílnou světlostí kapiláry. [8][9]



Obrázek 3 Schéma kapilárních viskozimetrů [12]

### 2.2.3 Výtokový viskozimetr

Většina měřících zařízení na měření viskozity, se zabývá měřením plastických hmot v tekutém stavu. K tomu je potřeba teplota za hranou skelného přechodu. Materiály, které jsou reaktoplastické a vulkanizace probíhá při pokojové teploty, mohou využívat jednoduchých zařízení, jako je například výtokový pohárek.



Výtokové pohárky jsou primárně využívány pro měření nátěrových hmot a to zvláště jako pomocnou metodu pro přejímání materiálu, nebo jako mezioperační kontrolu ve výrobním procesu. Měrnou jednotkou je doby stanovená v sekundách, za kterou zkoušená kapalina proteče z pohárku definovaných rozměrů o obsahu 100 ml tryskou na dně pohárku. Celková výtoková doba nesmí přesáhnout dobu 200 sekund, při předepsaných průměrech kapiláry 2,5 mm, 3,0 mm, 4,0 mm a 6,0 mm. Daný průměr je zmenšován se snižující se viskozitou testovaného materiálu.



Obrázek 4 Výtokový pohárek 3,0 mm [23]

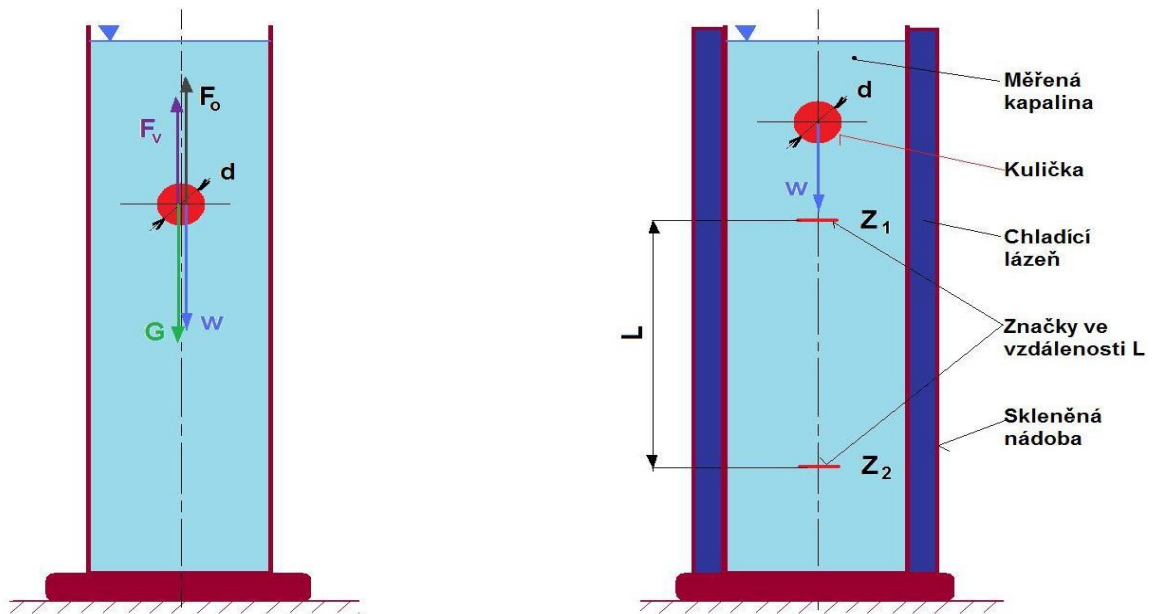
Samotné měření je prováděno při pokojové teplotě a laboratorních podmínkách. Výsledná hodnota je pak výsledkem pozorování třech hodnot, a to času, teploty a průměrem použité trysky. Zkouška, která umožňuje měřit viskozitu kapalin výtokovými pohárky, je v rozmezí 1 – 1500 mPas a je detailně popsána v ČSN EN ISO 1628-3 (640355). [9]

#### 2.2.4 Kuličkové viskozimetry

Viskozimetry takového typu jsou principiálně založeny na rychlosti pádu kuličky ve zkoumané tekutině. Tok kapaliny okolo hladké koule udává jednoduchý princip měření viskozity, jež je svou jednoduchou konstrukcí docela snadno dostupný.

Koule o průměru  $d$  a hustoty  $\rho_k$  se pohybuje ustálenou, jinak řečeno pádovou, rychlostí  $w$  vlastní tíhou v kapalině o hustotě  $\rho_v$  a dynamickou viskozitu  $\eta$ . Kapalina tak zaujímá nekonečně velký poloprostor. Na pohybující se kouli působí tíhová síla  $G$ , vztlaková síla  $F_v$  a

odporová síla  $F_o$ , přičemž se předpokládá rovnoměrná pádová rychlost, je setrvačná síla nulová  $F_s = 0$ .



Obrázek 5 Rovnováha sil při pohybu koule ve Stokesově viskozimetru [12]

Pro rovnováhu sil platí tato rovnice:

Rovnice 4 Rovnice a vzájemné vztahy rovnováhy sil

$$G = F_v + F_o$$

$$G = \frac{\pi d^3}{6} \cdot g \cdot \rho_k; F_v = \frac{\pi d^3}{6} \cdot g \cdot \rho_v; F_o = C_x \frac{\pi d^2}{4} \cdot \frac{w^2}{2} \cdot \rho_v$$

Pravidla měření Stokesovým viskozimetrem udávají definovanou vzdáleností dvou rysek, umístěných na válci a měřením času v době průchodu kuličky mezi dvěma ryskami se při známé hustotě kuličky vypočte velikost dynamické viskozity.

Rovnice 5 Výpočet dynamické viskozity dle Stokesova viskozimetru

$$\eta = \frac{d^2(\rho_k - \rho_v) \cdot g}{18 \cdot w} = \frac{2 \cdot r^2(\rho_k - \rho_v) \cdot g}{9 \cdot w}$$

Tato metoda měření je velmi jednoduchá, však nepoužitelná u kapalin neprůhledných. [11]

## 2.3 Tvrdost

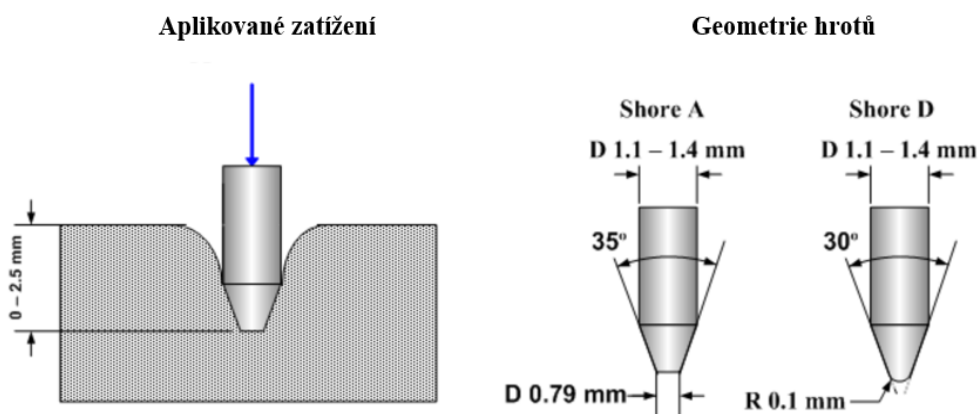
Jednou z hodnotitelných vlastností polymerních materiálů je tvrdost, která se však v praxi většinou neuvádí. Některé materiály však mezi specifické vlastnosti tvrdost zařazují a proto výrobci uvádí jako součást materiálových listů tyto hodnoty. U pružných materiálů se tvrdost hodnotí podle metody Shore, u tuhých plastů mohou být uvedeny metody podle Rockwella, Vickerse, či Brinella.

Tvrdost materiálu, je možno definovat různými způsoby, ale v obecném hledisku se jedná o úroveň odporu zkoumaného materiálu, proti vniknutí jiného tvrdšího tělesa. Tato vlastnost se tedy týká spíše povrchu materiálu, kde první stupnice tvrdosti byly hodnoceny dle toho, zda zanechá daný tvrdostní standard stopy po vrypu u zkoušeného vzorku.

U polymerů jsou tyto vlastnosti odlišné od kovů, neboť polymery jsou poněkud houževnaté a v případě pryže také pružné, navíc se jejich povrchy částečně deformují. Měřicí přístroje jsou proto většinou konstruovány tak, že dochází k postupnému vlačování tělíska definovaného tvaru do testovaného materiálu. Zde se měří rovnovážná hloubka vniknutí čidla při určité rovnoměrné síle vlačování. [10]

## 2.4 Metoda Shore

Nejpoužívanější metodou měření tvrdosti pryžových materiálů, je měření tvrdosti Shore. V základním rozdělení této metody je důležitý rozsah tvrdosti materiálu, což je rozděleno v používání tvrdoměrů typu A a typu D. Dle normy ČSN EN ISO 868 (640624) se pro měření materiálu s tvrdostí do 85 jednotek Shore je lépe využitelná metoda A, pro materiály s hodnotou vyšší 85 jednotek Shore, je s výhodou použita metoda D.



Obrázek 6 Zkušební hrot tvrdoměru typu A a typu D [8]

Principem zkoušky je měření hloubky specifikovaného hrotu, vtlačovaného do vzorku měřeného materiálu za definovaných podmínek. Hloubka hrotu, vtlačeného do zkušební tělesa, je pak přímo úměrná hodnotě tvrdosti, korespondujícího se stupnicí 0 - 100 Shore. Pro výpočet hodnoty jsou dle definovaných předpisů použita jedna z využívaných rovnic, která vychází z využití kalibrované pružiny, která působí silou na zkušební hrot tvrdoměru:

$$F = 550 + 75 \text{ ShA [mN]}$$

$$F = 445 \text{ ShD [mN]}$$

F - síla vtlačování v [mN]

ShA - hodnota tvrdosti naměřená tvrdoměrem typu A

ShD - hodnota tvrdosti naměřená tvrdoměrem typu D [13]

#### 2.4.1 Zkušební vzorky

Aby byly naměřené hodnoty co nejpřesnější, metoda měření Shore upřesňuje tvar měřených vzorků. Zkušební tělesa musí být hladká, rovná, bez viditelných defektů a musí ležet na dostatečně velké ploše. Jejich rozměr je omezený pouze na minimální výšku 4 mm. Pokud nelze zajistit minimální výšku vzorku, je potřeba tenčí vzorky seskládat na sebe, případně odříznout na požadovanou velikost. Naměřené hodnoty skládaných těles však mohou vykazovat rozdílné hodnoty od jednolitého tělesa. Na nerovných, drsných, poškozených či jinak deformovaných zkušebních tělesech, tyto zkoušky neprovádíme.

#### 2.4.2 Provedení zkoušky

Zkušební těleso je umístěno na vodorovný povrch tak, aby patka pevně přilnula po celé ploše k opěrné podložce. Následně se co nejrychleji přitlačí těleso na měřicí hlavu dostačujícím tlakem tak, aby došlo k pevnému kontaktu mezi opěrnou patkou a měřeným tělesem. V závislosti na použitém zařízení, se vyhodnocují vzorky s časovými rozdíly. Při práci se zkušebním ručním měřidlem, se naměřené hodnoty ihned po dostatečném přitlačení k měřenému materiálu, zobrazí na stupnici zařízení. [10]

Při použití stolního zařízení, nastává časová prodleva, kdy se odečítají údaje o tvrdosti na stupnici tvrdoměru za  $15 \pm 1$  sekund. Výslednou hodnotu pak vypočteme jako aritmetický

průměr pěti naměřených hodnot. Měřené body jsou od sebe rozmístěny náhodně ve vzdálenosti minimálně 5 mm, ale ne blíže než 12 mm od okraje.

Stolní zařízení použité pro vyhodnocení tvrdosti ShA a ShD, obsahují tyto základní části:

- Měřicí hlava upevněná v polohovatelném třmenu
- Časomíra se signalizací
- Stojan s polohovatelnou opěrnou základnou
- Sada výměnných závaží
- Kalibrované pružiny
- Opěrné patky
- Zkušební hrot s normovaným tvarem
- Ukazatel délky [9]

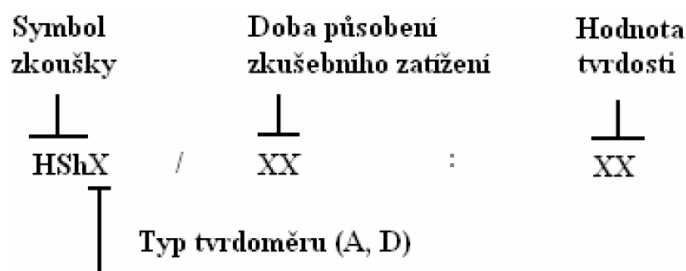


Obrázek 7 Durometr pro Shore A a D fa. Bareiss [23]

### 2.4.3 Hodnoty tvrdosti

Hodnoty tvrdosti se vypočítají a zapíší podle normovaného schématu. Výpočet tvrdosti je doplněn výstupem z měřicího zařízení příslušné kategorie Shore, doby v sekundách po kterou klesala opěrná deska do kontaktu s tělesem a hodnotou z výstupní stupnice.

Rovnice 6 Obecný vzorec pro výpočet Shore [8]



Pro příklad: Jedná se o tvrdost HShA / 15:42

Typ tvrdoměru A

Doba měření v sekundách 15s

Naměřená hodnota

Stanovením tvrdosti plastů vtlačováním hrotu tvrdoměru Shore, je řízeno společnými evropskými normami, sdružených do níže uvedené tabulky. [15]

*Tabulka 4 Normy stanovující tvrdost Shore [14]*

	norma	název	platnost
ČSN	ČSN EN ISO 868	Plasty a ebonit – Stanovení tvrdosti vtlačováním hrotu tvrdoměru (tvrdost Shore)	Říjen 2003
ISO	ISO 868:2003	Plastics and ebonite. Determination of indentation hardness by means of a durometer (Shore hardness)	Duben 2003
DIN	DIN EN ISO 868	Kunststoffe und Hartgummi - Bestimmung der Eindruckhärte mit einem Durometer (Shore-Härte).	Říjen 20003
STN	STN EN ISO 868	Plasty a ebonit. Stanovenie tvrdosti vtlačováním pomocou tvrdomera (Shorova tvrdosť) (ISO 868: 2003).	Květen 2004
BS	BS EN ISO 868:2003	Plastics and ebonite. Determination of indentation hardness by means of a durometer (Shore hardness)	Duben 2003

## 2.5 Měření smrštění

Pro výrobu plastových hmot a také u zpracování elastomerů platí rozměrová změna způsobená tuhnutím výrobku. Se smrštěním se při zpracování plastů setkáme ve výrobě vstřikování plastů, kdy ke změně rozměrů dochází při chlazení ve formě, případně se toto smrštění projeví postupem času. Tento negativní efekt je proměnou hodnotou, ale lze jej eliminovat správným nastavením vstřikovacího cyklu, teplotou a velikostí formy, ale také použitým materiálem.

U elastomerů zpracovávaných technologií odlévání, je díky působením gravitačních sil, viskozitou zpracovávaného materiálu a relaxační dobou materiálu, velmi problematické tomuto jevu předejít. Proto při konstrukci forem s tímto jevem musí konstruktér počítat, při dobré znalosti smrštění materiálu. Navíc zde může nastat rozdíl při kombinaci smrštění vertikálního a horizontálního. Pro měření je nutno zvolit vhodnou metodu a měřidlo, jež je schopno danou rozměrovou nestabilitu detekovat a správně vyhodnotit. [19]

Na měření se používají měřidla dle fyzikálního principu rozdělena:

- Mechanické
- Optické
- Elektrické
- Časové
- Akustické
- Elektromechanické

Podle způsobu zjišťování naměřené veličiny:

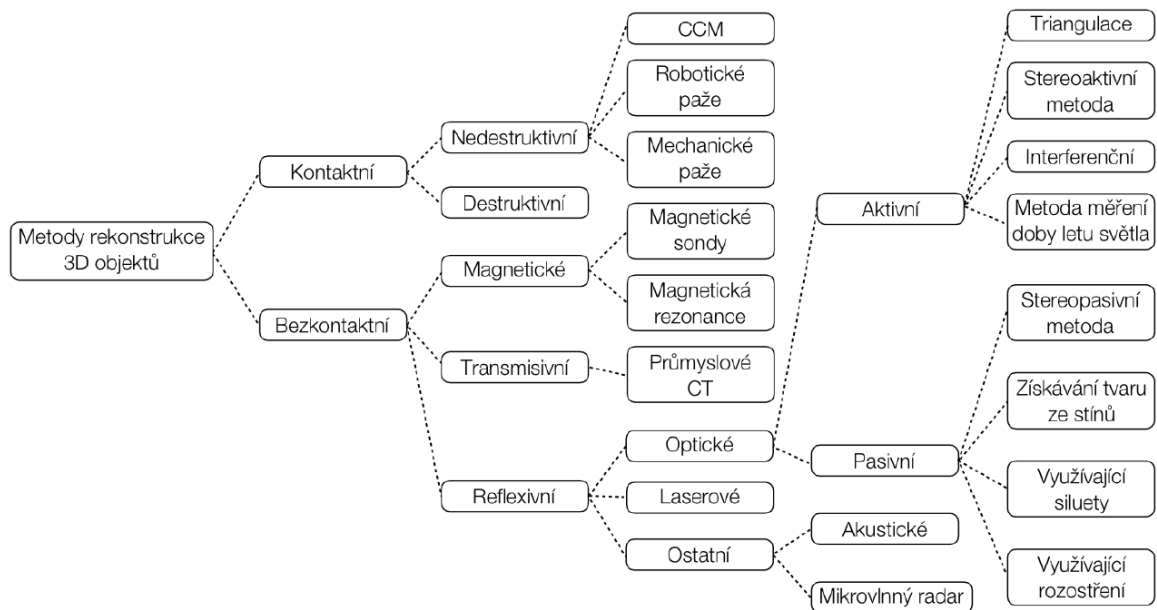
- Přímé / Nepřímé
- Relativní / Absolutní
- Kontaktní / Nekontaktní [18]

### 2.5.1 Souřadnicové měřicí stroje

Mezi vhodné metody rozměrového a tvarového měření spadajících do inovativních metod, patří souřadnicové měřicí stroje dále jen „SMS“. Jejich původní uplatnění bylo na měření konstrukcí a karosérií v leteckém a automobilovém průmyslu. Kombinace výroby na CNC strojích a přenosu podkladových dat do měřicích systémů, umožnily rychlou kontrolu jak hotových tak rozpracovaných dílů.

Principem je, stejně jako u CNC strojů, orientace v prostoru od základního bodu v osách X, Y, Z, případně doplnění rotační osy. Díky tomuto rozdělení pravouhlými souřadnicemi na principu kartézské soustavy, je možno definovat každý bod v síti tohoto souřadnicového systému. Tyto systémy se však rozlišují z hlediska identifikace na souřadnicový systém stroje a souřadnicový systém měřeného dílu. [19]

Tabulka 5 Taxonomie 3D skenerů [20]



Před samotným měřením je nutno definice bodů, identifikace v prostoru, následuje měření těchto bodů a nakonec vyhodnocení definovaných bodů. Jednotlivé dráhy identifikátorů jsou řešeny osami podobně jako u NC zařízení, pomocí délkových měřicích systémů pak vyhodnocují polohu, kterou přenáší do elektronického systému. Každé měřicí zařízení obsahuje měřicí sondy nebo optiku, příslušenství pro vhodné polohování výrobku a patřičný software pro přesné vyhodnocení.

Podle konstrukce souřadnicových měřicích strojů se zařízení dělí:

- Stojanové stroje
- Výložníkové stroje
- Mostové stroje
- Portálové stroje [20]

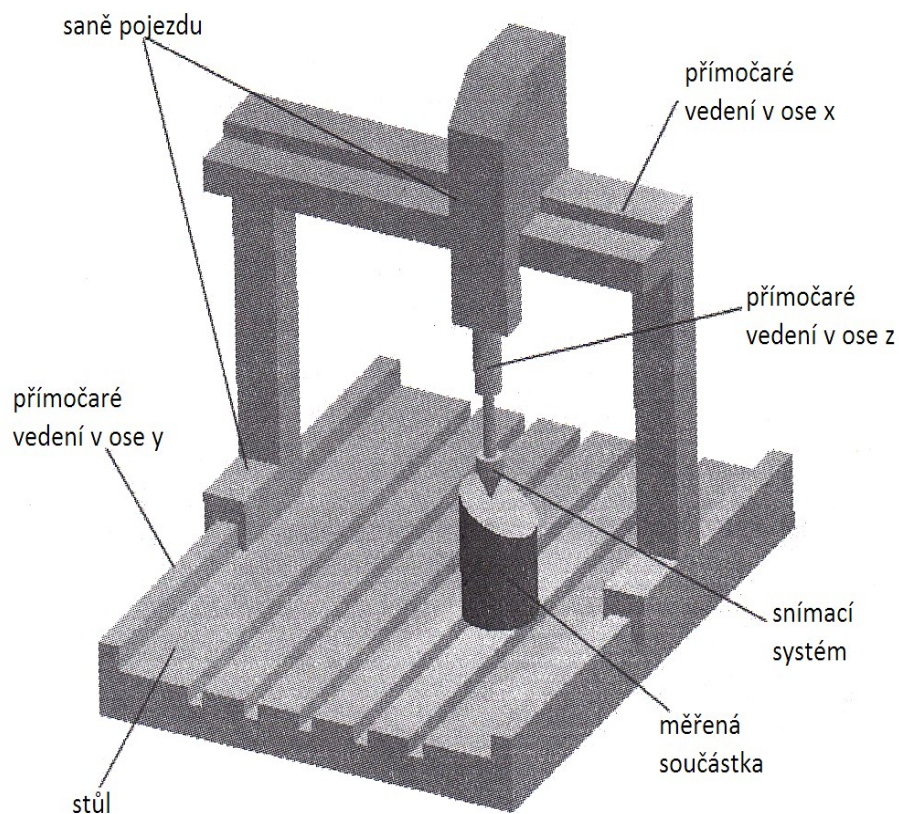
### 2.5.2 3D skenery kontaktní

Pro práci s těmito zařízeními, se používají dotykové snímače, fungující na elektronickém, tenzometrickém, nebo také již na optickém principu detekce. Kuličku na konci snímače využívají elektronické zařízení, neboť ta je pevně spojena s rameny a dochází tak k přenosu informací. Při kontaktu a vychýlení kuličky, nastane přerušení impulsu a řídicí systém dostane informaci o poloze čidla, kterou následně zaznamená tenzometr jenž výsledek zašle do databáze. Jinou metodou snímání je za pomoci skenovací sondy. Principiálně sondy fungují



stejně, avšak tyto snímají povrch neustále. Jejich pohybem po výrobku a za využití vysoké rychlosti přenosu pulzu, je měřený povrch stále detekován, čili skenován.

Základním prvkem konstrukce měřících strojů je základní deska, doplněna měřícím zařízením. Tento snímací systém musí být polohově nezávislý na hlavním mechanismu pracujícím ve třech hlavních osách. [20]



Obrázek 8 Hlavní mechanické prvky SMS [18]

Typologicky jsou doteky děleny na dva základní druhy, lišící se principem detekce. Základními jsou spínací dotykové hlavy pracující na vyhodnocení soustavy tří bodů. Ve chvíli doteku měřeného objektu, je vyslán impulz do odměřovacího zařízení a tento bod se načte ze souřadnic polohy doteku.

Senzory, které jsou vybaveny systémy k měření dráhy ve třech směrech, jsou měřící dotykové systémy. Vychýlením koule v jakémkoli směru zaznamená se tato pozice přečtením systému drah.

Základní rozdělení tvarů doteků:

- Doteky přímé
- Hvězdicové doteky
- Válcové doteky
- Doteky s hrotem
- Doteky s keramickou dutou polokoulí

Pro měření objemu v kombinaci s tvarem měřeného objektu, je dnes velmi často využívána technologie 3D skenování, která spadá do principu optického měření a způsobu nekontaktního měření. [17]

### 2.5.3 3D skenery bezkontaktní

Bezkontaktní 3D technologie zaznamenaly poslední době obrovský rozmach. Tomuto stavu napomohl rozvoj vysílačů, snímačů a softwarové inovativní technologii v kombinaci s využitím CAD dat v průmyslu obecně. Základním dělením principu snímání 3D objektů, je dělení na pasivní a aktivní metody.

Pasivní metody nevyžadují ke snímání a identifikaci měřených ploch, žádné aktivní prvky jako světlo, proto energie je zde pouze detekována. Základem je snímání obrazu více kamerami najednou z různých úhlů či vzdálenosti pohledu, využívající samokalibrace. Mezi hlavní metody měření patří:

- Stereovidění
- Stínování
- Zoomování
- Textur a kontur objektu
- Analýzy pohybu [24]

Nejrozšířenější metodou je stereovidění, neboli měření pomocí dvou kamer, snímající objekt s rozdílnou vzdáleností a polohou. Objekt je snímán jako 2D obraz a teprve spojením obou výsledků se dostává reálný tvar a velikost objektu. Problémy však mohou nastat při odsouhlasení společných bodů s nevýraznou texturou. [18]

Pokud je však požadováno přesnější měření, výhodnějším je využití aktivního snímání bodů. Při tomto snímání je těleso emitováno danou formou energie a odraz následně snímán a vyhodnocen. Při použití aktivního snímání je využíváno zejména optických snímačů s kombinací těchto triangulačních metod:

- Světelný paprsek (1D triangulace)
- Světelný pruh (2D triangulace)
- Strukturované světlo (3D triangulace) [19]

Ke snímání a lepšímu polohování se využívá otočných stolků, nebo mechanických ramen s kamerou jako koncovým efektozem. Takto nasnímané snímky se následně digitalizují a převedou do CAD dat pro srovnání s těmito podklady.

Variabilnějším zařízením jsou však laserové snímače. Při snímání vzdálenosti je měřen čas od vzniku paprsku po zpětný záznam po odrazu. Jejich pořizovací cena je sice vyšší, avšak jejich využití je významější, zvláště u tvarově náročnějších objektů. Nemohou však zaznamenat texturu objektu tak přesně jako optické snímače.

Nevýhodnějším řešením se tak jeví kombinace optického a laserového snímání objektu. [21]



Obrázek 9 Bezkontaktní optický systém Aramis – Gom [21]

### 3 VÝROBA SEGMENTOVÝCH FOREM VE VFC

Výroba forem je již od začátku spjata s výrobou plášťů od firmy Baťa, která již v roce 1931 zahájila výrobu veloplášťů. Na tuto výrobu navázala firma také s výrobou forem a to od roku 1932 formami pro výrobu osobních pneumatik. Prvními formami, byly dvoudílné formy pro radiální pneumatiky. Začátkem 70. let minulého století se závod přestěhoval do Otrokovic, kde sídlí výroba forem dodnes, ale již jako součást koncernu Continental. V roce 2015 byl zařazen do portfolia strojírenských podniků koncernu, pod hlavičku Continental Mold and Machinery dále jen „CMM“ jako Výroba Forem Continental dále jen „VFC“. Nyní firmy vyrábí ročně 1200 osobních segmentových forem pro pneumatikářské závody koncernu od západní i východní Evropy, přes Afriku, Jižní Ameriku, USA a Rusko. [25]

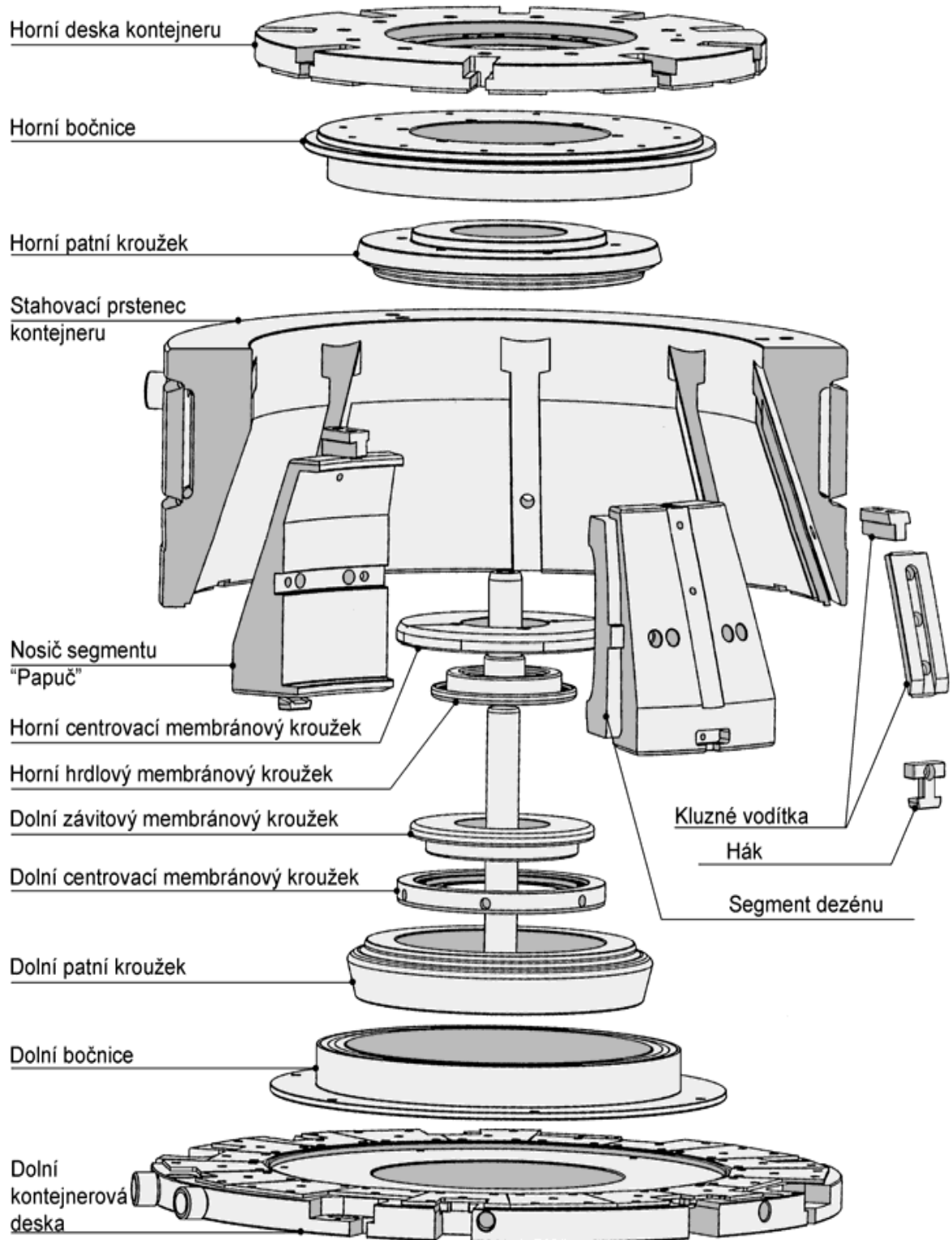
Formy jsou zde vyráběny ve výrobních odděleních jako Slévárna odlitků z hliníkových slitin, Výroba SLM lamel, Výroba Bočnic a Patkových kruhů a Dokončení segmentových dílů forem. Během výroby jsou používány jak tradiční metody výroby, jako je gravitační odlévání hliníkových slitin, soustružení či frézování na 5-osých centrech, ale také inovativní metody výroby jako SLM tisk komponentů z kovového prášku, elektroerozivní obrábění nebo povrchová úprava PVD chromovým práškem.

#### 3.1 Výrobní postup segmentových forem

Segmentové formy vyráběné ve VFC, jsou složeny z několika základních dílů:

- Segmenty dezénu 7 – 11 dílné
- Bočnice horní a dolní
- Patkové kruhy dolní a horní

Takto vyrobené formy jsou expedovány ke koncovému zákazníkovi, který pro jejich použití při lisování, musí zvolit rozměrově shodný kontejner, do kterého je forma namontována.



Obrázek 10 Sestava vulkanizačního kontejneru se segmentovou formou [25]

### 3.1.1 Výroba segmentů ve slévárně odlitků

Výrobě odlitků ve Slévárně VFC se zabývám podrobněji, neboť práce je věnována této části výroby.

Výroba segmentových dílů formy začíná výrobou modelů, které jsou vyrobeny z tvrzeného polyuretanu s obchodním označením Ebaboard 0780, běžně udávaného jako umělé dřevo. Výroba těchto dílů formy je prováděna na 5-osých centrech z CAD dat dodaných konstruktérem formy. Po vyfrézování a vzájemném odsouhlasení rozměrů a tvaru, je tento díl dokončen v dílně Ručního dokončení modelů. Zde jsou modely osazovány modelovými lamelami a zapracovány defekty či nedodělky, vzniklých při frézování modelu.

Výroba lamel je součástí výroby segmentů. Jsou vyráběny metodou SLM na 3D tiskárnách, tavením kovového prášku. Lamely jsou vyráběny ve dvou variantách, jako modelové a také jako výrobní komponenty forem. Tyto kovové díly mají základní funkci vytvoření jemných drážek na dezénové části pneumatiky využívaných zvláště pro zimní typ dezénu.

Po kompletaci modelových lamel a dokončení modelu přichází na řadu výroba Flexibelu. Jedná se o pružný materiál, zajišťující přenos tvaru modelu jako další z technologických kroků. Výrobou tohoto dílu se podrobně zabývám v další části práce. Do vytvořených drážek vyrobeného flexibelu, jsou vloženy výrobní lamely, které jsou přeneseny až do hliníkového odlitku.

Aby došlo k přenesení tvaru na odlitek a také lamel, použijeme pro tento mezikrok sádrové jádro vyrobené z napěněné sádry. Aby byla jádra dokonale vysušena, jsou vložena do sušící pece a nastaven cyklus pro sušení po dobu 38 hodin. Sušící pece jsou konstruovány pro maximálně 2 sady sádrových jader na jeden sušící cyklus.

Po vysušení jader jsou tyto vytaženy a rovnoměrně sestaveny do kruhu na licí desce. Deska je opatřena izolačním nátěrem pro snížení odvodu tepla z taveniny. Tato sestava je uzavřena „zadním dílem“, což je písková část kruhového dílu zad, s vytvarovanou vtokovou sestavou a vlepenými keramickými filtry. Zadní díl je vyroben z ocelového kruhu a směsí slévárenského písku, pojiva a tvrdidla, kterými je zasypán model vtokové sestavy s licími kanálky. Tato sestava je vyráběna min 24 hodin před plánovaným litím hliníkové slitiny.

Pakliže je vše připraveno, může se přejít k procesu odlévání. Slitina použitá pro výrobu segmentů je AlMg3Si. Odlévá se poté, co je připravená slitina zbavena nečistot a nežádoucích plynů při teplotě 730°C. Průměrný čas procesu odlévání je 8 minut a doba chládnutí před

zpracováním, je 24 hodin. Po vychladnutí formy se odstraní písková část a sádrové jádro od odlitku. Odstraní se i nálitky a zatuhlá vtoková část použije, jako vratný odpad pro další použití.

### 3.1.2 Dokončení segmentů

Jelikož jsou segmenty odlévány jako jeden celek ve formě kruhu, je nutno je rozřezat na jednotlivé díly – segmenty. Toto se děje po osoustružení základního tvaru a následují další kroky při strojním opracování. Pro mechanické dokončení odlitku jsou segmenty zbaveny drobných slévárenských vad a doplněny o odvzdušňovací vložky takzvané Euroventily. Tyto komponenty zajišťují odvzdušnění formy při lisování pneumatik a zároveň zabraňují zatékání gumárenské směsi z formy. Některé z forem prochází finální povrchovou úpravou nitridací chromem metodou PVD.

### 3.1.3 Výroba bočnic a patních kruhů

Nedílnou součástí forem pro osobní pneumatiky, jsou horní a dolní díly bočnice a patkových kruhů. Jako polotovár je zvolena nástrojová ocel ČSN 11523 (EN 10025), která je před dalším zpracováním vyžihána pro odstranění pnutí.

Po tepelném zpracování jsou bočnice opracovány na soustruzích karuselového typu a opatřeny upínacími závity na frézovacích centrech. Důležitou součástí výroby je popis bočnic, kde je přenesen CNC gravírovacími frézky žádaný text v naprogramovaném formátu a také design se šrafováním, texturou či jiným zadaným tvarem. Finální operací je podobně jako u segmentů instalace odvzdušnění do vyvrtaných otvorů.

Patkové kruhy jsou ty součásti formy, které výrobku určují velikost patky a také specifické detaily potřebné k upnutí do typologicky předepsaného lisu. Výroba patkových kruhů je jednodušší než výroba bočnic. Jsou vyráběny ve více-vřetenovém CNC zařízení, kde je provedeno opracování na jedno upnutí. Dokončením je pouze instalace odvzdušňovacích ventilků prováděnou pracovníkem mechanických prací. [25]

## 4 CÍLE PRÁCE

Optimalizace materiálu pro výrobu flexibelu je poměrně rozsáhlé téma. Výrobní postup výroby pryžového modelu, již několikrát prošel vývojem, s cílem minimalizace pracovního času, optimalizace přípravků či testování nových materiálů vhodných pro danou výrobu. Hlavním cílem jsem zvolil věnovat se poslednímu z optimalizovaných bloků, a sice testovat vlastnosti používaných případně nových materiálů s cílem vybrat ten nejvhodnější. Výsledkem testování je pryžový materiál o požadované kvalitě, zpracovatelnosti a funkční stálosti.

Je nutno využít poznatků navržených materiálů na testování z přiložených materiálových listů a v kombinaci s hlavními požadavky na výsledek, takto doporučit materiál nejvhodnější pro danou výrobu. Parametry, kterými se práce zabývá, jsou požadavky na zpracovatelnost, rozměrovou stabilitu a tvrdost požadovanou po opakovaném použití.

Jedním ze základních požadavků je zpracovatelnost. Materiál se zpracovává po ručním nebo strojním mechanickým smícháním všech složek systému při pokojové teplotě, dle požadované receptury. Jelikož objekt, který je rozměrově a tvarově velmi složitý, se směsí zalévá a plní se pouze působením gravitačních sil, je nutno, aby měl dostatek času na zatečení, či převzetí budoucího tvaru.

Dalším důležitým faktorem je rozměrová přesnost a stabilita materiálu, která se po ztuhnutí díky smrštění mění. Pro opakované použití materiálu je důležitý faktor rozměrových změn, což u některých polyreakcí může nastat.

Posledním z testovaných parametrů, je pružnost materiálu a to i s ohledem na opětovné použití v definovaném čase. Pružnost materiálu je důležitá pro vkládání kovových komponentů do pryžového dílu flexibelu a následného přenesení a uvolnění do ztuhlé sádry.

Materiál, který bude na základě provedených testů doporučen k užívání, bude splňovat většinu požadovaných vlastností a bude tak nově zařazen do technologického postupu výroby forem v VFC.



## **II. PRAKTICKÁ ČÁST**

## 5 VÝROBA FLEXIBELU

Jak již bylo výše zmíněno, po dokončení modelu přichází na řadu výroba Flexibelu. Jedná se o formu obsahující pružný materiál, zajišťující přenos tvaru modelu. Než však přejdeme k samotné výrobě, je nutno uvést důležité informace o modelu.



Obrázek 11 Výroba flexibilové formy – postup činností [zdroj: vlastní]

### 5.1 Model

Než se model dostane do výrobní fáze, předchází tomu konstruktérská a programovací příprava. Neustále se zvyšující složitosti různorodých tvarů dezénů s ohledem na požadavky bezpečnosti silničního provozu a zvyšující se nároky zákazníka, vede k používání výkonných 3D CAD/CAM systémů. V této oblasti je plně využívána kvalitní vizualizace výrobku za pomoci programového vybavení Unigraphics, jež je také úspěšně využíván při simulacích a analýzách vlastností daného dezénu.

Po odladění testovací fáze dezénu je na pěti-osých frézkách typu HSC 70 Maho, vyfrézován rozměrově a tvarově podobný díl s určeným designem finálního výrobku, tedy pneumatiky. Jakmile jsou všechny modelové díly hotovy, přichází na řadu dokončovací práce modelů, včetně instalace kovových komponentů jako lamel, vložek, hrotů a ruční dokončení defektů vzniklých při frézování.

Model potřebný k výrobě desénové části je vyroben z plněné polyuretanové pryskyřice obchodním názvem Ebaboard 780, vyráběného firmou Ebalta Kundstoff GmbH. Tento materiál začal být používán pro výrobu modelů v roce 2015, jako vhodná náhrada materiálu Necuron 651. Materiály, které se při tomto procesu přidávají do modelu, mohou negativně ovlivnit následnou reakci materiálu potřebného pro výrobu flexibelu. Kontaminace zde hrozí především od strojních olejů, vzniklých při drobném znečištění modelu ve frézovacím centru. Mezi materiály použitými jako součást modelu jsou tmely na opravy defektů, lepidla používaná k fixaci lamel, pasty využití na otisky jednotlivých figur, kovový materiál lamel vyráběných metodou 3D tisku SLM, konečně také materiály plastových vložek vyráběných 3D tiskem metodou SLS. Aby se předešlo negativnímu vlivu materiálů, je model před dalším použitím mechanicky vyčištěn a současnou aplikací chemických čisticích také zbaven většiny nečistot.

Po provedené kontrole je výrobek uvolněn pro další zpracování v procesu výroby.

## 5.2 Sestavení přípravku

Dalším technologickým krokem výroby flexibelu je příprava modelu a zaformování do zalévací sestavy. Téměř pro každý model je typická jiná geometrie dezénové části, která je závislá od typu dezénu, šíře běhounové části, výšce patky a bočnice. Přípravková připravenost výroby je poměrně rozsáhlá a proto je nutno na základě přiložené šablony, vybrat nejvhodnější přípravkovou sestavu. Ta definuje zalévací štěrbinu mezi přípravkem a modelem tak, aby byla co možná nejvíce rovnoměrná a její šíře byla 25 mm s tolerancí +3 mm. Před samotným sestavením je každý model opatřen separačním nástřikem Trennmittel TM7, zajišťující snadnější následné rozložení modelu od ztuhlé části pryžového flexibelu. Jakmile je sestava poskládána, utěsní se vzniklé štěrbinu mezi přípravky a modelem průmyslovou plastelínou, s obchodním označením Superplastilin od výrobce Ebalta.

### 5.3 Zalévání pryžovou směsí

Pro vytvoření pryžového otisku je nutno použít materiál, který splňuje požadované vlastnosti. Před zpracováním je vhodné z materiálu odstranit bublinky, které zde mohou být díky manipulaci po přípravě u výrobce, případně díky nevhodnému skladování. Daný problém lze odstranit uzavřením otevřené nádoby do vakuové komory a pomocí vakuové vývěvy přebytečný vzduch z materiálu uvolnit.

Zde se dostáváme k samému jádru experimentu, a sice definování požadovaných vlastností, včetně následného vytipování materiálu vhodného pro dané použití.

### 5.4 Odformování flexibelové formy

Po zatuhnutí materiálu je sestava rozebrána a oddělena část modelu. Do vzniklého otisku jsou následně vkládány kovové komponenty, které se instalují do vzniklých drážek po modelových lamelách. Vložené komponenty se při dalším zpracování přenesou do sádrového jádra. Flexibel je zde zaformován do jednoduché sestavy a zalit sádrovou směsí, jejíž tuhnutí trvá cca 45 minut do rozložení sestavy. Odformování, neboli demoldingem, je myšleno oddělení formy flexibelu od jádra. Flexibel je poté připraven opět k použití pro výrobu dalších sádrových jader. Celý cyklus je možno opakovat až 5 krát.

### 5.5 Požadavky na materiál

Základní požadavky na zvolený materiál jsou:

- Viskozita při zpracování do 10 tis. mPa.s
- Tvrdost ve ztuhlém stavu od 12 - 16 ShA
- Definované smrštění ztuhlého materiálu
- Polymerace na základě polyadiční nebo polykondezační reakce
- Zpracovatelnost po dobu 20 minut při teplotě 23 °C
- Tuhnutí materiálu do 18 hodin
- Minimální těkavost uvolněných látek do ovzduší bez rizika ohrožení zdraví
- Použitelnost pro strojní i ruční zpracování

## 5.6 Materiály vybrané k testování

Pro testování byly vybrány materiály na základě vstupních požadavků na vlastnosti pryžových materiálů, vhodných pro použití k výrobním účelům.

Tabulka 6 Základní vlastnosti testovaných materiálů [zdroj: vlastní]

Definované parametry	Jednotky	Silikon	Silikon	Silikon	Polyuretan
VÝROBCE		Zhermack	Wacker	Wacker	Ebalta
NÁZEV MATERIÁLU		ZA 11-45 RED	Cenusil M 810	Elastosil M 4512	VP GM 15
VULKANIZACE	Polymerace	polyadiční	polyadiční	polykondenzační	polyadiční
BARVA		červená	bílá / modrá	bílá / zelená	modrá / černá
SMĚS	složky	A + B	A + B	A + B	A + B
MÍCHÁNÍ	poměr	50 : 50	50 : 50	100 : 5	100 : 50
HUSTOTA	g/cm <sup>3</sup>	1,1	1,05	1,19	1,17
VISKOZITA SMĚSY	mPa s	4500	3000	25000	7000
ČAS ZPRACOVÁNÍ	min	43	40	20 - 30	12 - 17
ČAS VULKANIZACE - hodin	hod	4	4	4 - 6	16 - 24
TVRDOTA SHORE A ZA 24 HODIN	sh A	11	10	20	17
LINEÁRNÍ SMRŠTĚNÍ	%	-	0,6	0,4	-
TAHOVÉ NAPĚTÍ	N/mm <sup>2</sup>	3,3	3,5	3,5	5,4
ELONGAČNÍ PRODLOUŽENÍ	%	550	600	500	-
ODOLNOST PROTI PŘETRŽENÍ	N/mm	11	15	> 24	-
TEPLOTA PROSTŘEDÍ	°C	23	23	23	20
VLHKOST PROSTŘEDÍ	%	-	-	50	-

Materiál Elastosil je ve výrobě používán již od roku 2010, avšak jeho výsledky již nejsou v souladu s požadavky na výrobek. Do testování jej však zařadíme.

Silikonové materiály Cenusil M 810, ZA 11 Red a Polyuretan VP GM 15, jsou nově testovanými materiály, které byly vybrány pro testování oddělením technologie na základě parametrů, které jsou součástí materiálových listů zařazených jako přílohy.



Obrázek 12 Forma flexibelu [zdroj: vlastní]

## 6 MĚŘENÍ POŽADOVANÝCH VLASTNOSTÍ

Pro vyhodnocení vhodnosti materiálu pro požadované použití jsou vybrána kritéria, která mohou nejvíce ovlivnit výsledek vyrobeného materiálu.

Jako první hodnocenou vlastností materiálu je testována tvrdost, která je důležitá pro následné použití materiálu. Dále se jedná o zpracovatelnost materiálu, kdy jeho hlavním požadavkem je kombinace viskozity a síťování materiálu. Třetím hodnoceným kritériem je objemová deformace materiálu, která je přímo závislá na rychlosti tuhnutí.

### 6.1 Tvrdost

Tvrdost pryže flexibelu je důležitá z několika hledisek a to jak zpracovatelského komfortu použití či míchání, tak z hlediska správného přenesení požadovaného tvaru a rozměru.

Po odformování flexibelu od modelové části přichází fáze výroby, vsazením dodatečných dílů formy. Do vytvořených drážek jsou vkládány kovové komponenty, takzvané lamely, ale také geometricky složité figury, vytvořené technologií SLM. Tato instalace je náročná pro správnou identifikaci pozic a k tomu náležitých komponentů, což lze kontrolovat dle výkresové dokumentace s detailním rozpisem pozic a kusovníku. Při vsazování do pružné části dochází k ohybu a následnému narovnání hran vytvořených modelovou lamelou. Správnost lze kontrolovat pouze opticky a při vytvořeném defektu lze jednoduše opravit mírným rozkmitem lamely.

Po vsazení všech dílů a provedené kontrole následuje fáze výroby sádrového jádra. Toto spočívá v zaformování pryžové sestavy a nalitím namíchané sádrové směsi. Po zatvrdnutí do tuhé fáze (35 - 45 minut), následuje oddělení od flexibelu, pomocí podfouknutím stlačeného vzduchu a mechanickému oddělení. Při tomto úkonu dochází k přenesení tvaru a také všech osazených komponentů do sádrového jádra. Aby bylo možno bezvadně přenést komponenty a oddělit flexibel takovým způsobem, aby nedošlo k mechanickému poškození sádrového jádra, musí mít pryžový materiál požadovanou tuhost.

#### 6.1.1 Metoda měření

Pro testování byly vyrobeny vzorky o definované velikosti 50 x 50 x 6 mm. Měření samotné probíhalo v dílenských podmínkách, kde je materiál zpracováván.

Jako měřicí zařízení pro měření tvrdosti byly použity ruční tvrdoměry používané pro vyhodnocování tvrdosti metodou Shore A. Opakované měření bylo prováděno za co možná identických podmínek na určených vzorcích. Na vzorku byl měřicí bod minimálně 12 mm od okraje a vzdálenosti mezi sebou nejméně 5 mm. Celkový počet měření je 160 hodnot u každého vzorku. Časový posun jednotlivých úkonů byl proveden s úmyslem zjistit chování materiálů s důrazem na tvrdosti materiálu v čase.

Měřicí zařízení je cejchováno a pravidelně kalibrováno na metrologickém úseku společnosti Continental Barum s.r.o.



Obrázek 13 Ruční tvrdoměry Zwick [zdroj: vlastní]

Při měření tvrdoměrem bylo naměřeno celkem 640 hodnot při použití kombinace dvou tvrdoměrů. Každý den bylo provedeno 10 měření jedním zařízením a 10 měření druhým zařízením. Pro výpočet denní hodnoty bylo použito těchto statistických veličin:

- Aritmetický průměr
- Medián
- Variační rozpětí

**Aritmetický průměr  $\bar{x}$**  – vznikem součtu všech hodnot a podělením počtem těchto hodnot vznikne průměrná velikost hodnot.

*Rovnice 7 - Aritmetický průměr*

$$\bar{x} = \frac{1}{n} (x_1 + x_2 + \dots + x_n) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

**Medián  $\hat{x}$**  – jedná se o středovou hodnotu všech záznamů seřazenou dle jejich velikosti. Možno též chápat jako hodnotu kdy nejméně 50 % hodnot je rovno nebo menších, a nejméně je 50 % hodnot rovno nebo větších od mediánu.

*Rovnice 8 - Medián*

$$\int_{-\infty}^m f(x) dx = 0,5$$

**Variační rozpětí  $R$**  – touto hodnotou je rozdíl mezi nejmenší naměřenou hodnotou a největší naměřenou hodnotou, čili rozdíl maxima od minima.

*Rovnice 9 - Variační rozpětí*

$$R = x_{\max} - x_{\min}$$

Základní vyhodnocovací graf je vyjádřen pouze z hodnot aritmetického průměru. Hodnota medián je v 81 % shodná s aritmetickým průměrem. V součtu všech naměřených hodnot je rozdíl mezi mediánem a aritmetickým průměrem pouze 0,4 bodu. Proto pro další vyhodnocení není medián použit.

Variační rozpětí bylo od minimální hodnoty 0,4 až po maximální hodnotu 1,5.



## 6.1.2 Naměřené hodnoty

Postupně byly změřeny všechny materiály, jejichž naměřené hodnoty jsou uvedeny v tabulkách 7 – 10.

Tabulka 7 VP GM 15 – Měření tvrdosti [zdroj: vlastní]

Měření	Hodnota po 24 hod. tvrdost Sh° A	Hodnota po 48 hod. tvrdost Sh° A	Hodnota po 72 hod. tvrdost Sh° A	Hodnota po 96 hod. tvrdost Sh° A	Hodnota po 120 hod. tvrdost Sh° A	Hodnota po 168 hod. tvrdost Sh° A	Hodnota po 216 hod. tvrdost Sh° A	Hodnota po 264 hod. tvrdost Sh° A
1	15,6	15,7	15,3	15,5	15,7	15,8	15,5	15,3
2	15,5	15,6	15,1	15,9	15,7	15,7	15,5	15,5
3	15,4	15,6	15,5	15,7	15,9	15,5	15,5	15,8
4	15,7	15,7	15,5	15,7	15,8	15,5	15,7	15,7
5	15,6	15,5	15,5	15,5	15,9	15,4	15,6	15,5
6	15,6	15,8	15,5	15,6	15,5	15,8	15,3	15,3
7	15,7	15,7	15,5	15,8	15,4	15,9	15,5	15,6
8	15,5	15,5	15,7	15,5	15,8	15,2	15,5	15,6
9	15,8	15,3	15,3	15,4	15,9	15,5	15,5	15,3
10	15,7	15,1	15,3	15,5	15,7	15,4	15,5	15,7
11	15,6	15,8	15,8	15,8	15,6	15,4	15,6	15,3
12	15,3	15,6	15,9	15,9	15,7	15,3	15,7	15,5
13	15,1	15,5	15,8	15,6	15,6	15,8	15,6	15,4
14	15,7	15,4	15,2	15,5	15,5	15,7	15,5	15,8
15	15,5	15,6	15,2	15,8	15,8	15,5	15,5	15,7
16	15,8	15,7	15,4	15,7	15,9	15,5	15,5	15,5
17	15,7	15,6	15,6	15,8	15,7	15,5	15,5	15,6
18	15,3	15,6	15,6	15,5	16	15,4	15,5	15,6
19	15,6	15,6	15,5	15,4	15,8	15,7	15,5	15,5
20	15,5	15,6	15,4	15,5	15,7	15,4	15,5	15,4
<b>Průměr</b>	<b>15,6</b>	<b>15,6</b>	<b>15,5</b>	<b>15,6</b>	<b>15,7</b>	<b>15,5</b>	<b>15,5</b>	<b>15,5</b>
<b>Medián</b>	<b>15,6</b>	<b>15,6</b>	<b>15,5</b>	<b>15,6</b>	<b>15,7</b>	<b>15,5</b>	<b>15,5</b>	<b>15,5</b>
<b>Maximální hodnota</b>	15,8	15,8	15,9	15,9	16,0	15,9	15,7	15,8
<b>Minimální hodnota</b>	15,1	15,1	15,1	15,4	15,4	15,2	15,3	15,3
<b>Variační rozpětí</b>	<b>0,700</b>	<b>0,700</b>	<b>0,800</b>	<b>0,500</b>	<b>0,600</b>	<b>0,700</b>	<b>0,400</b>	<b>0,500</b>

Tabulka 8 Cenusil M 810 – Měření tvrdosti [zdroj: vlastní]

Měření	Hodnota po 24 hod. tvrdost Sh° A	Hodnota po 48 hod. tvrdost Sh° A	Hodnota po 72 hod. tvrdost Sh° A	Hodnota po 96 hod. tvrdost Sh° A	Hodnota po 120 hod. tvrdost Sh° A	Hodnota po 168 hod. tvrdost Sh° A	Hodnota po 216 hod. tvrdost Sh° A	Hodnota po 264 hod. tvrdost Sh° A
1	13,4	12,8	12,8	12,7	12,8	13,3	13,2	12,9
2	12,5	12,5	12,7	12,9	13,2	13,2	13,3	12,7
3	12,3	12,8	12,8	13,3	13,3	12,9	13,3	13,3
4	12	13,2	12,9	13,5	13	12,8	13,3	13,1
5	12,6	13,3	12,9	13,4	12,8	12,9	12,9	13,5
6	12,9	12,7	12,8	12,8	12,7	13,4	12,7	12,6
7	13,1	12,9	13,3	13,1	12,8	13,1	12,9	13,4
8	12,8	13,3	13,3	12,7	13,2	13	13,1	12,7
9	12,7	13,1	12,8	13	12,9	12,9	13,2	12,9
10	13,3	12,9	13	13,2	12,8	12,7	13,4	13,1
11	12,8	13	12,9	12,9	13	13,3	12,8	13,2
12	12,7	12,9	12,7	12,8	13,4	13,1	12,6	13,2
13	12,9	13,2	12,8	13,4	13,5	13,2	13,1	13,1
14	13,5	13,4	12,7	13,5	12,9	12,9	13,2	12,8
15	13,4	12,7	13,2	13,1	13,2	12,7	12,6	12,9
16	13,3	12,8	13,1	12,6	12,9	13,5	13,4	13,3
17	13,1	12,9	12,8	12,8	13,1	12,7	13,3	13,4
18	13	12,9	12,9	12,9	13,2	13,5	13,1	12,8
19	12,9	12,8	13,4	13,1	13	13,4	13	13,3
20	12,7	12,7	13,1	13	12,8	12,9	12,9	12,9
<b>Průměr</b>	<b>12,9</b>	<b>12,9</b>	<b>12,9</b>	<b>13,0</b>	<b>13,0</b>	<b>13,1</b>	<b>13,1</b>	<b>13,1</b>
<b>Medián</b>	<b>12,9</b>	<b>12,9</b>	<b>12,9</b>	<b>13,0</b>	<b>13,0</b>	<b>13,1</b>	<b>13,1</b>	<b>13,1</b>
<b>Maximální hodnota</b>	13,5	13,4	13,4	13,5	13,5	13,5	13,4	13,5
<b>Minimální hodnota</b>	12,0	12,5	12,7	12,6	12,7	12,7	12,6	12,6
<b>Variační rozpětí</b>	<b>1,500</b>	<b>0,900</b>	<b>0,700</b>	<b>0,900</b>	<b>0,800</b>	<b>0,800</b>	<b>0,800</b>	<b>0,900</b>

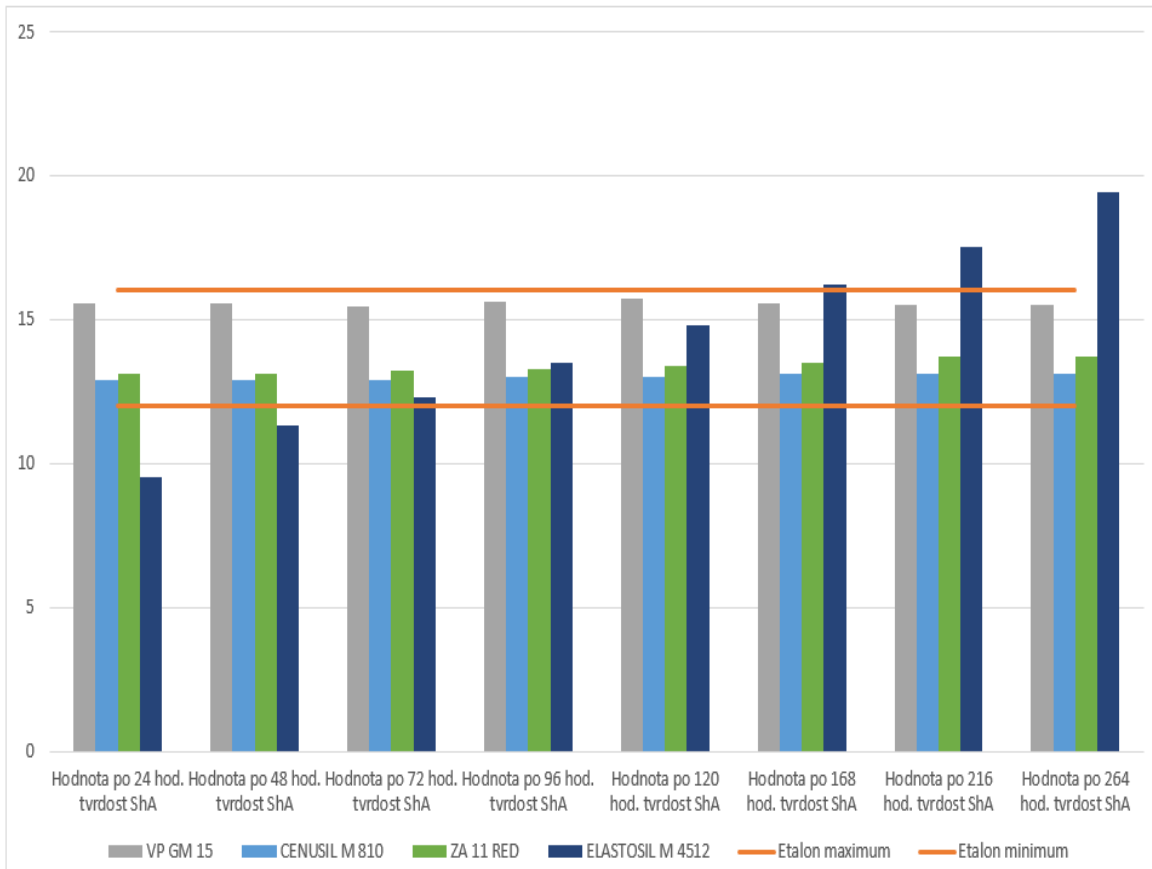


### 6.1.3 Vyhodnocení tvrdosti

Pro celkové vyhodnocení je vybrán jako etalon měření hodnota průměru z naměřených tvrdostí Sh A, v každém časovém úseku pro jednotlivé materiály. Na základě doporučení od výrobce sádry, používané pro výrobu sádrových jader, jsou určeny hodnoty pro minimální a maximální tvrdost pryžového materiálu. Tato tvrdost je nastavena od hodnoty 12 Sh A do 16 Sh A, což jsou hodnoty zaručující tvarovou stabilitu a bezvadné uvolnění sádry při odformování.

Srovnání tvrdosti ShA u materiálů s požadovanými parametry

Materiál	Hodnota po 24 hod. tvrdost ShA	Hodnota po 48 hod. tvrdost ShA	Hodnota po 72 hod. tvrdost ShA	Hodnota po 96 hod. tvrdost ShA	Hodnota po 120 hod. tvrdost ShA	Hodnota po 168 hod. tvrdost ShA	Hodnota po 216 hod. tvrdost ShA	Hodnota po 264 hod. tvrdost ShA
Etalon maximum	16	16	16	16	16	16	16	16
Etalon minimum	12	12	12	12	12	12	12	12
VP GM 15	15,6	15,6	15,5	15,6	15,7	15,5	15,5	15,5
CENUSIL M 810	12,9	12,9	12,9	13	13	13,1	13,1	13,1
ZA 11 RED	13,1	13,1	13,2	13,3	13,4	13,5	13,7	13,7
ELASTOSIL M 4512	9,5	11,3	12,3	13,5	14,8	16,2	17,5	19,4



Graf 1 Celkové porovnání tvrdosti testovaných materiálů [zdroj: vlastní]

Při selekci záznamů je patrná nestabilita materiálu Elastosil M 4512, kdy je pouze 38 % výsledků vyhodnoceno jako vyhovující.

*Tabulka 11 Vyhodnocení použitelnosti [zdroj: vlastní]*

Materiál	Počet záznamů	Procento vyhovujících hodnot	Vyhodnocení použitelnosti
VP GM 15	160	100%	ANO
CENUSIL M 810	160	100%	ANO
ZA 11 RED	160	100%	ANO
ELASTOSIL M 4512	160	38%	NE

Na základě vyhodnocení je materiál Elastosil M 4512 hodnocen jako nevyhovující a pro další experimenty je vyřazen.

## 6.2 Viskozita

Tvarově náročné oblasti a rozměrová minima použitelná pro gravitační odlévání hliníkových odlitků, jsou jedním z důvodů, proč je nutno se zabývat viskozitou zpracovaného materiálu. Viskozita samotná však nemůže ukázat, zda je materiál schopen zatéct a dostatečně zrelaxovat na kritická místa, je nutno tento proces sledovat v čase, s ohledem na samotné síťování hmoty.

### 6.2.1 Metoda měření

Aby všechny kritéria bylo možno změřit a následně přesně vyhodnotit, bylo k tomuto účelu zvoleno zařízení v laboratořích Centra Polymerních Systémů Univerzity Tomáše Bati. Jedná se o rotační reometr Anton Paar MCR 502. Reometr je schopen vyhodnotit viskoelastické a reologické vlastnosti polymerních materiálů ve formě taveniny, suspenzí či past, v podmínkách vyžadující teploty až 300°C případně tlak až 15 MPa.



Obrázek 14 Reometr Anton Paar MCR 502 [zdroj: vlastní]

Pro toto zařízení a zkoušené materiály bylo zvoleno principu deska – deska, při oscilační frekvenci 1 Hz na 1 % amplitudy. Testování probíhalo při pokojové teplotě a běžného atmosférického tlaku.

Data Series Information	
Name:	Cenusil M 810 - Silikon
Sample:	Cenusil M 810 - Silikon
Number of Intervals:	1
Application:	RHEOPLUS/32 V3.61 21005944-33057
Device:	MCR502 SN81065332; FW3.65; Adj(524,0)d
Measuring Date/Time:	3.5.2018; 15:16 odp.
Measuring System:	PP25-SN27812; [d=0,7 mm]
Accessories:	TU1=P-PTD200/TG+H-PTD200-SN81026623-81064212
Calculating Constants:	
- Norm. Csr [min/s]:	1,3077717
- Norm. Ccs [Pa/mNm]:	326,86631
- Start Delay Time [s]:	10,356
- Substance Density [rho]:	1 000
- Measurement Type:	1
- Axial Compliance [m/N]:	1,00E-06
- Position [m]:	1,00E-06
Interval:	
Interval:	1
Number of Data Points:	3 500
Time Setting:	
Time Setting:	3 500 Meas. Pts.
Measuring Profile:	
Amplitude gamma = 1 %	
Frequency f = 1 Hz	

*Tabulka 12 Nastavení parametrů reometru pro Cenusil M 810 Vyhodnocení použitelnosti*  
[zdroj: vlastní]

Počet nastavených intervalů je nastaven na 3500 záznamových bodů. Průběh měření je zaznamenáván do procesoru zařízení a následně vyhodnocen originálním softwarem.

Vlastnosti vhodné k vyhodnocení jsou tyto:

- Viskozita materiálu komplexní
- Elastický modul
- Ztrátový modul

Tyto vlastnosti materiálu jsou klíčové pro následné použití materiálu jako přesnosti, zpracování, zatékavosti do geometricky náročných drážek a figur, které jsou častěji používány u nových dezénů pneumatik.

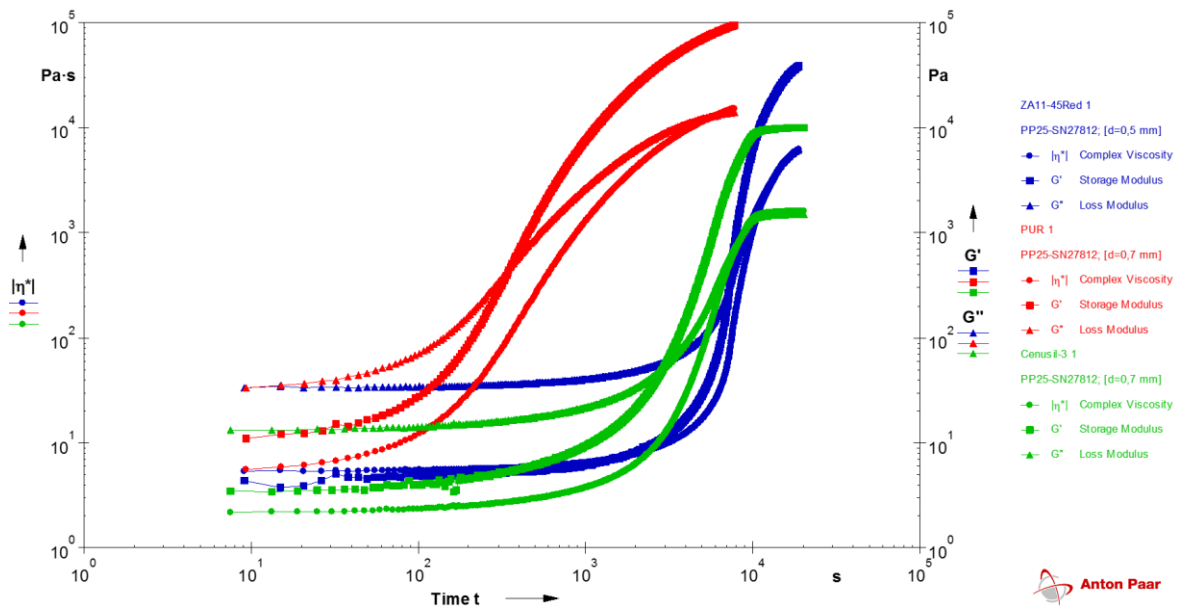
## 6.2.2 Naměřené hodnoty

Po ukončení sběru dat je provedeno vyhodnocení počátku síťování, neboť tato hodnota ukazuje, zda je materiál schopen v časové úsečce dostatečně zrelaxovat. Proces síťování pak může být zahájen eliminovat nežádoucí vlivy smrštění.

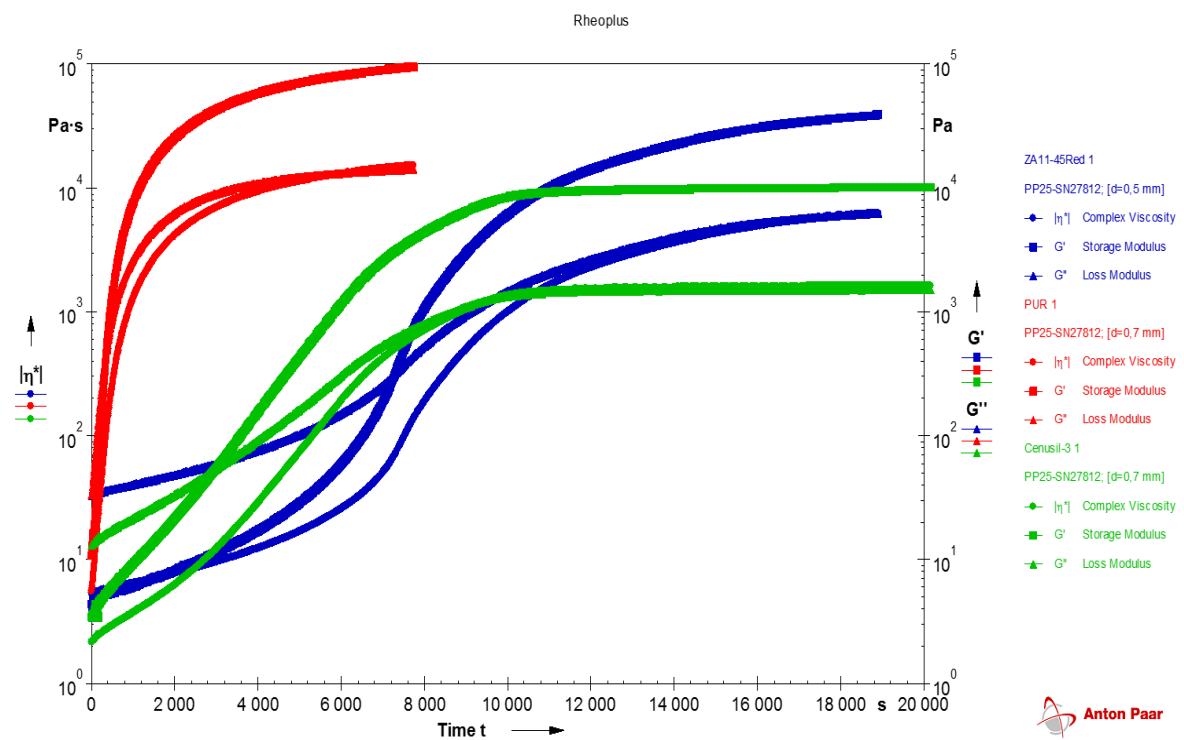
Tabulka 13 Hodnoty z reometru pro ZA 11 RED Vyhodnocení použitelnosti [zdroj: vlastní]

Měřicí Bod	Čas	Dynamická Viskozita	Soufázový Modul	Ztrátový Modul	Otáčky	Úhlová Frekvence	Útlumový Faktor	Úhel vychýlení
	[s]	[Pa·s]	[Pa]	[Pa]	[μNm]	[rad/s]	[1]	[mrad]
1	9	5,37	4,38	33,40	1,03	6,28	7,64	0,40
2	15	5,48	3,76	34,20	1,06	6,28	9,10	0,40
3	21	5,31	3,88	33,10	1,02	6,28	8,54	0,40
4	26	5,40	4,38	33,60	1,04	6,28	7,68	0,40
5	32	5,41	5,10	33,60	1,04	6,28	6,59	0,40
6	38	5,38	4,70	33,50	1,03	6,28	7,13	0,40
7	44	5,39	4,67	33,50	1,04	6,28	7,18	0,40
8	50	5,41	4,52	33,70	1,04	6,28	7,46	0,40
9	55	5,40	4,65	33,60	1,04	6,28	7,23	0,40
10	61	5,41	4,71	33,70	1,04	6,28	7,15	0,40
11	67	5,43	4,74	33,80	1,04	6,28	7,13	0,40
12	73	5,44	4,74	33,80	1,05	6,28	7,14	0,40
13	78	5,44	4,69	33,80	1,05	6,28	7,22	0,40
14	84	5,52	4,97	34,30	1,06	6,28	6,90	0,40
15	90	5,47	4,84	34,00	1,05	6,28	7,04	0,40
16	96	5,48	4,85	34,10	1,05	6,28	7,03	0,40
17	101	5,51	4,90	34,30	1,06	6,28	6,99	0,40
18	107	5,47	4,80	34,00	1,05	6,28	7,09	0,40
19	113	5,49	4,35	34,20	1,06	6,28	7,86	0,40
20	119	5,50	4,84	34,20	1,06	6,28	7,07	0,40
21	124	5,52	4,98	34,30	1,06	6,28	6,89	0,40
22	130	5,51	4,85	34,30	1,06	6,28	7,07	0,40
23	136	5,50	5,06	34,20	1,06	6,28	6,77	0,40
24	142	5,53	4,80	34,40	1,06	6,28	7,16	0,40
25	147	5,54	4,79	34,50	1,07	6,28	7,21	0,40
26	153	5,54	4,92	34,50	1,07	6,28	7,02	0,40
27	159	5,56	4,95	34,60	1,07	6,28	6,99	0,40
28	165	5,56	4,96	34,60	1,07	6,28	6,96	0,40
29	170	5,57	4,91	34,70	1,07	6,28	7,06	0,40
30	176	5,57	4,95	34,60	1,07	6,28	7,00	0,40
31	182	5,59	4,88	34,80	1,07	6,28	7,13	0,40
32	188	5,58	4,99	34,70	1,07	6,28	6,96	0,40
33	193	5,59	4,95	34,80	1,07	6,28	7,02	0,40
34	199	5,60	5,01	34,90	1,08	6,28	6,95	0,40
35	205	5,61	5,02	34,90	1,08	6,28	6,95	0,40
36	211	5,61	5,02	34,90	1,08	6,28	6,96	0,40
37	216	5,61	5,03	34,90	1,08	6,28	6,94	0,40
38	222	5,64	5,09	35,10	1,08	6,28	6,89	0,40
39	228	5,63	5,09	35,00	1,08	6,28	6,88	0,40
40	234	5,63	5,00	35,00	1,08	6,28	7,01	0,40
41	239	5,64	5,03	35,10	1,09	6,28	6,97	0,40
42	245	5,65	5,10	35,20	1,09	6,28	6,89	0,40
43	251	5,66	5,07	35,20	1,09	6,28	6,94	0,40
44	257	5,66	5,09	35,20	1,09	6,28	6,92	0,40
45	263	5,67	5,10	35,30	1,09	6,28	6,92	0,40
46	268	5,67	5,07	35,30	1,09	6,28	6,96	0,40

Na níže uvedeném grafu je jasně patrné, kdy u jednotlivých materiálů začíná proces síťování. Jako nejrychlejší pro síťování se jeví materiál VP GM 15 Polyuretan, který zahajuje síťování v čase okolo 1 minuty. Je proto patrné že materiál má velmi málo času k relaxaci a bude u něj problematické zabíhání do jemných drážek. Dalším negativním faktorem může být smrštění zesíťovaného materiálu.



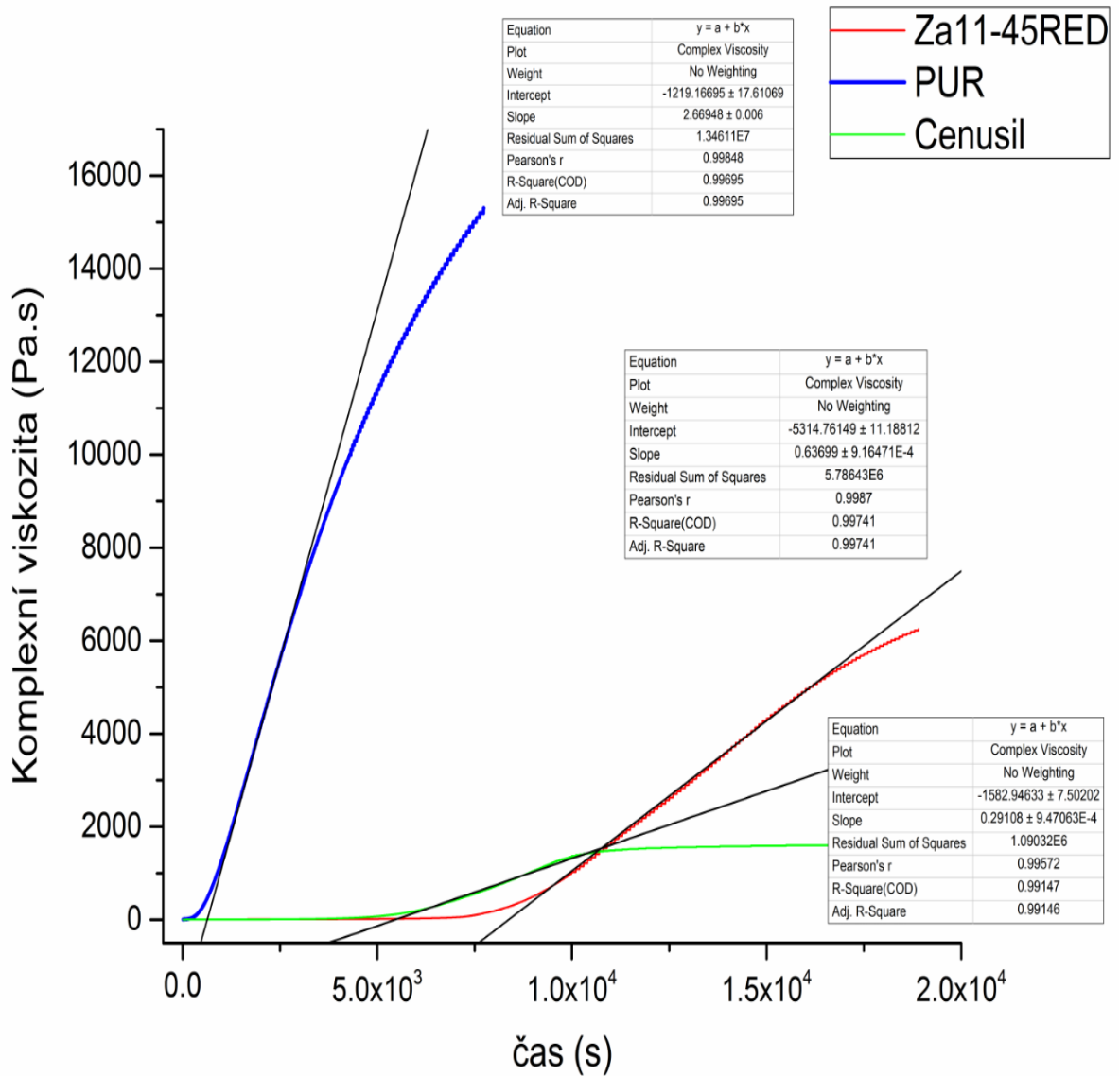
Graf 2 Síťování materiálů a body gelace [zdroj: vlastní]



Graf 3 Síťování materiálů v čase [zdroj: vlastní]



Čas zahájení síťování u materiálu ZA 11 RED je 144 minut po zpracování smícháním obou složek A + B. U materiálu Cenusil M 810, pozorujeme lineární síťovací proces po 95 minutách od prvního smíchání složek A + B. Jako poslední je vyhodnocen materiál Polyuretan VP GM 15. Lineární síťování nastalo po 8 minutách od zpracování.



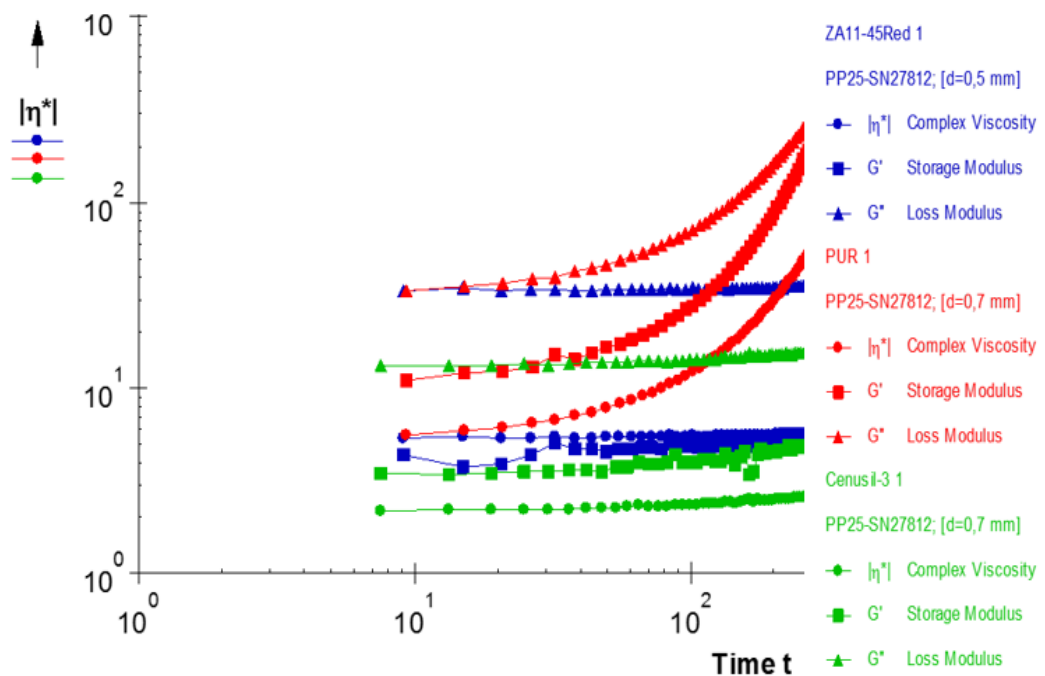
Graf 4 Zobrazení síťování materiálů v časové ose [zdroj: vlastní]

Dalším ze sledovaných parametrů byla viskozita materiálu po smíchání všech složek systému. Materiálové listy zpravidla uvádí viskozity jednotlivých složek a v případě směsí se o viskozitě detailně neinformuje. Proto bylo nutno změřit tyto hodnoty po smíchání a srovnat výsledné hodnoty s požadavkem na viskozitu pod 10 000 mPa.s. Detaily hodnot je možno vidět na vyobrazeném grafu číslo 6, kde je komplexní viskozita zvýrazněna formou kulatých bodů na spojnicí.

### 6.2.3 Vyhodnocení viskozity a síťování

Viskozita měřených materiálů byla velmi nízké hodnoty, proto vyhodnocení ukazuje požadovanou úroveň viskozity:

- Nejnižší hodnotu viskozity vykazuje materiál Cenusil M 810 a to okolo 1 500 mPa.s
- Jako druhý se jeví materiál VP GM 15 Polyuretan s hodnotou 4 500 mPa.s
- Třetím hodnoceným materiálem je Silikon ZA 11 RED s podobnou úrovní viskozity jako předešlý PUR a sice 5 000 mPa.s



Graf 5 Vyhodnocení komplexní viskozity [zdroj: vlastní]

Materiály se oproti úrovni viskozity chovaly odlišně. Polyuretan zahájil síťování pouze 8 minut po smíchání a jeho křivka strmě stoupala s úrovní stoupajícího odporu materiálu. Silikonové materiály se chovaly velmi podobně. Materiál Cenusil M 810 zahájil síťování po 95 minutách a materiál ZA 11 RED jej následoval s odstupem 50 minut.

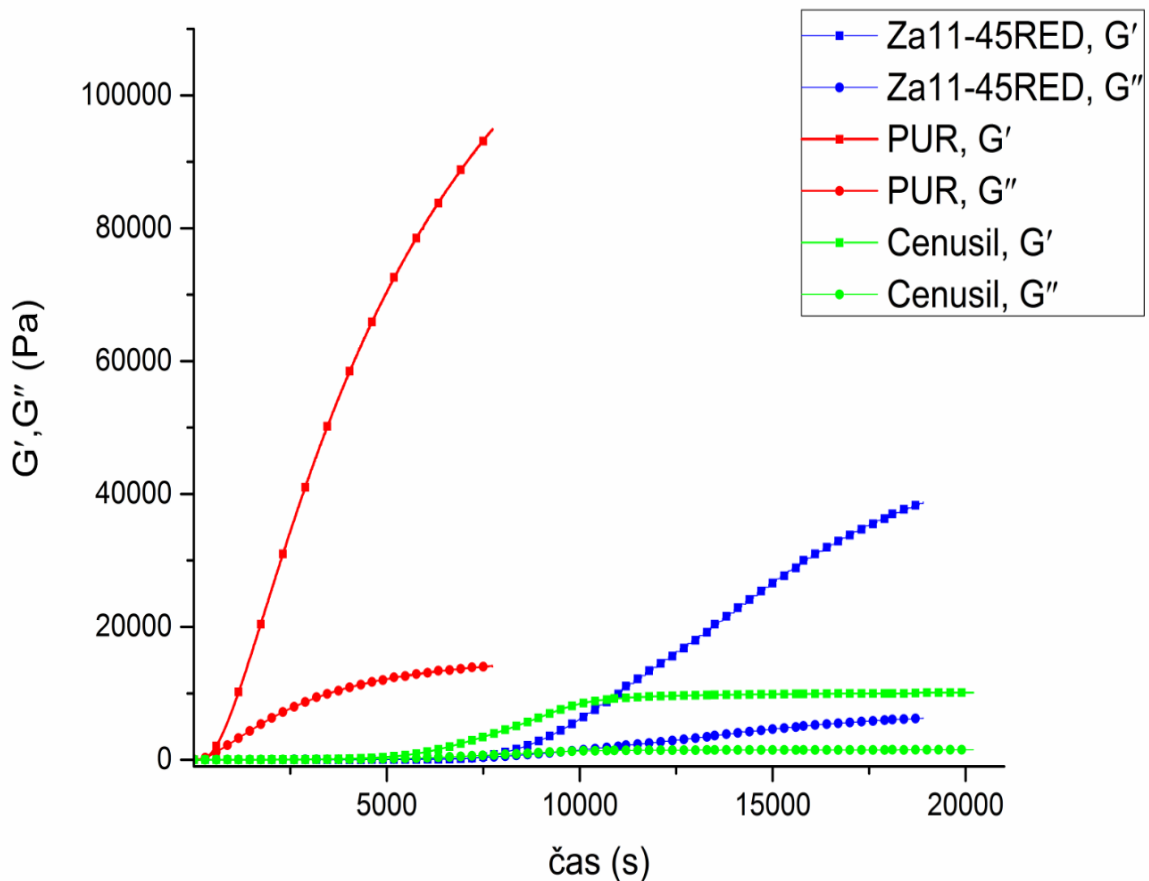
Všechny materiály splnily hodnotu viskozity podle požadovaných kritérií. Úroveň rychlosti síťování měl odlišný od základního požadavku pouze polyuretan VP GM 15, který tento

proces začal velmi brzy od smíchání složek a naplnění formy hmotou. Nelze však jednoznačně materiál vyloučit, neboť při kombinaci s nízkou viskozitou je možné tento nepříznivý vliv eliminovat.

#### 6.2.4 Vyhodnocení gelace

Při vyhodnocení testovaných parametrů byl reometrem změřen bod gelace. Jedná se o stav, v němž doposud tekutá hmota začíná vykazovat pseudoplastické vlastnosti. Tato hodnota se na grafu projeví jako průsečík obou modulů a dále následuje již netekoucí fáze.

Pro hodnocení použití je tento bod důležitý, neboť od tohoto okamžiku do plného zatuhnutí není doporučeno se sestavou nijak manipulovat. Při možné manipulaci totiž dochází k ořesům a tuhnutí materiál by se mohl deformovat a negativně tak ovlivnit žádaný výsledek.



Graf 6 Moduly síťování [zdroj: vlastní]

Na základě dosažených výsledků doporučuji všechny testované materiály k dalším experimentům.

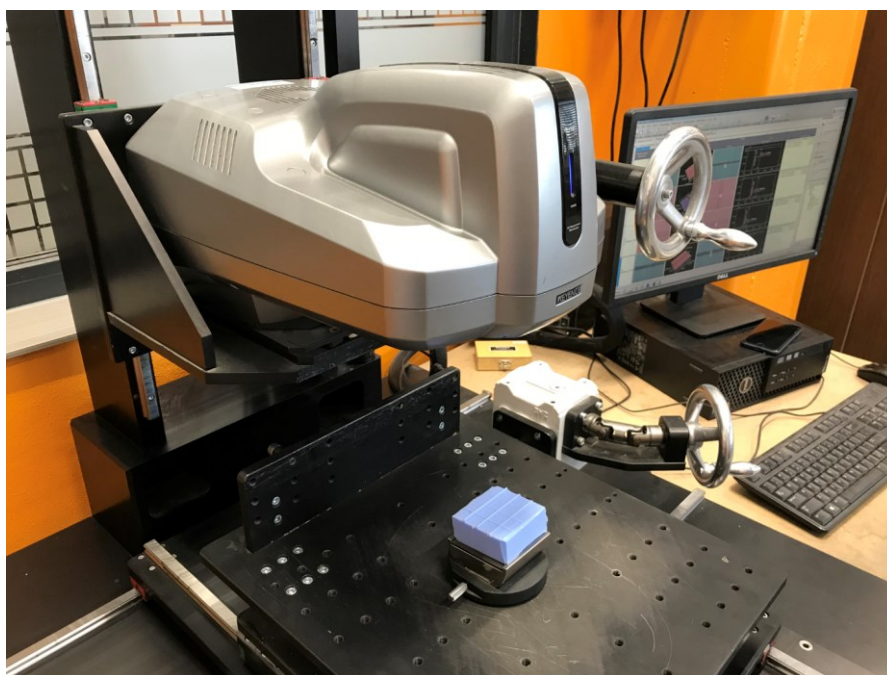
### 6.3 Smrštění

Smrštění, neboli změna objemové velikosti materiálu, je poměrně typická pro většinu polymerních materiálů. U zvolených materiálů tuto vlastnost nezpůsobí vysoké teploty vzniklé při zpracování a jejich následná změna, ale chemický proces polymerace probíhající při síťování elastomerů. Rozdíl mezi velikostí figur v modelu a přeneseným otiskem z pryžového materiálu, ukazuje primární schopnost daného materiálu přebírat požadované tvarové vlastnosti. Na základě výstupů je následně možno nadefinovat úpravu modelu pro správné přenesení požadovaného rozměru.

#### 6.3.1 Metoda měření

Volba vhodného způsobu měření je důležitá nejen pro přesnost vyhodnocení, ale také fakt, že rozměrové změny výrobku nemusí být ve všech směrech lineární. Proto byl při volbě měřicího zařízení brán ohled na vyhodnocení rozměrů ve všech osách současně. Jako nejvhodnější se jeví zařízení s možností 3D snímání obrazu a vhodnou rozlišovací schopností možnosti až 200 násobného zoomu.

Zařízení Keyence VR – 3100 3D využívá snímání odrazu světla, které samo generuje a přenáší do systému snímačů a kamer potřebných k vyhodnocení. Zařízení je schopno velmi detailně snímat profilování, zakřivení i drsnost povrchu. Všechna data je také schopno exportovat jako soubory 3D do CAD a softwarově vyhodnotit



Obrázek 15 Keyence VR-3100 3D [zdroj: vlastní]

Pro měření rozměrových změn a také pro vyhodnocení přeneseného tvaru drážek, byla vyrobena testovací tělesa s definovanou velikostí drážek. Nejprve byly měřeny drážky dílu z materiálu Ebaboard 0780 používaného k výrobě modelů. Následně vyhodnoceny otisky vzniklé zafomováním modelu a zaplněním všemi materiály vybranými k testování.



*Obrázek 16 Vzorky určené k testování [zdroj: vlastní]*

Každý ze vzorků byl měřen na několika místech s úmyslem eliminace náhodných chyb a lokálních defektů, které by tak ovlivnily celkový výsledek. Celkový počet měřených drážek bylo 6 u všech pryžových materiálů. Při 15 opakovaných měření jednotlivé drážky, tak proběhlo u každého materiálu 90 změřených řezů. Pro vyhodnocení objemových změn se tak jedná o poměrně rozsáhlý soubor hodnot, který má dostatečnou vypovídající hodnotu o deformaci daného materiálu.

Flexibel se používá i pro výrobu sériových forem, což vede k opětovnému používání po několika dnech. Z dlouhodobého sledování opakovatelnosti forem, bylo nastaveno maximální stáří flexibelu na 11 kalendářních dnů. Opakované měření bylo realizováno z důvodu zjištění, zda u materiálů postupem času nedochází k rozměrovým změnám.

Jelikož by negativní reakce rozdílných materiálů mohlo vyvolat použití stejného modelu, byl pro každý materiál vyroben originál kostky modelu, k němuž je srovnáván konkrétní materiál. Pro ukázkou jsou uvedeny v tabulce 14 a 15, naměřené hodnoty materiálu Ebaboard

0780, který posloužil při experimentu jako etalon pro materiál Cenusil M 810. Detaily měření se záznamem v protokolu jsou uvedeny v tabulce 16 a 17.

Tabulka 14 *Etalon pro drážky 2968/1081  $\mu\text{m}$*  [zdroj: vlastní]

<b>Etalon EBABOARD 0780</b>		
<b>Počet měření</b>	<b>Výška drážky <math>\mu\text{m}</math></b>	<b>Šířka drážky <math>\mu\text{m}</math></b>
1	3020	1100
2	3010	1070
3	3000	1000
4	3000	1110
5	2960	1070
6	2950	1100
7	2910	1090
8	2890	1100
9	2890	1110
10	2930	1090
11	2950	1080
12	2980	1100
13	3000	1090
14	3010	1000
15	3020	1100
<b>Průměrná hodnota <math>\mu\text{m}</math></b>	<b>2968,0</b>	<b>1080,7</b>
<b>Medián <math>\mu\text{m}</math></b>	<b>2980</b>	<b>1090</b>
<b>Maximální hodnota</b>	<b>3020,0</b>	<b>1110,0</b>
<b>Minimální hodnota</b>	<b>2890,0</b>	<b>1000,0</b>
<b>Variační rozpětí</b>	<b>130,0</b>	<b>110,0</b>

Tabulka 15 Etalon pro drážky 367,2/492,1  $\mu\text{m}$  [zdroj: vlastní]

<b>Etalon EBABOARD 0780</b>		
<b>Počet měření</b>	<b>Výška drážky <math>\mu\text{m}</math></b>	<b>Šířka drážky <math>\mu\text{m}</math></b>
1	370	486
2	370	492
3	369	496
4	368	498
5	368	489
6	368	494
7	367	491
8	367	494
9	367	488
10	367	492
11	366	493
12	366	489
13	365	491
14	365	489
15	365	500
<b>Průměrná hodnota <math>\mu\text{m}</math></b>	<b>367,2</b>	<b>492,1</b>
<b>Medián <math>\mu\text{m}</math></b>	<b>367</b>	<b>492</b>
<b>Maximální hodnota</b>	<b>370,0</b>	<b>500,0</b>
<b>Minimální hodnota</b>	<b>365,0</b>	<b>486,0</b>
<b>Variační rozpětí</b>	<b>5,0</b>	<b>14,0</b>

Tabulka 16 Měřicí stopy 1 Etalonu Ebaboard 0780 [zdroj: vlastní]

Measurement data name	Optical	3D	Optical	Profile graph	Measured values												
01 Ebaboard 0780					<table border="1"> <thead> <tr> <th>No.</th> <th>Measurement name</th> <th>Measured value</th> <th>Unit</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>Point - Point (Horz)1</td> <td>1,07</td> <td>mm</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>Point - Point (Vert)1</td> <td>3,01</td> <td>mm</td> </tr> </tbody> </table>	No.	Measurement name	Measured value	Unit	1	Point - Point (Horz)1	1,07	mm	2	Point - Point (Vert)1	3,01	mm
No.	Measurement name	Measured value	Unit														
1	Point - Point (Horz)1	1,07	mm														
2	Point - Point (Vert)1	3,01	mm														
02 Ebaboard 0780					<table border="1"> <thead> <tr> <th>No.</th> <th>Measurement name</th> <th>Measured value</th> <th>Unit</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>Point - Point (Horz)1</td> <td>1,10</td> <td>mm</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>Point - Point (Vert)1</td> <td>2,00</td> <td>mm</td> </tr> </tbody> </table>	No.	Measurement name	Measured value	Unit	1	Point - Point (Horz)1	1,10	mm	2	Point - Point (Vert)1	2,00	mm
No.	Measurement name	Measured value	Unit														
1	Point - Point (Horz)1	1,10	mm														
2	Point - Point (Vert)1	2,00	mm														
03 Ebaboard 0780					<table border="1"> <thead> <tr> <th>No.</th> <th>Measurement name</th> <th>Measured value</th> <th>Unit</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>Point - Point (Horz)1</td> <td>1,10</td> <td>mm</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>Point - Point (Vert)1</td> <td>1,05</td> <td>mm</td> </tr> </tbody> </table>	No.	Measurement name	Measured value	Unit	1	Point - Point (Horz)1	1,10	mm	2	Point - Point (Vert)1	1,05	mm
No.	Measurement name	Measured value	Unit														
1	Point - Point (Horz)1	1,10	mm														
2	Point - Point (Vert)1	1,05	mm														
04 Ebaboard 0780					<table border="1"> <thead> <tr> <th>No.</th> <th>Measurement name</th> <th>Measured value</th> <th>Unit</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>Point - Point (Horz)1</td> <td>0,51</td> <td>mm</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>Point - Point (Vert)1</td> <td>0,99</td> <td>mm</td> </tr> </tbody> </table>	No.	Measurement name	Measured value	Unit	1	Point - Point (Horz)1	0,51	mm	2	Point - Point (Vert)1	0,99	mm
No.	Measurement name	Measured value	Unit														
1	Point - Point (Horz)1	0,51	mm														
2	Point - Point (Vert)1	0,99	mm														
05 Ebaboard 0780					<table border="1"> <thead> <tr> <th>No.</th> <th>Measurement name</th> <th>Measured value</th> <th>Unit</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>Point - Point (Horz)1</td> <td>0,52</td> <td>mm</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>Point - Point (Vert)1</td> <td>0,69</td> <td>mm</td> </tr> </tbody> </table>	No.	Measurement name	Measured value	Unit	1	Point - Point (Horz)1	0,52	mm	2	Point - Point (Vert)1	0,69	mm
No.	Measurement name	Measured value	Unit														
1	Point - Point (Horz)1	0,52	mm														
2	Point - Point (Vert)1	0,69	mm														
06 Ebaboard 0780					<table border="1"> <thead> <tr> <th>No.</th> <th>Measurement name</th> <th>Measured value</th> <th>Unit</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>Point - Point (Horz)1</td> <td>0,48</td> <td>mm</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>Point - Point (Vert)1</td> <td>0,37</td> <td>mm</td> </tr> </tbody> </table>	No.	Measurement name	Measured value	Unit	1	Point - Point (Horz)1	0,48	mm	2	Point - Point (Vert)1	0,37	mm
No.	Measurement name	Measured value	Unit														
1	Point - Point (Horz)1	0,48	mm														
2	Point - Point (Vert)1	0,37	mm														

Tabulka 17 Měřicí stopy 2 Etalonu Ebaboard 0780 [zdroj: vlastní]

Measurement data name	Optical	3D	Optical	Profile graph	Measured values												
01 Ebaboard 0780					<table border="1"> <thead> <tr> <th>No.</th> <th>Measurement name</th> <th>Measured value</th> <th>Unit</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>Point - Point (Horz)1</td> <td>1,10</td> <td>mm</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>Point - Point (Vert)1</td> <td>3,02</td> <td>mm</td> </tr> </tbody> </table>	No.	Measurement name	Measured value	Unit	1	Point - Point (Horz)1	1,10	mm	2	Point - Point (Vert)1	3,02	mm
No.	Measurement name	Measured value	Unit														
1	Point - Point (Horz)1	1,10	mm														
2	Point - Point (Vert)1	3,02	mm														
02 Ebaboard 0780					<table border="1"> <thead> <tr> <th>No.</th> <th>Measurement name</th> <th>Measured value</th> <th>Unit</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>Point - Point (Horz)1</td> <td>1,10</td> <td>mm</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>Point - Point (Vert)1</td> <td>2,00</td> <td>mm</td> </tr> </tbody> </table>	No.	Measurement name	Measured value	Unit	1	Point - Point (Horz)1	1,10	mm	2	Point - Point (Vert)1	2,00	mm
No.	Measurement name	Measured value	Unit														
1	Point - Point (Horz)1	1,10	mm														
2	Point - Point (Vert)1	2,00	mm														
03 Ebaboard 0780					<table border="1"> <thead> <tr> <th>No.</th> <th>Measurement name</th> <th>Measured value</th> <th>Unit</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>Point - Point (Horz)1</td> <td>1,10</td> <td>mm</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>Point - Point (Vert)1</td> <td>1,05</td> <td>mm</td> </tr> </tbody> </table>	No.	Measurement name	Measured value	Unit	1	Point - Point (Horz)1	1,10	mm	2	Point - Point (Vert)1	1,05	mm
No.	Measurement name	Measured value	Unit														
1	Point - Point (Horz)1	1,10	mm														
2	Point - Point (Vert)1	1,05	mm														
04 Ebaboard 0780					<table border="1"> <thead> <tr> <th>No.</th> <th>Measurement name</th> <th>Measured value</th> <th>Unit</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>Point - Point (Horz)1</td> <td>0,51</td> <td>mm</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>Point - Point (Vert)1</td> <td>0,99</td> <td>mm</td> </tr> </tbody> </table>	No.	Measurement name	Measured value	Unit	1	Point - Point (Horz)1	0,51	mm	2	Point - Point (Vert)1	0,99	mm
No.	Measurement name	Measured value	Unit														
1	Point - Point (Horz)1	0,51	mm														
2	Point - Point (Vert)1	0,99	mm														
05 Ebaboard 0780					<table border="1"> <thead> <tr> <th>No.</th> <th>Measurement name</th> <th>Measured value</th> <th>Unit</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>Point - Point (Horz)1</td> <td>0,52</td> <td>mm</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>Point - Point (Vert)1</td> <td>0,69</td> <td>mm</td> </tr> </tbody> </table>	No.	Measurement name	Measured value	Unit	1	Point - Point (Horz)1	0,52	mm	2	Point - Point (Vert)1	0,69	mm
No.	Measurement name	Measured value	Unit														
1	Point - Point (Horz)1	0,52	mm														
2	Point - Point (Vert)1	0,69	mm														
06 Ebaboard 0780					<table border="1"> <thead> <tr> <th>No.</th> <th>Measurement name</th> <th>Measured value</th> <th>Unit</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>Point - Point (Horz)1</td> <td>0,48</td> <td>mm</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>Point - Point (Vert)1</td> <td>0,37</td> <td>mm</td> </tr> </tbody> </table>	No.	Measurement name	Measured value	Unit	1	Point - Point (Horz)1	0,48	mm	2	Point - Point (Vert)1	0,37	mm
No.	Measurement name	Measured value	Unit														
1	Point - Point (Horz)1	0,48	mm														
2	Point - Point (Vert)1	0,37	mm														



### 6.3.2 Naměřené hodnoty

U měřených materiálů jsou uvedené hodnoty naměřeny jako šířka a výška žebek, vzniklé s připravených drážek. Postupně jsou zobrazeny v pořadí, ve kterém byly vyhodnoceny:

- Silikon Cenusil M 810
- Silikon ZA 11 RED
- Polyuretan VP GM 15

První drážka byla frézována stopkovou frézou o průměru 1 mm do hloubky 3 mm. Tuto přenesenou drážku nazveme pro testování žebrem. Druhá drážka byla frézována podobným nástrojem o jmenovitém průměru 0,5 mm do nastavené hloubky 0,3 mm. Tuto drážku při testování definujeme jako strukturu, neboť tento rozměr je často konstruktéry využíván pro přenesení jemných struktur do desénové části formy.

Pro první porovnání testovaných materiálů budou vyhodnocovány naměřené hodnoty 24 hodin po zpracování. Záměrem je srovnání naměřených hodnot každého materiálu s ohledem na nastalou rozměrovou deformaci, neboli smrštění. Hodnocení v tabulce je přeneseno na rozměry drážky a struktury z každého testovaného modelu – Etalonu. Rozměrové chování materiálu je důležité pro nastavení smrštění, či jiné rozměrové úpravy modelu.

U druhého testování se budeme soustředit na rozměrovou stálost, neboť flexibilové formy se používají i s definovaným časovým odstupem pro použití u sériových forem. Časový rozsah je stanoven od 24 hodin po 264 hodin od zpracování. Sledovaná hodnota se vztahuje k hodnotě naměřené po 24 hodinách, která je v tabulkách nastavena jako 100 %. Zde pozorujeme tvarovou stabilitu materiálu. Pokud by u materiálů nastávaly rozměrové změny, mělo by to velký význam na použití materiálu pro opakované formy.

- Silikon Cenasil M 810 polyadiční

Tabulka 18 Cenasil M 810 měřicí protokol [zdroj: vlastní]

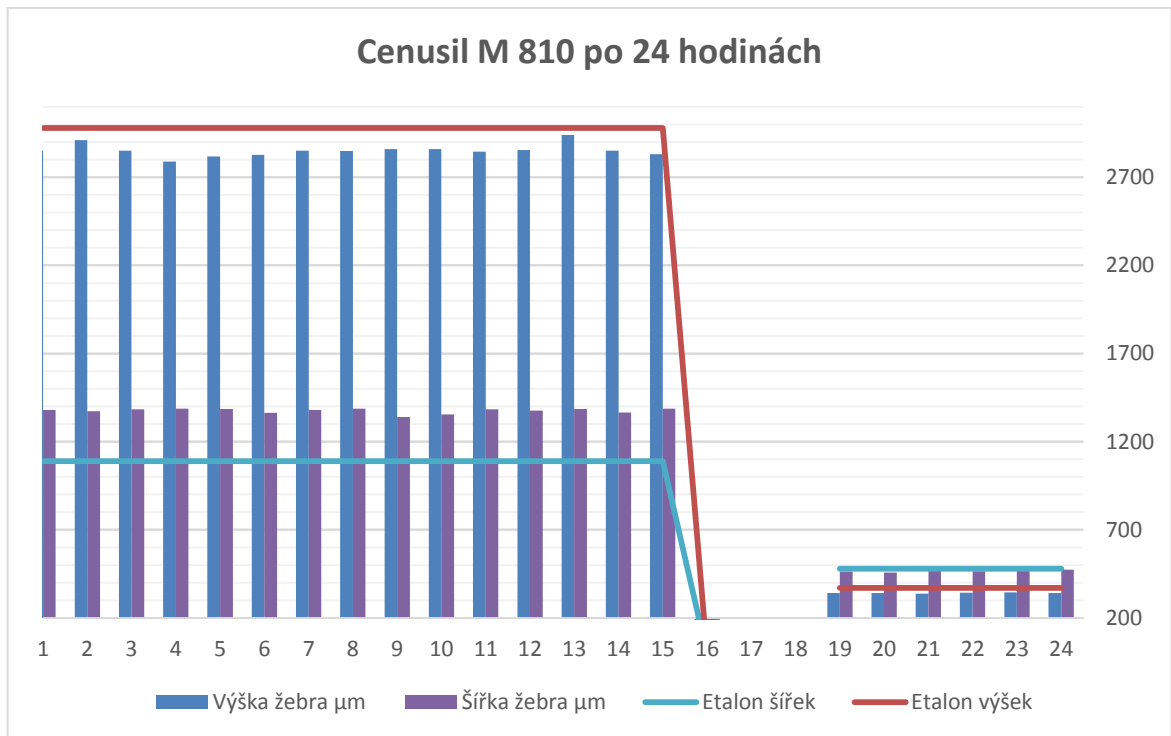
Measurement data name	Optical	3D	Profile	Perp.1	Measured values												
Cenasil M810					<table border="1"> <thead> <tr> <th>No.</th> <th>Measurement name</th> <th>Measured value</th> <th>Unit</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>Point - Point (Horz)1</td> <td>1383,554</td> <td>µm</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>Point - Point (Vert)1</td> <td>2848,969</td> <td>µm</td> </tr> </tbody> </table>	No.	Measurement name	Measured value	Unit	1	Point - Point (Horz)1	1383,554	µm	2	Point - Point (Vert)1	2848,969	µm
No.	Measurement name	Measured value	Unit														
1	Point - Point (Horz)1	1383,554	µm														
2	Point - Point (Vert)1	2848,969	µm														
Cenasil M810					<table border="1"> <thead> <tr> <th>No.</th> <th>Measurement name</th> <th>Measured value</th> <th>Unit</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>Point - Point (Horz)1</td> <td>1382,842</td> <td>µm</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>Point - Point (Vert)1</td> <td>2859,894</td> <td>µm</td> </tr> </tbody> </table>	No.	Measurement name	Measured value	Unit	1	Point - Point (Horz)1	1382,842	µm	2	Point - Point (Vert)1	2859,894	µm
No.	Measurement name	Measured value	Unit														
1	Point - Point (Horz)1	1382,842	µm														
2	Point - Point (Vert)1	2859,894	µm														
Cenasil M810					<table border="1"> <thead> <tr> <th>No.</th> <th>Measurement name</th> <th>Measured value</th> <th>Unit</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>Point - Point (Horz)1</td> <td>1384,303</td> <td>µm</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>Point - Point (Vert)1</td> <td>2860,023</td> <td>µm</td> </tr> </tbody> </table>	No.	Measurement name	Measured value	Unit	1	Point - Point (Horz)1	1384,303	µm	2	Point - Point (Vert)1	2860,023	µm
No.	Measurement name	Measured value	Unit														
1	Point - Point (Horz)1	1384,303	µm														
2	Point - Point (Vert)1	2860,023	µm														
Cenasil M810					<table border="1"> <thead> <tr> <th>No.</th> <th>Measurement name</th> <th>Measured value</th> <th>Unit</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>Point - Point (Horz)1</td> <td>1383,703</td> <td>µm</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>Point - Point (Vert)1</td> <td>2846,191</td> <td>µm</td> </tr> </tbody> </table>	No.	Measurement name	Measured value	Unit	1	Point - Point (Horz)1	1383,703	µm	2	Point - Point (Vert)1	2846,191	µm
No.	Measurement name	Measured value	Unit														
1	Point - Point (Horz)1	1383,703	µm														
2	Point - Point (Vert)1	2846,191	µm														
Cenasil M810					<table border="1"> <thead> <tr> <th>No.</th> <th>Measurement name</th> <th>Measured value</th> <th>Unit</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>Point - Point (Horz)1</td> <td>1380,481</td> <td>µm</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>Point - Point (Vert)1</td> <td>2852,812</td> <td>µm</td> </tr> </tbody> </table>	No.	Measurement name	Measured value	Unit	1	Point - Point (Horz)1	1380,481	µm	2	Point - Point (Vert)1	2852,812	µm
No.	Measurement name	Measured value	Unit														
1	Point - Point (Horz)1	1380,481	µm														
2	Point - Point (Vert)1	2852,812	µm														

Tabulka 19 Cenasil M 810 měřicí protokol [zdroj: vlastní]

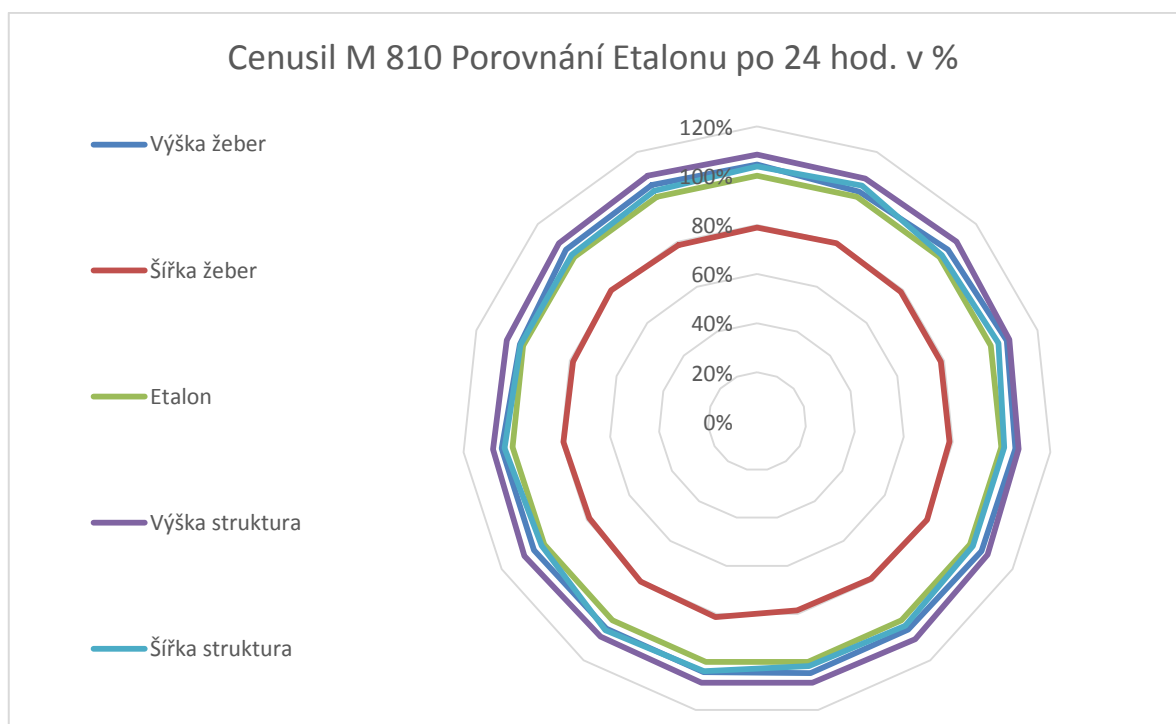
Measurement data name	Optical	3D	Profile	Perp.1	Measured values												
Cenasil M810					<table border="1"> <thead> <tr> <th>No.</th> <th>Measurement name</th> <th>Measured value</th> <th>Unit</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>Point - Point (Vert)1</td> <td>323,123</td> <td>µm</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>Point - Point (Horz)1</td> <td>470,415</td> <td>µm</td> </tr> </tbody> </table>	No.	Measurement name	Measured value	Unit	1	Point - Point (Vert)1	323,123	µm	2	Point - Point (Horz)1	470,415	µm
No.	Measurement name	Measured value	Unit														
1	Point - Point (Vert)1	323,123	µm														
2	Point - Point (Horz)1	470,415	µm														
Cenasil M810					<table border="1"> <thead> <tr> <th>No.</th> <th>Measurement name</th> <th>Measured value</th> <th>Unit</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>Point - Point (Vert)1</td> <td>321,712</td> <td>µm</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>Point - Point (Horz)1</td> <td>474,557</td> <td>µm</td> </tr> </tbody> </table>	No.	Measurement name	Measured value	Unit	1	Point - Point (Vert)1	321,712	µm	2	Point - Point (Horz)1	474,557	µm
No.	Measurement name	Measured value	Unit														
1	Point - Point (Vert)1	321,712	µm														
2	Point - Point (Horz)1	474,557	µm														
Cenasil M810					<table border="1"> <thead> <tr> <th>No.</th> <th>Measurement name</th> <th>Measured value</th> <th>Unit</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>Point - Point (Vert)1</td> <td>324,539</td> <td>µm</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>Point - Point (Horz)1</td> <td>481,080</td> <td>µm</td> </tr> </tbody> </table>	No.	Measurement name	Measured value	Unit	1	Point - Point (Vert)1	324,539	µm	2	Point - Point (Horz)1	481,080	µm
No.	Measurement name	Measured value	Unit														
1	Point - Point (Vert)1	324,539	µm														
2	Point - Point (Horz)1	481,080	µm														
Cenasil M810					<table border="1"> <thead> <tr> <th>No.</th> <th>Measurement name</th> <th>Measured value</th> <th>Unit</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>Point - Point (Vert)1</td> <td>341,086</td> <td>µm</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>Point - Point (Horz)1</td> <td>483,198</td> <td>µm</td> </tr> </tbody> </table>	No.	Measurement name	Measured value	Unit	1	Point - Point (Vert)1	341,086	µm	2	Point - Point (Horz)1	483,198	µm
No.	Measurement name	Measured value	Unit														
1	Point - Point (Vert)1	341,086	µm														
2	Point - Point (Horz)1	483,198	µm														
Cenasil M810					<table border="1"> <thead> <tr> <th>No.</th> <th>Measurement name</th> <th>Measured value</th> <th>Unit</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>Point - Point (Vert)1</td> <td>317,375</td> <td>µm</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>Point - Point (Horz)1</td> <td>470,127</td> <td>µm</td> </tr> </tbody> </table>	No.	Measurement name	Measured value	Unit	1	Point - Point (Vert)1	317,375	µm	2	Point - Point (Horz)1	470,127	µm
No.	Measurement name	Measured value	Unit														
1	Point - Point (Vert)1	317,375	µm														
2	Point - Point (Horz)1	470,127	µm														

Tabulka 20 Naměřené hodnoty Cenusil M 810 po 24 hodinách [zdroj: vlastní]

<b>Cenusil M 810</b>					
<b>Výška žebra <math>\mu\text{m}</math></b>	<b>Etalon výšek</b>	<b>%</b>	<b>Šířka žebra <math>\mu\text{m}</math></b>	<b>Etalon šířek</b>	<b>%</b>
2850,81	2980	-4,34%	1380,25	1090	26,63%
2910,56	2980	-2,33%	1371,85	1090	25,86%
2850,47	2980	-4,35%	1383,23	1090	26,90%
2790,00	2980	-6,38%	1386,86	1090	27,23%
2818,29	2980	-5,43%	1384,95	1090	27,06%
2827,71	2980	-5,11%	1364,47	1090	25,18%
2850,27	2980	-4,35%	1379,26	1090	26,54%
2849,37	2980	-4,38%	1387,24	1090	27,27%
2860,29	2980	-4,02%	1340,33	1090	22,97%
2860,51	2980	-4,01%	1354,78	1090	24,29%
2846,32	2980	-4,49%	1383,86	1090	26,96%
2853,68	2980	-4,24%	1376,69	1090	26,30%
2940,47	2980	-1,33%	1384,67	1090	27,03%
2850,11	2980	-4,36%	1365,52	1090	25,28%
2830,61	2980	-5,01%	1388,00	1090	27,34%
<b>Výška struktury <math>\mu\text{m}</math></b>	<b>Etalon výšek</b>	<b>%</b>	<b>Šířka struktury <math>\mu\text{m}</math></b>	<b>Etalon šířek</b>	<b>%</b>
340,53	370	-7,96%	462,56	480	-3,63%
341,89	370	-7,60%	457,23	480	-4,74%
338,56	370	-8,50%	474,65	480	-1,11%
342,73	370	-7,37%	464,84	480	-3,16%
345,63	370	-6,59%	474,56	480	-1,13%
341,58	370	-7,68%	473,69	480	-1,31%
337,94	370	-8,66%	467,25	480	-2,66%
340,55	370	-7,96%	471,86	480	-1,70%



Graf 7 Porovnání naměřených hodnot u Cenusil M 810 s Modelem po 24 hodinách [zdroj: vlastní]



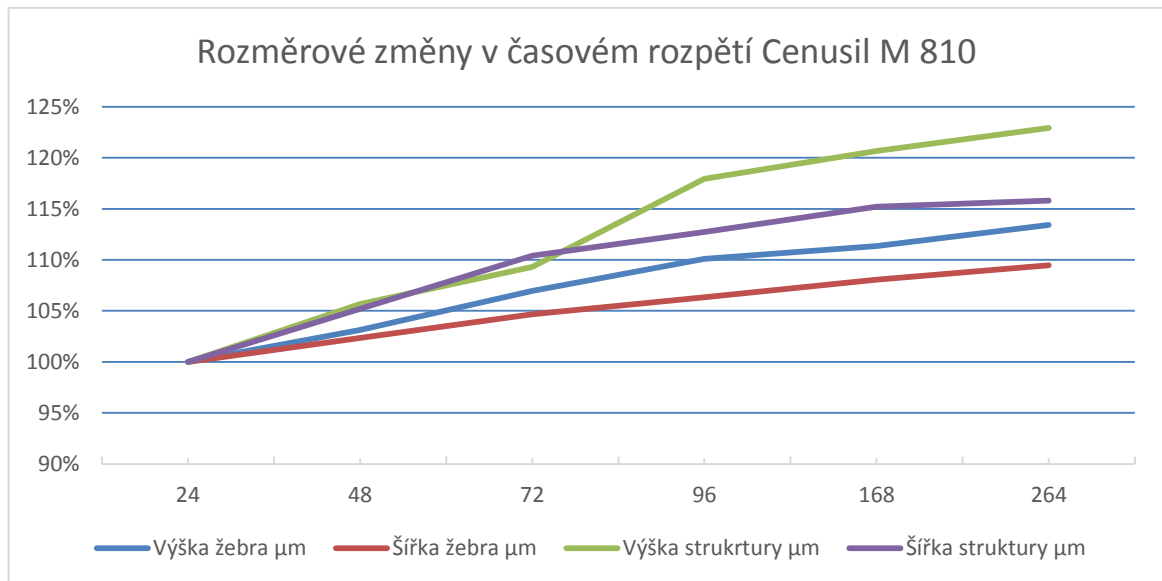
Graf 8 Porovnání smrštění žeber a struktur u Cenusil M 810 po 24 hodinách [zdroj: vlastní]

Tabulka 21 Rozměrové změny materiálu v daném časovém úseku [zdroj: vlastní]

Materiál	Cenusil M 810				
	Doba od zpracování hod.	Výška žebra $\mu\text{m}$	Šířka žebra $\mu\text{m}$	Výška struktury $\mu\text{m}$	Šířka struktury $\mu\text{m}$
	24	2852,63	1375,46	341,18	468,33
	48	2942,00	1407,81	360,55	492,68
	72	3051,24	1439,86	372,92	517,03
	96	3140,61	1462,74	402,34	527,94
	168	3176,12	1486,38	411,71	539,51
	264	3235,49	1505,73	419,38	542,29
<b>Průměrná hodnota <math>\mu\text{m}</math></b>		<b>3109,09</b>	<b>1460,50</b>	<b>393,38</b>	<b>523,89</b>
<b>Maximální hodnota</b>		<b>3235,49</b>	<b>1505,73</b>	<b>419,38</b>	<b>542,29</b>
<b>Minimální hodnota</b>		<b>2942,00</b>	<b>1407,81</b>	<b>360,55</b>	<b>492,68</b>
<b>Variační rozpětí</b>		<b>293,49</b>	<b>97,92</b>	<b>58,83</b>	<b>49,61</b>

Tabulka 22 Procentní změny materiálu v daném časovém úseku [zdroj: vlastní]

Materiál	Cenusil M 810				
	Doba od zpracování hod.	Výška žebra $\mu\text{m}$	Šířka žebra $\mu\text{m}$	Výška struktury $\mu\text{m}$	Šířka struktury $\mu\text{m}$
	24	100%	100%	100%	100%
	48	103,13%	102,35%	105,68%	105,21%
	72	106,96%	104,68%	109,30%	110,40%
	96	110,10%	106,35%	117,93%	112,73%
	168	111,34%	108,06%	120,67%	115,20%
	264	113,42%	109,47%	122,92%	115,79%
<b>Průměrná hodnota <math>\mu\text{m}</math></b>		<b>108,99%</b>	<b>106,18%</b>	<b>115,30%</b>	<b>111,87%</b>
<b>Maximální hodnota</b>		<b>113,42%</b>	<b>109,47%</b>	<b>122,92%</b>	<b>115,79%</b>
<b>Minimální hodnota</b>		<b>100,00%</b>	<b>100,00%</b>	<b>100,00%</b>	<b>100,00%</b>
<b>Variační rozpětí</b>		<b>13,42%</b>	<b>9,47%</b>	<b>22,92%</b>	<b>15,79%</b>



Graf 9 Grafické vyjádření rozměrových změn v daném čase [zdroj: vlastní]

### Vyhodnocení smrštění

U materiálu Cenusil M 810 měřeného po 24 hodinách, byly zjištěny tyto hodnoty:

- U výšek žebor se pohybuje průměr -4,27 % smrštění a medián -4,35 %
- Naopak u šířek žebor se pohybuje průměr 26,19 % narůstání a medián 26,63 %
- U výšek struktur se pohybuje průměr -7,79 % smrštění a medián -7,82 %
- Šířky struktur vykazují hodnoty průměru -2,43 % smrštění a medián -2,18 %

Při měření s časovým odstupem, byla vyhodnocena změna rozměrů následovně:

- Výška žebor vykazuje nárůst, kde variační rozpětí činí 13,42 %
- U šířky žebor je hodnoty variačního rozpětí 9,47 % také jako nárůst
- Struktury mají také efekt nárůstu, neboť variační rozpětí výšky má hodnotu 22,92 %
- Šířka struktur pak vyhodnotilo variační rozpětí na hodnotu nárůstu o 15,79 %

Z těchto hodnot vyplývá, že materiál Cenusil M 810 vykazuje ve většině rozměrů po zpracování smrštění, až na šířky velkých žebor, kde bude nutno zohlednit rozměr snížení navrhované geometrické nerovnoměrnosti o 33 % šířky. U hodnot, měřených s definovaným časovým odstupem, je patrný nárůst rozměru ve všech směrech téměř lineárně. Zde bude obtížné používat materiál pro opakované využití u sériových forem.

- Silikon ZA 11 RED polyadiční

Tabulka 23 ZA 11 RED měřící protokol [zdroj: vlastní]

Measurement data name	Optical	3D	Profile graph	Perp.1	Measured values												
ZA 11 Red					<table border="1"> <thead> <tr> <th>No.</th> <th>Measurement name</th> <th>Measured value</th> <th>Unit</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>Point - Point (Horz)1</td> <td>1218,385</td> <td>μm</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>Point - Point (Vert)1</td> <td>2996,749</td> <td>μm</td> </tr> </tbody> </table>	No.	Measurement name	Measured value	Unit	1	Point - Point (Horz)1	1218,385	μm	2	Point - Point (Vert)1	2996,749	μm
No.	Measurement name	Measured value	Unit														
1	Point - Point (Horz)1	1218,385	μm														
2	Point - Point (Vert)1	2996,749	μm														
ZA 11 Red					<table border="1"> <thead> <tr> <th>No.</th> <th>Measurement name</th> <th>Measured value</th> <th>Unit</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>Point - Point (Horz)1</td> <td>1218,441</td> <td>μm</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>Point - Point (Vert)1</td> <td>2996,837</td> <td>μm</td> </tr> </tbody> </table>	No.	Measurement name	Measured value	Unit	1	Point - Point (Horz)1	1218,441	μm	2	Point - Point (Vert)1	2996,837	μm
No.	Measurement name	Measured value	Unit														
1	Point - Point (Horz)1	1218,441	μm														
2	Point - Point (Vert)1	2996,837	μm														
ZA 11 Red					<table border="1"> <thead> <tr> <th>No.</th> <th>Measurement name</th> <th>Measured value</th> <th>Unit</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>Point - Point (Horz)1</td> <td>1218,002</td> <td>μm</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>Point - Point (Vert)1</td> <td>2997,768</td> <td>μm</td> </tr> </tbody> </table>	No.	Measurement name	Measured value	Unit	1	Point - Point (Horz)1	1218,002	μm	2	Point - Point (Vert)1	2997,768	μm
No.	Measurement name	Measured value	Unit														
1	Point - Point (Horz)1	1218,002	μm														
2	Point - Point (Vert)1	2997,768	μm														
ZA 11 Red					<table border="1"> <thead> <tr> <th>No.</th> <th>Measurement name</th> <th>Measured value</th> <th>Unit</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>Point - Point (Horz)1</td> <td>1218,346</td> <td>μm</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>Point - Point (Vert)1</td> <td>2996,749</td> <td>μm</td> </tr> </tbody> </table>	No.	Measurement name	Measured value	Unit	1	Point - Point (Horz)1	1218,346	μm	2	Point - Point (Vert)1	2996,749	μm
No.	Measurement name	Measured value	Unit														
1	Point - Point (Horz)1	1218,346	μm														
2	Point - Point (Vert)1	2996,749	μm														
ZA 11 Red					<table border="1"> <thead> <tr> <th>No.</th> <th>Measurement name</th> <th>Measured value</th> <th>Unit</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>Point - Point (Horz)1</td> <td>1219,773</td> <td>μm</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>Point - Point (Vert)1</td> <td>2998,398</td> <td>μm</td> </tr> </tbody> </table>	No.	Measurement name	Measured value	Unit	1	Point - Point (Horz)1	1219,773	μm	2	Point - Point (Vert)1	2998,398	μm
No.	Measurement name	Measured value	Unit														
1	Point - Point (Horz)1	1219,773	μm														
2	Point - Point (Vert)1	2998,398	μm														

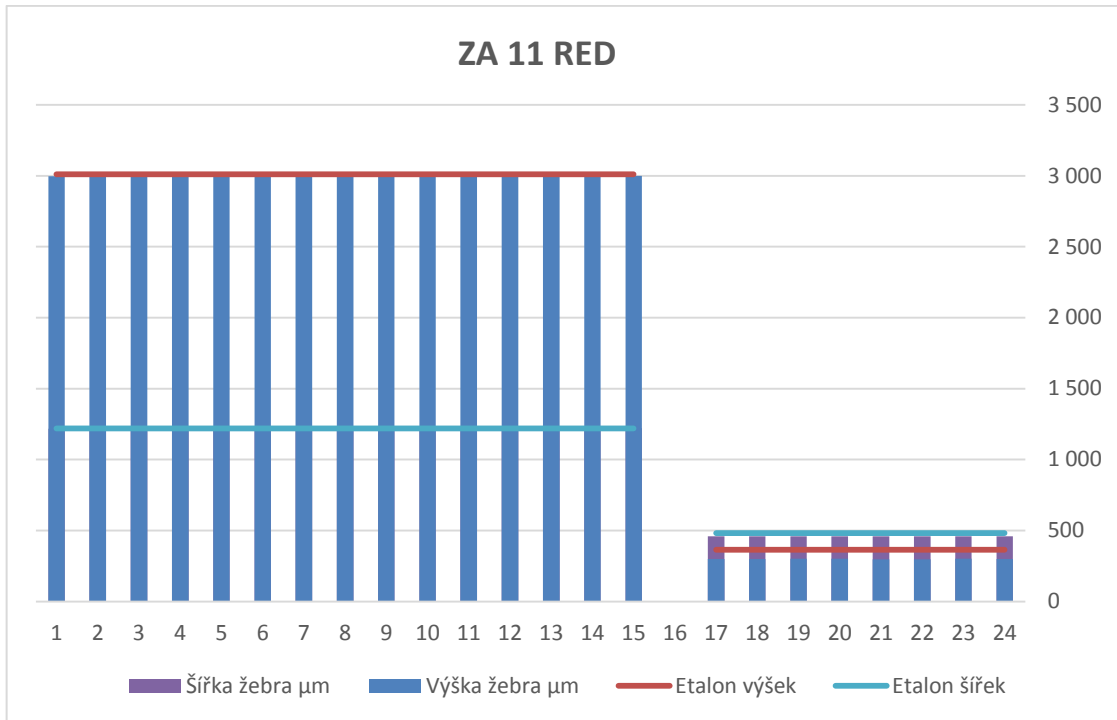
Tabulka 24 ZA 11 RED měřící protokol [zdroj: vlastní]

Measurement data name	Optical	3D	Profile graph	Perp.1	Measured values												
ZA 11 Red					<table border="1"> <thead> <tr> <th>No.</th> <th>Measurement name</th> <th>Measured value</th> <th>Unit</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>Point - Point (Horz)1</td> <td>459,67</td> <td>μm</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>Point - Point (Vert)1</td> <td>297,69</td> <td>μm</td> </tr> </tbody> </table>	No.	Measurement name	Measured value	Unit	1	Point - Point (Horz)1	459,67	μm	2	Point - Point (Vert)1	297,69	μm
No.	Measurement name	Measured value	Unit														
1	Point - Point (Horz)1	459,67	μm														
2	Point - Point (Vert)1	297,69	μm														
ZA 11 Red					<table border="1"> <thead> <tr> <th>No.</th> <th>Measurement name</th> <th>Measured value</th> <th>Unit</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>Point - Point (Horz)1</td> <td>459,65</td> <td>μm</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>Point - Point (Vert)1</td> <td>300,82</td> <td>μm</td> </tr> </tbody> </table>	No.	Measurement name	Measured value	Unit	1	Point - Point (Horz)1	459,65	μm	2	Point - Point (Vert)1	300,82	μm
No.	Measurement name	Measured value	Unit														
1	Point - Point (Horz)1	459,65	μm														
2	Point - Point (Vert)1	300,82	μm														
ZA 11 Red					<table border="1"> <thead> <tr> <th>No.</th> <th>Measurement name</th> <th>Measured value</th> <th>Unit</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>Point - Point (Horz)1</td> <td>461,67</td> <td>μm</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>Point - Point (Vert)1</td> <td>290,03</td> <td>μm</td> </tr> </tbody> </table>	No.	Measurement name	Measured value	Unit	1	Point - Point (Horz)1	461,67	μm	2	Point - Point (Vert)1	290,03	μm
No.	Measurement name	Measured value	Unit														
1	Point - Point (Horz)1	461,67	μm														
2	Point - Point (Vert)1	290,03	μm														
ZA 11 Red					<table border="1"> <thead> <tr> <th>No.</th> <th>Measurement name</th> <th>Measured value</th> <th>Unit</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>Point - Point (Horz)1</td> <td>462,43</td> <td>μm</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>Point - Point (Vert)1</td> <td>299,96</td> <td>μm</td> </tr> </tbody> </table>	No.	Measurement name	Measured value	Unit	1	Point - Point (Horz)1	462,43	μm	2	Point - Point (Vert)1	299,96	μm
No.	Measurement name	Measured value	Unit														
1	Point - Point (Horz)1	462,43	μm														
2	Point - Point (Vert)1	299,96	μm														
ZA 11 Red					<table border="1"> <thead> <tr> <th>No.</th> <th>Measurement name</th> <th>Measured value</th> <th>Unit</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>Point - Point (Horz)1</td> <td>459,49</td> <td>μm</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>Point - Point (Vert)1</td> <td>299,85</td> <td>μm</td> </tr> </tbody> </table>	No.	Measurement name	Measured value	Unit	1	Point - Point (Horz)1	459,49	μm	2	Point - Point (Vert)1	299,85	μm
No.	Measurement name	Measured value	Unit														
1	Point - Point (Horz)1	459,49	μm														
2	Point - Point (Vert)1	299,85	μm														

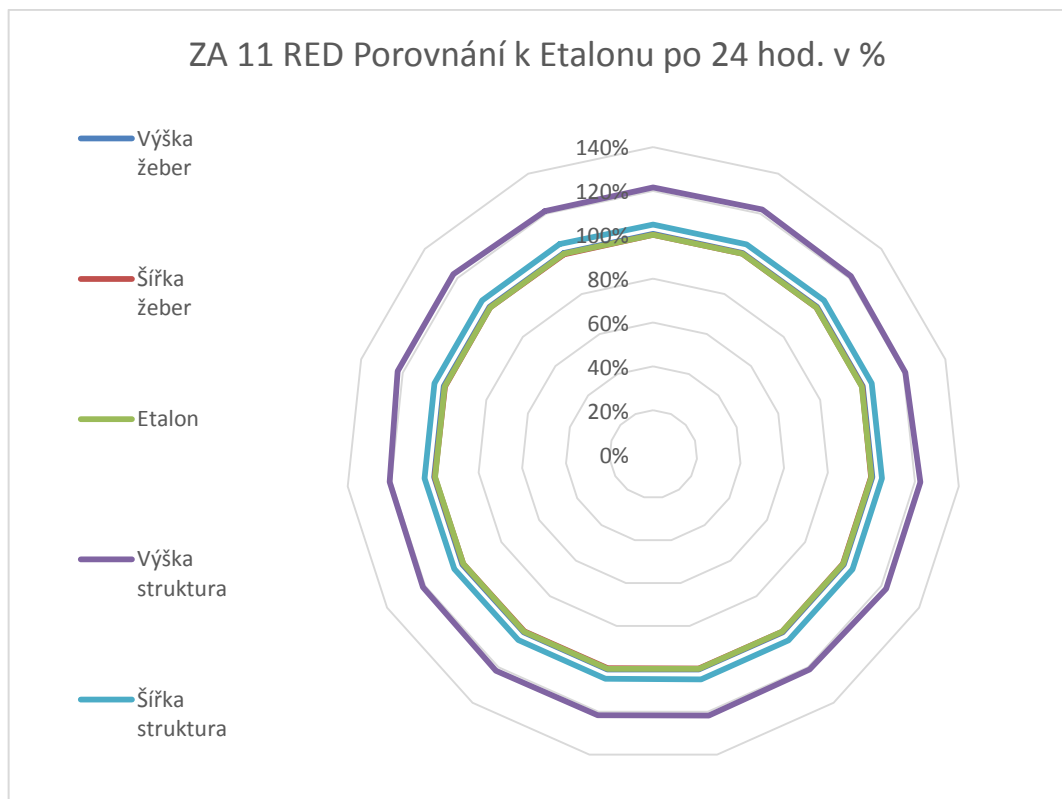
Tabulka 25 Naměřené hodnoty ZA 11 RED [zdroj: vlastní]

ZA 11 RED					
Výška žebra $\mu\text{m}$	Etalon výšek	%	Šířka žebra $\mu\text{m}$	Etalon šířek	%
2996,84	3010	-0,44%	1218,44	1219	-0,05%
2996,75	3010	-0,44%	1218,35	1219	-0,05%
2996,75	3010	-0,44%	1218,39	1219	-0,05%
2997,77	3010	-0,41%	1218,00	1219	-0,08%
2998,11	3010	-0,40%	1220,77	1219	0,15%
2998,40	3010	-0,39%	1219,77	1219	0,06%
2997,84	3010	-0,40%	1220,04	1219	0,09%
2998,38	3010	-0,39%	1221,50	1219	0,21%
2998,51	3010	-0,38%	1221,86	1219	0,23%
2998,24	3010	-0,39%	1221,14	1219	0,18%
2997,97	3010	-0,40%	1220,41	1219	0,12%
2998,12	3010	-0,39%	1218,35	1219	-0,05%
2997,97	3010	-0,40%	1222,23	1219	0,26%
2997,70	3010	-0,41%	1219,68	1219	0,06%
2998,65	3010	-0,38%	1222,22	1219	0,26%
Výška struktury $\mu\text{m}$	Etalon výšek	%	Šířka struktury $\mu\text{m}$	Etalon šířek	%
299,96	365	-17,82%	460,45	482	-4,47%
299,03	365	-18,07%	460,31	482	-4,50%
301,00	365	-17,53%	460,17	482	-4,53%
302,00	365	-17,26%	460,00	482	-4,56%
298,00	365	-18,36%	460,00	482	-4,56%
297,69	365	-18,44%	459,67	482	-4,63%
300,82	365	-17,58%	459,65	482	-4,64%
299,85	365	-17,85%	459,49	482	-4,67%





Graf 10 Porovnání naměřených hodnot materiálu ZA 11 RED s modelem [zdroj: vlastní]



Graf 11 Porovnání smrštění žeber a struktur u materiálu ZA 11 RED [zdroj: vlastní]

Tabulka 26 Rozměrové změny materiálu v daném časovém úseku [zdroj: vlastní]

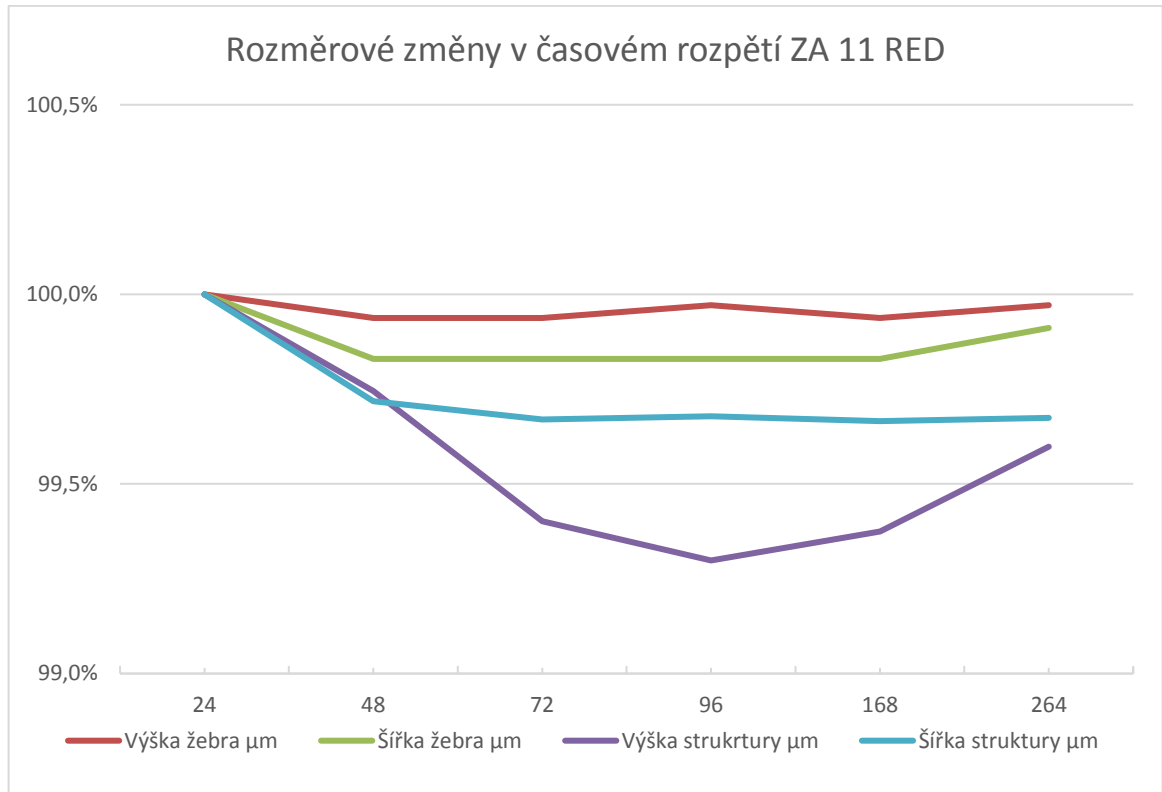
Materiál	ZA 11 RED				
	Doba od zpracování hod.	Výška žebra $\mu\text{m}$	Šířka žebra $\mu\text{m}$	Výška struktury $\mu\text{m}$	Šířka struktury $\mu\text{m}$
	24	2997,87	1220,08	299,79	459,97
	48	2996,00	1218,00	299,03	458,67
	72	2996,00	1218,00	298,00	458,45
	96	2997,00	1218,00	297,69	458,49
	168	2996,00	1218,00	297,62	458,43
	264	2997,00	1219,00	297,59	458,47
<b>Průměrná hodnota <math>\mu\text{m}</math></b>		<b>2996,6</b>	<b>1218,5</b>	<b>298,3</b>	<b>458,7</b>
<b>Medián <math>\mu\text{m}</math></b>		<b>2996,5</b>	<b>1218</b>	<b>297,845</b>	<b>458,48</b>
<b>Maximální hodnota</b>		<b>2997,9</b>	<b>1220,1</b>	<b>299,8</b>	<b>460,0</b>
<b>Minimální hodnota</b>		<b>2996,0</b>	<b>1218,0</b>	<b>297,6</b>	<b>458,4</b>
<b>Variační rozpětí</b>		<b>0,9</b>	<b>1,1</b>	<b>1,2</b>	<b>0,6</b>

Tabulka 27 Procentní změny materiálu v daném časovém úseku [zdroj: vlastní]

Materiál	ZA 11 RED				
	Doba od zpracování hod.	Výška žebra $\mu\text{m}$	Šířka žebra $\mu\text{m}$	Výška struktury $\mu\text{m}$	Šířka struktury $\mu\text{m}$
	24	100%	100%	100%	100%
	48	99,94%	99,83%	99,75%	99,72%
	72	99,94%	99,83%	99,40%	99,67%
	96	99,97%	99,83%	99,30%	99,68%
	168	99,94%	99,83%	99,37%	99,67%
	264	99,97%	99,91%	99,60%	99,67%
<b>Průměrná hodnota <math>\mu\text{m}</math></b>		<b>99,95%</b>	<b>99,85%</b>	<b>99,48%</b>	<b>99,68%</b>
<b>Maximální hodnota</b>		<b>100,00%</b>	<b>100,00%</b>	<b>100,00%</b>	<b>100,00%</b>
<b>Minimální hodnota</b>		<b>99,94%</b>	<b>99,83%</b>	<b>99,30%</b>	<b>99,67%</b>
<b>Variační rozpětí</b>		<b>0,06%</b>	<b>0,17%</b>	<b>0,70%</b>	<b>0,33%</b>

Dalším materiálem k vyhodnocení je Silikon ZA 11 RED, u nějž byly po 24 hodinách od zpracování, zjištěny tyto hodnoty:

- U výšek žeber je průměr shodný s mediánem a to s minimálním smrštěním -0,40 %
- U šířek žeber lze o smrštění či nárůstu polemizovat, neboť identické hodnoty průměru a mediánu jsou pouze 0,09 %
- Výšky struktur vykazují zásadní rozměrovou změnu a to hodnotu smrštění -17,86 % průměru a medián -17,83 %
- Šířky struktur mají vyhodnoceno smrštění -4,57 % a medián -4,56 %



Graf 12 Grafické vyjádření rozměrových změn v daném čase [zdroj: vlastní]

Při vyhodnocení rozměrů naměřených v časovém odstupě je výsledek následovný:

- Výška žebor zůstává téměř nezměněna, kde variační rozpětí činí 0,06 %
- Šířka žebor má hodnoty nárůstu a variační rozpětí 0,17 %
- Struktury mají tu výšek tendenci nárůstu, neboť variační rozpětí má hodnotu 0,70 %
- Šířka struktur pak vyhodnotilo minimální variační rozpětí na hodnotu 0,33 %

Materiál ZA 11 RED je hodnocen ve vztahu k rozměrovým deformacím a nestabilitám velice pozitivně. Při prvním měření byla většina hodnocených rozměrů, téměř v ideální rozměrové shodě s modelem, na kterém bylo testováno. Jediný rozpor byl u výšek struktur, zde se však mohla projevit nedostatečná relaxace materiálu po zalití. Při vyhodnocení rozměrových změn, měřeném v určených časových intervalech, materiál vykazuje významnou stabilitu. Data, která byla naměřena, ukazují velmi nízké navýšení všech hodnot, které nepřevyšuje nárůst o 0,7 %.

- Polyuretan VP GM 15

Tabulka 28 VP GM 15 měřicí protokol [zdroj: vlastní]

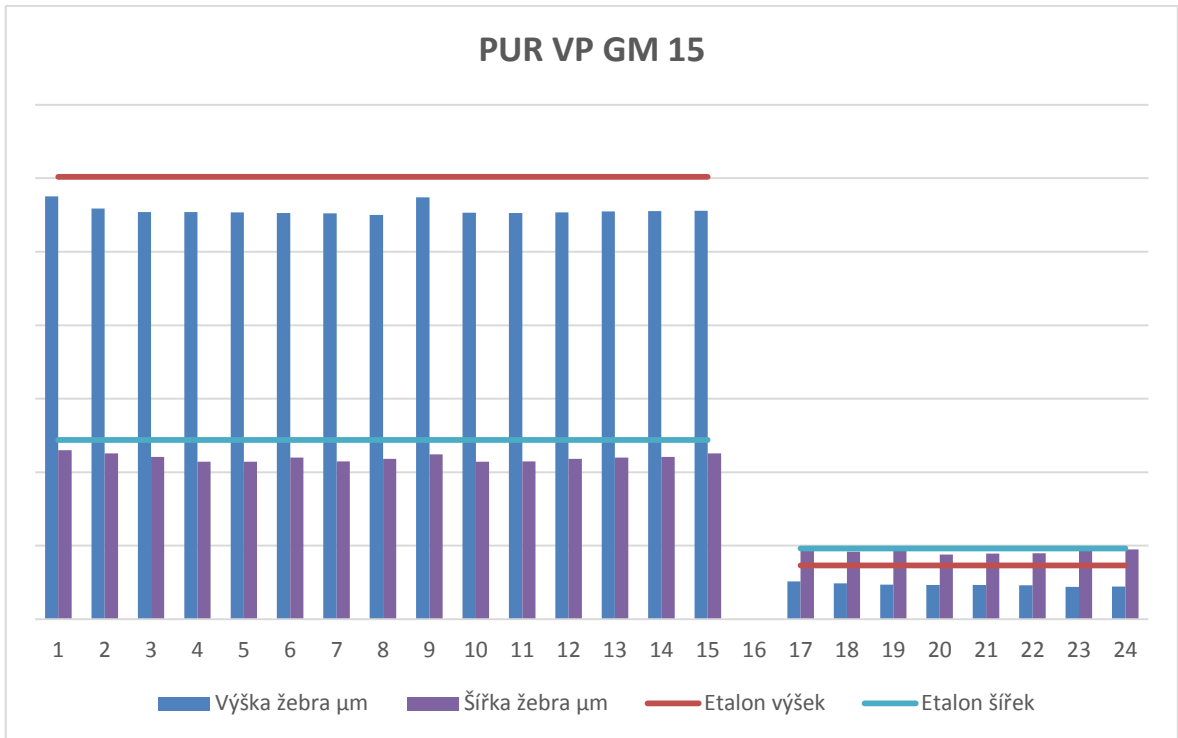
Measurement data name	Optical	3D	Profile graph	Perp.1	Measured values												
VP GM 15					<table border="1"> <thead> <tr> <th>No.</th> <th>Measurement name</th> <th>Measured value</th> <th>Unit</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>Point - Point (Horz)1</td> <td>1172,126</td> <td>µm</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>Point - Point (Vert)1</td> <td>2764,395</td> <td>µm</td> </tr> </tbody> </table>	No.	Measurement name	Measured value	Unit	1	Point - Point (Horz)1	1172,126	µm	2	Point - Point (Vert)1	2764,395	µm
No.	Measurement name	Measured value	Unit														
1	Point - Point (Horz)1	1172,126	µm														
2	Point - Point (Vert)1	2764,395	µm														
VP GM 15					<table border="1"> <thead> <tr> <th>No.</th> <th>Measurement name</th> <th>Measured value</th> <th>Unit</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>Point - Point (Horz)1</td> <td>1191,068</td> <td>µm</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>Point - Point (Vert)1</td> <td>2762,276</td> <td>µm</td> </tr> </tbody> </table>	No.	Measurement name	Measured value	Unit	1	Point - Point (Horz)1	1191,068	µm	2	Point - Point (Vert)1	2762,276	µm
No.	Measurement name	Measured value	Unit														
1	Point - Point (Horz)1	1191,068	µm														
2	Point - Point (Vert)1	2762,276	µm														
VP GM 15					<table border="1"> <thead> <tr> <th>No.</th> <th>Measurement name</th> <th>Measured value</th> <th>Unit</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>Point - Point (Horz)1</td> <td>1197,791</td> <td>µm</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>Point - Point (Vert)1</td> <td>2766,673</td> <td>µm</td> </tr> </tbody> </table>	No.	Measurement name	Measured value	Unit	1	Point - Point (Horz)1	1197,791	µm	2	Point - Point (Vert)1	2766,673	µm
No.	Measurement name	Measured value	Unit														
1	Point - Point (Horz)1	1197,791	µm														
2	Point - Point (Vert)1	2766,673	µm														
VP GM 15					<table border="1"> <thead> <tr> <th>No.</th> <th>Measurement name</th> <th>Measured value</th> <th>Unit</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>Point - Point (Horz)1</td> <td>1204,043</td> <td>µm</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>Point - Point (Vert)1</td> <td>2772,833</td> <td>µm</td> </tr> </tbody> </table>	No.	Measurement name	Measured value	Unit	1	Point - Point (Horz)1	1204,043	µm	2	Point - Point (Vert)1	2772,833	µm
No.	Measurement name	Measured value	Unit														
1	Point - Point (Horz)1	1204,043	µm														
2	Point - Point (Vert)1	2772,833	µm														
VP GM 15					<table border="1"> <thead> <tr> <th>No.</th> <th>Measurement name</th> <th>Measured value</th> <th>Unit</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>Point - Point (Horz)1</td> <td>1227,240</td> <td>µm</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>Point - Point (Vert)1</td> <td>2775,846</td> <td>µm</td> </tr> </tbody> </table>	No.	Measurement name	Measured value	Unit	1	Point - Point (Horz)1	1227,240	µm	2	Point - Point (Vert)1	2775,846	µm
No.	Measurement name	Measured value	Unit														
1	Point - Point (Horz)1	1227,240	µm														
2	Point - Point (Vert)1	2775,846	µm														

Tabulka 29 Naměřené hodnoty VP GM 15 [zdroj: vlastní]

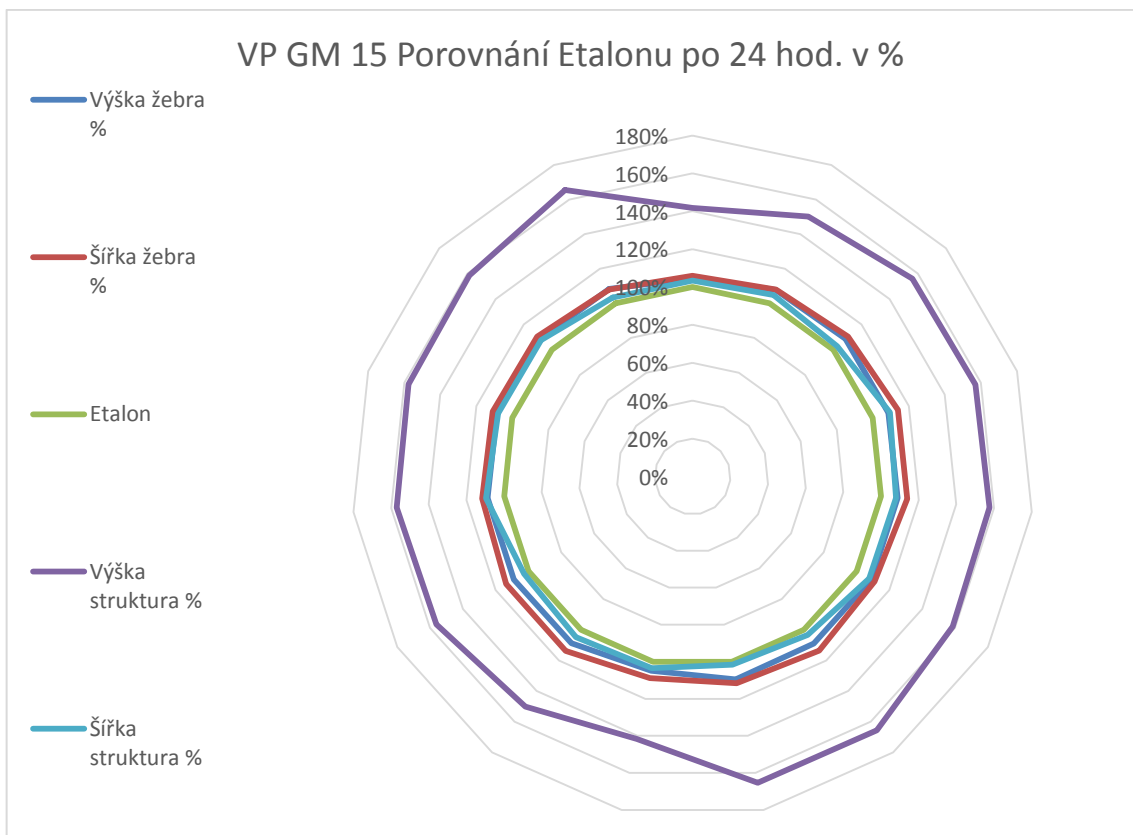
Measurement data name	Optical	3D	Profile graph	Perp.1	Measured values												
VP GM 15					<table border="1"> <thead> <tr> <th>No.</th> <th>Measurement name</th> <th>Measured value</th> <th>Unit</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>Point - Point (Vert)1</td> <td>219,527</td> <td>µm</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>Point - Point (Horz)1</td> <td>424,593</td> <td>µm</td> </tr> </tbody> </table>	No.	Measurement name	Measured value	Unit	1	Point - Point (Vert)1	219,527	µm	2	Point - Point (Horz)1	424,593	µm
No.	Measurement name	Measured value	Unit														
1	Point - Point (Vert)1	219,527	µm														
2	Point - Point (Horz)1	424,593	µm														
VP GM 15					<table border="1"> <thead> <tr> <th>No.</th> <th>Measurement name</th> <th>Measured value</th> <th>Unit</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>Point - Point (Vert)1</td> <td>231,559</td> <td>µm</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>Point - Point (Horz)1</td> <td>438,663</td> <td>µm</td> </tr> </tbody> </table>	No.	Measurement name	Measured value	Unit	1	Point - Point (Vert)1	231,559	µm	2	Point - Point (Horz)1	438,663	µm
No.	Measurement name	Measured value	Unit														
1	Point - Point (Vert)1	231,559	µm														
2	Point - Point (Horz)1	438,663	µm														
VP GM 15					<table border="1"> <thead> <tr> <th>No.</th> <th>Measurement name</th> <th>Measured value</th> <th>Unit</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>Point - Point (Vert)1</td> <td>231,486</td> <td>µm</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>Point - Point (Horz)1</td> <td>445,639</td> <td>µm</td> </tr> </tbody> </table>	No.	Measurement name	Measured value	Unit	1	Point - Point (Vert)1	231,486	µm	2	Point - Point (Horz)1	445,639	µm
No.	Measurement name	Measured value	Unit														
1	Point - Point (Vert)1	231,486	µm														
2	Point - Point (Horz)1	445,639	µm														
VP GM 15					<table border="1"> <thead> <tr> <th>No.</th> <th>Measurement name</th> <th>Measured value</th> <th>Unit</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>Point - Point (Vert)1</td> <td>232,883</td> <td>µm</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>Point - Point (Horz)1</td> <td>468,881</td> <td>µm</td> </tr> </tbody> </table>	No.	Measurement name	Measured value	Unit	1	Point - Point (Vert)1	232,883	µm	2	Point - Point (Horz)1	468,881	µm
No.	Measurement name	Measured value	Unit														
1	Point - Point (Vert)1	232,883	µm														
2	Point - Point (Horz)1	468,881	µm														
VP GM 15					<table border="1"> <thead> <tr> <th>No.</th> <th>Measurement name</th> <th>Measured value</th> <th>Unit</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>Point - Point (Vert)1</td> <td>242,026</td> <td>µm</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>Point - Point (Horz)1</td> <td>479,224</td> <td>µm</td> </tr> </tbody> </table>	No.	Measurement name	Measured value	Unit	1	Point - Point (Vert)1	242,026	µm	2	Point - Point (Horz)1	479,224	µm
No.	Measurement name	Measured value	Unit														
1	Point - Point (Vert)1	242,026	µm														
2	Point - Point (Horz)1	479,224	µm														

Tabulka 30 Hodnoty VP GM 15 [zdroj: vlastní]

<b>PUR VP GM 15</b>					
<b>Výška žebra <math>\mu\text{m}</math></b>	<b>Etalon výšek</b>	<b>%</b>	<b>Šířka žebra <math>\mu\text{m}</math></b>	<b>Etalon šířek</b>	<b>%</b>
2876,26	3010,00	-4,44%	1150,43	1219,00	-5,63%
2793,74	3010,00	-7,18%	1127,86	1219,00	-7,48%
2770,63	3010,00	-7,95%	1104,56	1219,00	-9,39%
2770,87	3010,00	-7,94%	1070,14	1219,00	-12,21%
2766,99	3010,00	-8,07%	1070,52	1219,00	-12,18%
2764,24	3010,00	-8,16%	1098,74	1219,00	-9,87%
2762,28	3010,00	-8,23%	1072,68	1219,00	-12,00%
2750,48	3010,00	-8,62%	1091,56	1219,00	-10,45%
2870,13	3010,00	-4,65%	1120,79	1219,00	-8,06%
2764,84	3010,00	-8,14%	1070,52	1219,00	-12,18%
2762,47	3010,00	-8,22%	1072,67	1219,00	-12,00%
2766,86	3010,00	-8,08%	1091,56	1219,00	-10,45%
2773,35	3010,00	-7,86%	1098,39	1219,00	-9,89%
2776,97	3010,00	-7,74%	1104,48	1219,00	-9,39%
2778,72	3010,00	-7,68%	1127,75	1219,00	-7,49%
<b>Výška struktury <math>\mu\text{m}</math></b>	<b>Etalon výšek</b>	<b>%</b>	<b>Šířka struktury <math>\mu\text{m}</math></b>	<b>Etalon šířek</b>	<b>%</b>
257,65	365,00	-29,41%	466,18	482,00	-3,28%
242,92	365,00	-33,45%	459,61	482,00	-4,65%
233,78	365,00	-35,95%	469,47	482,00	-2,60%
232,53	365,00	-36,29%	439,86	482,00	-8,74%
231,57	365,00	-36,56%	446,56	482,00	-7,35%
230,26	365,00	-36,92%	447,74	482,00	-7,11%
220,42	365,00	-39,61%	465,96	482,00	-3,33%
220,87	365,00	-39,49%	474,62	482,00	-1,53%



Graf 13 Porovnání naměřených hodnot materiálu VP GM 15 s modelem [zdroj: vlastní]



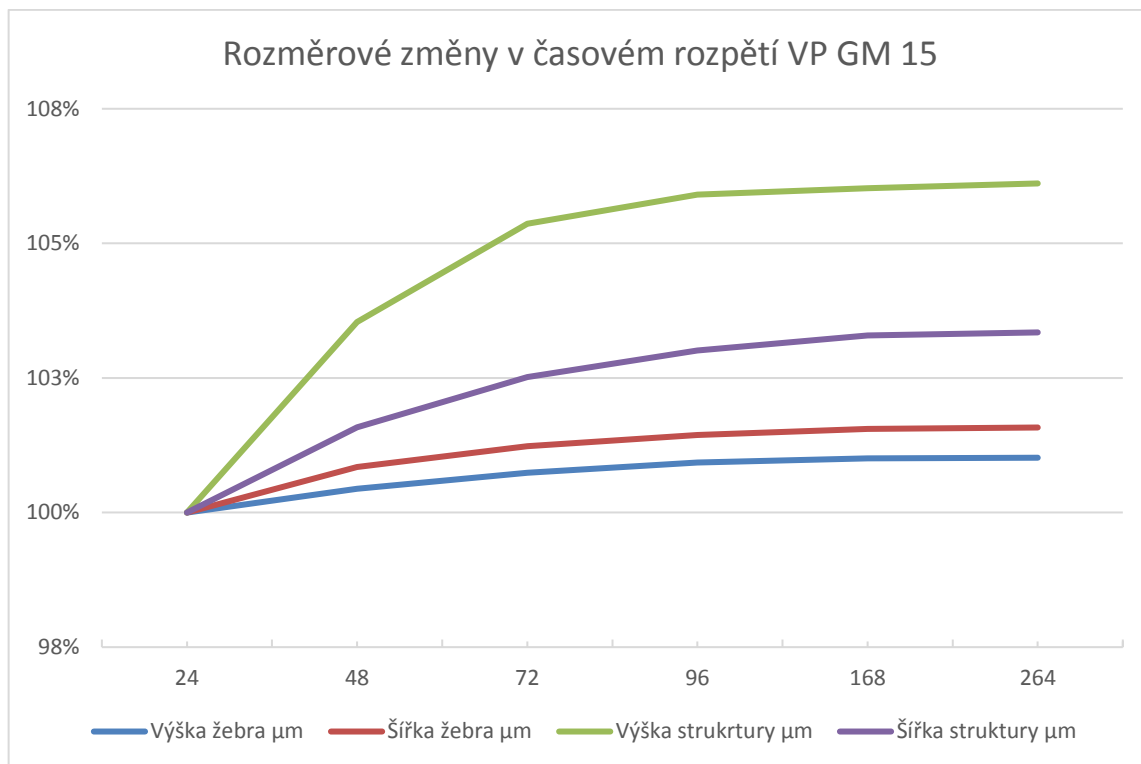
Graf 14 Porovnání smrštění žeber a struktur u materiálu VP GM 15 [zdroj: vlastní]

Tabulka 31 Rozměrové změny materiálu v časovém daném časovém úseku [zdroj: vlastní]

Materiál	VP GM 15				
	Doba od zpracování hod.	Výška žebra $\mu\text{m}$	Šířka žebra $\mu\text{m}$	Výška struktury $\mu\text{m}$	Šířka struktury $\mu\text{m}$
	24	2783,26	1098,18	233,75	458,75
	48	2795,53	1107,45	242,02	466,02
	72	2803,80	1111,72	246,29	470,29
	96	2809,07	1113,99	247,56	472,56
	168	2811,34	1115,26	247,83	473,83
	264	2811,61	1115,53	248,04	474,10
<b>Průměrná hodnota <math>\mu\text{m}</math></b>		<b>2802,43</b>	<b>1110,35</b>	<b>244,25</b>	<b>469,26</b>
<b>Medián <math>\mu\text{m}</math></b>		<b>2806,43</b>	<b>1112,85</b>	<b>246,93</b>	<b>471,43</b>
<b>Maximální hodnota</b>		<b>2811,61</b>	<b>1115,53</b>	<b>248,04</b>	<b>474,10</b>
<b>Minimální hodnota</b>		<b>2783,26</b>	<b>1098,18</b>	<b>233,75</b>	<b>458,75</b>
<b>Variační rozpětí</b>		<b>28,35</b>	<b>17,35</b>	<b>14,29</b>	<b>15,35</b>

Tabulka 32 Procentní změny materiálu v daném časovém úseku [zdroj: vlastní]

Materiál	VP GM 15				
	Doba od zpracování hod.	Výška žebra $\mu\text{m}$	Šířka žebra $\mu\text{m}$	Výška struktury $\mu\text{m}$	Šířka struktury $\mu\text{m}$
	24	100%	100%	100%	100%
	48	100,44%	100,84%	103,54%	101,58%
	72	100,74%	101,23%	105,36%	102,52%
	96	100,93%	101,44%	105,91%	103,01%
	168	101,01%	101,56%	106,02%	103,29%
	264	101,02%	101,58%	106,11%	103,35%
<b>Průměrná hodnota <math>\mu\text{m}</math></b>		<b>100,83%</b>	<b>101,33%</b>	<b>105,39%</b>	<b>102,75%</b>
<b>Medián <math>\mu\text{m}</math></b>		<b>100,93%</b>	<b>101,44%</b>	<b>105,91%</b>	<b>103,01%</b>
<b>Maximální hodnota</b>		<b>101,02%</b>	<b>101,58%</b>	<b>106,11%</b>	<b>103,35%</b>
<b>Minimální hodnota</b>		<b>100,00%</b>	<b>100,00%</b>	<b>100,00%</b>	<b>100,00%</b>
<b>Variační rozpětí</b>		<b>1,02%</b>	<b>1,58%</b>	<b>6,11%</b>	<b>3,35%</b>



Graf 15 Grafické vyjádření rozměrových změn v daném čase [zdroj: vlastní]

### 6.3.3 Vyhodnocení smrštění

Posledním z hodnocených materiálů je Polyuretanový materiál VP GM 15. Měření probíhalo podobně jako u předchozích materiálů ve stejné posloupnosti:

- Výšky žebor mají naměřenou a vypočítanou hodnotu průměru -7,53 % a mediánu -7,95 % smrštění
- U šířek žebor činí smrštění u hodnot průměru a mediánu identické -9,91 %
- Výšky struktur opětovně vykazují rozměrovou změnu hodnotu smrštění -35,96 % průměru a medián -36,42 %
- Šířky struktur mají vyhodnoceno smrštění -4,82 % a medián -3,99 %

Při změření rozměrů detekovaných v časovém odstupu je výsledek následující:

- Výška žebor vykazuje stabilní rozměrovou hodnotu, kde variační rozpětí činí 1,02 %
- Šířka žebor má hodnoty minimálního nárůstu o variační rozpětí 1,58 %
- Struktury mají také zde u výšek tendenci nárůstu, neboť variační rozpětí má hodnotu 6,11 %
- Šířka struktur, je 3,35 % což lineárně koresponduje s rozdílem u výšek struktur



U materiálu VP GM 15 došlo ve všech směrech ke smrštění od definovaného rozměru modelu. Největší rozdíl ve smrštění je u výšek struktur tak jako u ostatních materiálů, avšak zde je tento negativní efekt nejvýznamnější. Stabilita materiálu v čase je poměrně dobrá, kde sice dochází k nárůstu, avšak nejrozsáhlejší rozměrovou změnu zaznamenala výška struktury o -35,96 % což je zcela nevyhovující.

Polyadiční materiál Polyuretan VP GM 15 je na základě měřených parametrů vyhodnocen jako nevyhovující.

## 7 DISKUZE K VÝSLEDKŮM

Při postupném testování materiálů byly materiály vyhodnocené jako nevyhovující vyřazovány. U polykondenzačního materiálu byla nevyhovující tvrdost Shore A, neboť naměřené hodnoty materiálu používaného v dané časové ose, byly pouze u 38 % hodnoceny jako vyhovující. Takto nízká hodnota ukazuje nevhodnost pro dlouhodobé používání materiálu.

Při testování reologických vlastností materiálů byly všechny testované materiály vyhodnoceny jako vyhovující. Pouze u materiálu VP GM 15, kde nastalo síťování velmi brzy po smíchání obou složek, bylo toto vnímáno jako možný problém pro dostatečné zatečení a relaxaci materiálu v malých strukturách.

Toto podezření se u materiálu VP GM 15 naplnilo při posledním testování smrštění a zatečení materiálu do jemných struktur modelu. Zde u jemné drážky o jmenovité velikosti výšky 365  $\mu\text{m}$  x šířky 482  $\mu\text{m}$  došlo k nedokonalé relaxaci materiálu díky rychlému síťování a výsledné žebro mělo pouze ve výšce 64 % požadované velikosti. Tato hodnota je již mimo tolerance definované pro výrobu odlitku.

Velmi významné se jeví také negativní narůstání materiálu Cenusil M 810 v měřené časové ose. Tento nárůst činí od minima 9,47 %, až do rozdílu 22,92 % oproti původní hodnotě. V případě dlouhodobého používání výrobku pro výrobu sériových forem, dochází k rozměrové nestabilitě a následně k velkým rozdílům mezi rozměry sádrového jádra po prvním použití a jádra po týdenním použití. Proto je pro použití u sériových forem nevyhovující.

V průběhu testování byly detekovány některé negativní vlastnosti, které nebyly součástí zadání, ale byly patrné, pro nevhodnost jejich použití. U materiálu VP GM 15, byl zaznamenán velmi nepříjemný zápach, který se jevil jako podstatná překážka při následném zpracování a vkládání komponentů do hotového otisku. Pracovníci provádějící tento technologický úkon, zaznamenali nepříjemné svědění a pálení očí, neboť činnost u každého dílu segmentu trvá v průměru 60 minut. Viditelné bylo také zarudnutí obličeje. Tento nepříjemný efekt lze zmírnit používáním ochranných pomůcek, jako celo-obličejové masky, ale práce bude velmi znevýhodněna pro kontrolu detailů na hotovém dílu.

U materiálu Cenusil M 810 docházelo k negativní reakci s používaným strojním olejem, který částečně ulpěl na modelu od frézovacího vřetene. Na těchto místech došlo k nedokonalému vytvrnutí materiálu a ten zůstal částečně v emulzním stavu. Celkový proces výroby

flexibelu se tedy musel opakovat s dokonale vyčištěným modelem. Těmto únikům nelze zabránit a jejich výskyt je složité detekovat před zpracováním, neboť viditelné stopy zde nejsou.

Tabulka 33 Závěrečná tabulka vyhodnocení [zdroj: vlastní]

Zkoumané hodnoty	Silikon	Silikon	Silikon	Polyuretan
	Zhermack	Wacker	Wacker	Ebalta
	ZA 11-45 RED	Cenusil M 810	Elastosil M 4512	VP GM 15
<i>VULKANIZACE</i>	polyadiční	polyadiční	polykondenzační	polyadiční
<i>Tvrdość po 24 hod</i>	Vyhovující	Vyhovující	Nevyhovující	Vyhovující
<i>Tvrdość od 24 hod do 504 hod</i>	Vyhovující	Vyhovující	Nevyhovující	Vyhovující
<i>Viskozita</i>	Vyhovující	Vyhovující	-	Vyhovující
<i>Sítování</i>	Vyhovující	Vyhovující	-	Rizikové
<i>Gelace</i>	Vyhovující	Vyhovující	-	Rizikové
<i>Smrštění po 24 hod</i>	Vyhovující	Vyhovující	-	Rizikové
<i>Smrštění po 264 hod</i>	Vyhovující	Rizikové	-	Nevyhovující
<b>Výsledek</b>	<b>Doporučeno</b>	<b>Nedoporučeno</b>	<b>Vyřazeno</b>	<b>Vyřazeno</b>

Dle výše uvedených důvodů se tedy jeví jako nejlépe použitelný materiál pro výrobu flexibelu, polyadiční silikon ZA 11 RED od společnosti Zhermack Italy, který při testování vykázal nejlepší vlastnosti.

## ZÁVĚR

Cílem této diplomové práce bylo optimalizovat v procesu výroby flexibelu, nejvhodnější dostupný materiál a vydat doporučení pro jeho následné použití do výroby forem.

Teoretická část se nejprve věnuje základnímu rozčlenění polymerů a dále již s detailnějším zaměřením na materiály vhodné k účelu výroby flexibelu. Dalším z oddílů je věnováno některým vlastnostem pryžových materiálů se zaměřením na měření, detekci a vyhodnocení vhodnými způsoby a prostředky. Mezi vlastnosti, kterými se práce zabývá, jsou především reologické otázky v oblasti viskozity, mechanické vlastnosti při detekci tvrdosti a selekce možných geometrických změn materiálu. Následuje představení Výroby forem Continental jako část společnosti Continental Barum s.r.o. kde budou dosažené výsledky využity. Dále je práce věnována výrobku, což je segmentová vulkanizační forma pro výrobu osobních pneumatik. Teoretická fáze je ukončena revizí cílů práce.

Praktická část je zahájena seznámením s detaily výroby pryžové formy zvané flexibel. Zde jsou vybrány materiály, které byly v minulosti používány a nové materiály, vybrané pro testování. Následně se práce soustředí na měření definovaných vlastností, jako jsou tvrdost, viskozita a rozměrová deformace tvaru. Tyto vlastnosti jsou podrobeny zkoumání, které je vždy doplněno daným vyhodnocením jednotlivých vlastností materiálů. Po jednotlivém měření je provedeno vyhodnocení a doporučení o výsledných experimentech.

S využitím znalosti požadavku a na základě výsledků testovaných materiálů, bylo vydáno doporučení k použití pro materiál s nejkompexnějšími vlastnostmi vhodnými k výrobě. Tyto výsledky zaznamenal materiál od italské společnosti Zhermack ZA 11 RED,

## SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] DUCHÁČEK, V., *Polymery - výroba, vlastnosti, zpracování, použití* 1., vydání. Praha, 2005. 354 s. ISBN 80-7080-241-3
- [2] DVOŘÁK, [Zdeněk a Jakub JAVOŘÍK]. *Elastomerní konstrukční materiály*. Zlín: Česká společnost průmyslové chemie, místní pobočka Gumárenská skupina Zlín, 2009. ISBN 9788002021551.
- [3] FRANTA, Ivan. *Gumárenská technologie*. 3., přeprac. a dopl. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1979. Řada chemické literatury.
- [4] SCHÄTZ, Miroslav. *Silikonový kaučuk*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1971. Makromolekulární látky.
- [5] MLEZIVA, Josef. *Polymery - výroba, struktura, vlastnosti a použití*. 2. přepr. vyd. Praha: Sobotáles, 2000. ISBN isbn8085920727.
- [6] EDS.-IN-CHIEF D. MICHAEL P. MINGOS . *Comprehensive organometallic chemistry III*. New York [u.a.]: Elsevier, 2007. ISBN 9780080446035.
- [7] PROKOPOVÁ, Irena. *Makromolekulární chemie*. Vyd. 2., přeprac. Praha: Vydavatelství VŠCHT, 2007. ISBN isbn978-80-7080-662-3.
- [8] SCHÄTZ, Miroslav a Petr VONDRÁČEK. *Zkoušení polymerů*. 2., přepr. a dopl. vyd. Praha: VŠCHT, 1988, 276 s.
- [9] JARUŠEK, Jaroslav. *Metody zkoumání polymerů*. 2. vyd. Pardubice: VŠCHT, 1984, 105 s.
- [10] Internetový portál ústavu fyziky a materiálového inženýrství, Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, fakulta technologická. [Http://ufmi.ft.utb.cz/texty/fyzika\\_pol/FP\\_01.pdf](http://ufmi.ft.utb.cz/texty/fyzika_pol/FP_01.pdf) [online]. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2010 [cit. 2018-05-16].
- [11] DVOŘÁK, Lukáš. *Vlastnosti tekutin*. Ostrava, 2010. Syllabus předmětu. VŠB TU Ostrava, Fakulta strojní.
- [12] JANALÍK, Jaroslav. *Viskozita tekutin a jejich měření*. Ostrava, 2010. VŠB TU Ostrava, Fakulta strojní.
- [13] MM Průmyslové spektrum. *Metody a způsoby měření tvrdosti nekovových materiálů* [online]. 2002, 12.6.2002 [cit. 2018-05-16]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/kontakty.html>

- [14] Proinex Instruments s.r.o. Konverzní tabulka pro durometry Shore. [Http://www.merenivrdosti.cz: piplina-pevodni-tabulka-pro-durometry-shore.html](http://www.merenivrdosti.cz:piplina-pevodni-tabulka-pro-durometry-shore.html) [online]. [cit. 2018-05-16].
- [15] ČSN EN ISO 868: *Plasty a ebonit – Stanovení tvrdosti vtlačováním hrotu tvrdoměru (tvrdost Shore)*. Praha: Český normalizační institut, 2003.
- [16] KEYENCE INTERNATIONAL (BELGIUM) NV/SA. KEYENCE: 3D laserový skenovací mikroskop. [Https://www.keyence.eu/landing/microscope/lp\\_vkx\\_micro03\\_cz.jsp](https://www.keyence.eu/landing/microscope/lp_vkx_micro03_cz.jsp) [online]. [cit. 2018-05-16].
- [17] KOZÁKOVÁ, Věra. *Inovace vzdělávacího modulu, Kontrola a měření: Měření součástí 3D* [online]. Olomouc [cit. 2018-05-16]. Střední průmyslová škola strojnická.
- [18] CAD.CZ: *Nové funkce optických měřicích přístrojů Keyence řady IM* [online]. Brno: CCB, 2012 [cit. 2018-05-16]. ISSN 1802-6168.
- [19] BUMBÁLEK, Leoš. *Kontrola a měření: pro SPŠ strojní*. Praha: Informatorium, 2009. ISBN isbn978-80-7333-072-9.
- [20] TIŠNOVSKÝ, Pavel. *Elektrorevue. : Bezkontaktní digitalizace předmětů pomocí 3D scanneru* [online]. 2003, (13) [cit. 2018-05-16]. ISSN 1213-1539.
- [21] Gom. In: [Https://www.gom.com/metrology-systems/aramis.html](https://www.gom.com/metrology-systems/aramis.html): *ARAMIS – 3D Motion and Deformation Sensor* [online]. [cit. 2018-05-16].
- [22] Wacker. In: [Https://www.wacker.com/cms/en/products/product/product.jsp?product=13309](https://www.wacker.com/cms/en/products/product/product.jsp?product=13309): *CENUSIL® M 810 A/B* [online]. [cit. 2018-05-16].
- [23] Zwick/roell. In: [Https://www.zwick.com/shore-irhd-hardness-testers/shore-analog-digital](https://www.zwick.com/shore-irhd-hardness-testers/shore-analog-digital): *Shore hardness testers - analog and digital* [online]. [cit. 2018-05-16]
- [24] PERNIKÁŘ, Jiří a Miroslav TYKAL. *Strojírenská metrologie II*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006. ISBN isbn80-214-3338-8.
- [25] MECHL, Viktor a Martin MUŠINSKÝ. *Gumárenská technologie v Barum Continental, spol. s.r.o.: učebnice pro žáky zpracovatelského oboru SPŠ polytechnické - COP Zlín*. Zlín: Střední průmyslová škola polytechnická - COP Zlín, 2011. ISBN isbn9788090500228.
- [26] Zhermack: RTV-2 Silicone Rubber. [Http://www.zhermack.com/en/product\\_category/industrial/mould-making-industrial-it/rtv-2-silicone-rubber-mould-making-industrial-it/](http://www.zhermack.com/en/product_category/industrial/mould-making-industrial-it/rtv-2-silicone-rubber-mould-making-industrial-it/) [online]. Italy [cit. 2018-05-17].

- [27] Ebalta: Silikony. *Http://www.ebalta.cz/cz/katalog-produktu/silikony: Silikony* [online]. [cit. 2018-05-17].
- [28] Anton Paar. In: *Https://www.anton-paar.com/ca-en/products/details/rheometer-mcr-102-302-502/: Rheometer: MCR 102, 302, 502* [online]. [cit. 2018-05-16].

**SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK**

IRABC	Izoprénový kaučuk Význam první zkratky.
BR	Význam třetí zkratky. Butadiénový kaučuk
EPM	Kopolymer ethylenu a kopolymeru
EPDM	Termopolymer ethylenu
IIR	Izobutylénizoprénový kaučuk
NBR	Akrylonitril kaučuk
ACM	Kopolymer ethylakrylát
MQ	Silikon kaučuk s methylovými skupinami
MPVQ	Silikon kaučuk s methyl, vinyl, fenylovými skupinami
FPM	Kaučuky s fluoroakrylovými řetězci
CFM	Polytrifluorchlóetylén
VFC	Výroba Forem Continental
3D	3 rozměry
SLM	Laserové tavení prášku
SLS	Laserové spékání prášku
CAD	Počítačem podporované projektování
CAM	Počítačem podporovaná výroba
PUR	Polyuretan
HSC	Vysoko rychlostní obrábění
PVD	Technologie obloukového odpařování
VFC	Výroba Forem Continental
CMM	Výroba forem a strojů Continental
CNC	Číslicově řízené stroje počítačem



NC	Číslicové řízení strojů
PUR	Polyuretan
SBRB	Styrénbutadienový kaučuk

**SEZNAM OBRÁZKŮ**

<i>Obrázek 1 Rychlostní profil toku v kapalině mezi nepohyblivou a pohybující se deskou [8] .....</i>	<i>21</i>
<i>Obrázek 2 Princip měření u rotačního reometru deska – deska [10] .....</i>	<i>23</i>
<i>Obrázek 3 Schéma kapilárních viskozimetrů [12] .....</i>	<i>24</i>
<i>Obrázek 4 Výtokový pohárek 3,0 mm [23] .....</i>	<i>25</i>
<i>Obrázek 5 Rovnováha sil při pohybu koule ve Stokesově viskozimetru [12] .....</i>	<i>26</i>
<i>Obrázek 6 Zkušební hrot tvrdoměru typu A a typu D [8] .....</i>	<i>27</i>
<i>Obrázek 7 Durometr pro Shore A a D řa. Bareiss [23] .....</i>	<i>29</i>
<i>Obrázek 8 Hlavní mechanické prvky SMS [18] .....</i>	<i>33</i>
<i>Obrázek 9 Bezkontaktní optický systém Aramis – Gom [21] .....</i>	<i>35</i>
<i>Obrázek 10 Sestava vulkanizačního kontejneru se segmentovou formou [25] .....</i>	<i>37</i>
<i>Obrázek 11 Výroba flexibilové formy – postup činností [zdroj: vlastní] .....</i>	<i>42</i>
<i>Obrázek 12 Forma flexibelu [zdroj: vlastní] .....</i>	<i>45</i>
<i>Obrázek 13 Ruční tvrdoměry Zwick [zdroj: vlastní] .....</i>	<i>47</i>
<i>Obrázek 14 Reometr Anton Paar MCR 502 [zdroj: vlastní] .....</i>	<i>53</i>
<i>Obrázek 15 Keyence VR-3100 3D [zdroj: vlastní] .....</i>	<i>60</i>
<i>Obrázek 16 Vzorky určené k testování [zdroj: vlastní] .....</i>	<i>61</i>

## SEZNAM TABULEK

<i>Tabulka 1 Polymery - základní rozdělení [2].....</i>	<i>12</i>
<i>Tabulka 2 Mezinárodní klasifikace kaučuků do základních skupin [3].....</i>	<i>14</i>
<i>Tabulka 3 Dynamická viskozita vybraných materiálů [9].....</i>	<i>20</i>
<i>Tabulka 4 Normy stanovující tvrdost Shore [14].....</i>	<i>30</i>
<i>Tabulka 5 Taxonomie 3D skenerů [20].....</i>	<i>32</i>
<i>Tabulka 6 Základní vlastnosti testovaných materiálů [zdroj: vlastní].....</i>	<i>45</i>
<i>Tabulka 7 VP GM 15 – Měření tvrdosti [zdroj: vlastní].....</i>	<i>49</i>
<i>Tabulka 8 Cenusil M 810 – Měření tvrdosti [zdroj: vlastní].....</i>	<i>49</i>
<i>Tabulka 9 ZA 11 RED – Měření tvrdosti [zdroj: vlastní].....</i>	<i>50</i>
<i>Tabulka 10 Elastosil M 4512 – Měření tvrdosti [zdroj: vlastní].....</i>	<i>50</i>
<i>Tabulka 11 Vyhodnocení použitelnosti [zdroj: vlastní].....</i>	<i>52</i>
<i>Tabulka 12 Nastavení parametrů reometru pro Cenusil M 810 Vyhodnocení použitelnosti [zdroj: vlastní].....</i>	<i>54</i>
<i>Tabulka 13 Hodnoty z reometru pro ZA 11 RED Vyhodnocení použitelnosti [zdroj: vlastní].....</i>	<i>55</i>
<i>Tabulka 14 Etalon pro drážky 2968/1081 <math>\mu\text{m}</math> [zdroj: vlastní].....</i>	<i>62</i>
<i>Tabulka 15 Etalon pro drážky 367,2/492,1 <math>\mu\text{m}</math> [zdroj: vlastní].....</i>	<i>63</i>
<i>Tabulka 16 Měřicí stopy 1 Etalonu Ebaboard 0780 [zdroj: vlastní].....</i>	<i>64</i>
<i>Tabulka 17 Měřicí stopy 2 Etalonu Ebaboard 0780 [zdroj: vlastní].....</i>	<i>64</i>
<i>Tabulka 18 Cenusil M 810 měřicí protokol [zdroj: vlastní].....</i>	<i>66</i>
<i>Tabulka 19 Cenusil M 810 měřicí protokol [zdroj: vlastní].....</i>	<i>66</i>
<i>Tabulka 20 Naměřené hodnoty Cenusil M 810 po 24 hodinách [zdroj: vlastní].....</i>	<i>67</i>
<i>Tabulka 21 Rozměrové změny materiálu v daném časovém úseku [zdroj: vlastní].....</i>	<i>69</i>
<i>Tabulka 22 Procentní změny materiálu v daném časovém úseku [zdroj: vlastní].....</i>	<i>69</i>
<i>Tabulka 23 ZA 11 RED měřicí protokol [zdroj: vlastní].....</i>	<i>71</i>
<i>Tabulka 24 ZA 11 RED měřicí protokol [zdroj: vlastní].....</i>	<i>71</i>
<i>Tabulka 25 Naměřené hodnoty ZA 11 RED [zdroj: vlastní].....</i>	<i>72</i>
<i>Tabulka 26 Rozměrové změny materiálu v daném časovém úseku [zdroj: vlastní].....</i>	<i>74</i>
<i>Tabulka 27 Procentní změny materiálu v daném časovém úseku [zdroj: vlastní].....</i>	<i>74</i>
<i>Tabulka 28 VP GM 15 měřicí protokol [zdroj: vlastní].....</i>	<i>76</i>
<i>Tabulka 29 Naměřené hodnoty VP GM 15 [zdroj: vlastní].....</i>	<i>76</i>
<i>Tabulka 30 Hodnoty VP GM 15 [zdroj: vlastní].....</i>	<i>77</i>

---

<i>Tabulka 31</i> Rozměrové změny materiálu v časovém daném časovém úseku [zdroj: vlastní] .....	79
<i>Tabulka 32</i> Procentní změny materiálu v daném časovém úseku [zdroj: vlastní] .....	79
<i>Tabulka 33</i> Závěrečná tabulka vyhodnocení [zdroj: vlastní] .....	83

**SEZNAM GRAFŮ**

<i>Graf 1 Celkové porovnání tvrdosti testovaných materiálů [zdroj: vlastní] .....</i>	<i>51</i>
<i>Graf 2 Síťování materiálů a body gelace [zdroj: vlastní] .....</i>	<i>56</i>
<i>Graf 3 Síťování materiálů v čase [zdroj: vlastní] .....</i>	<i>56</i>
<i>Graf 4 Zobrazení síťování materiálů v časové ose [zdroj: vlastní] .....</i>	<i>57</i>
<i>Graf 5 Vyhodnocení komplexní viskozity [zdroj: vlastní] .....</i>	<i>58</i>
<i>Graf 6 Moduly síťování [zdroj: vlastní] .....</i>	<i>59</i>
<i>Graf 7 Porovnání naměřených hodnot u Cenusil M 810 s Modelem po 24 hodinách [zdroj: vlastní] .....</i>	<i>68</i>
<i>Graf 8 Porovnání smrštění žeber a struktur u Cenusil M 810 po 24 hodinách [zdroj: vlastní] .....</i>	<i>68</i>
<i>Graf 9 Grafické vyjádření rozměrových změn v daném čase [zdroj: vlastní] .....</i>	<i>70</i>
<i>Graf 10 Porovnání naměřených hodnot materiálu ZA 11 RED s modelem [zdroj: vlastní] .....</i>	<i>73</i>
<i>Graf 11 Porovnání smrštění žeber a struktur u materiálu ZA 11 RED [zdroj: vlastní] .....</i>	<i>73</i>
<i>Graf 12 Grafické vyjádření rozměrových změn v daném čase [zdroj: vlastní] .....</i>	<i>75</i>
<i>Graf 13 Porovnání naměřených hodnot materiálu VP GM 15 s modelem [zdroj: vlastní] .....</i>	<i>78</i>
<i>Graf 14 Porovnání smrštění žeber a struktur u materiálu VP GM 15 [zdroj: vlastní] .....</i>	<i>78</i>
<i>Graf 15 Grafické vyjádření rozměrových změn v daném čase [zdroj: vlastní] .....</i>	<i>80</i>

**SEZNAM ROVNIC**

<i>Rovnice 1 Chemická rovnice Polyuretanu</i> .....	18
<i>Rovnice 2 Viskozita Newtonovou rovnicí</i> .....	21
<i>Rovnice 3 Newtonské závislosti chování</i> .....	22
<i>Rovnice 4 Rovnice a vzájemné vztahy rovnováhy sil</i> .....	26
<i>Rovnice 5 Výpočet dynamické viskozity dle Stokesova viskozimetru</i> .....	26
<i>Rovnice 6 Obecný vzorec pro výpočet Shore [8]</i> .....	29
<i>Rovnice 7 - Aritmetický průměr</i> .....	48
<i>Rovnice 8 - Medián</i> .....	48
<i>Rovnice 9 - Variační rozpětí</i> .....	48

**SEZNAM PŘÍLOH**

<i>PŘÍLOHA 1 Materiálový list ZA 11 RED 1/2</i> .....	96
<i>PŘÍLOHA 2 Materiálový list ZA 11 RED 2/2</i> .....	97
<i>PŘÍLOHA 3 Materiálový list VP GM 15 1/2</i> .....	98
<i>PŘÍLOHA 4 Materiálový list VP GM 15 2/2</i> .....	99
<i>PŘÍLOHA 5 Materiálový list Cenusil M 810 1/2</i> .....	100
<i>PŘÍLOHA 6 Materiálový list Cenusil M 810 2/2</i> .....	101
<i>PŘÍLOHA 7 Materiálový list Elastosil M 4512 1/2</i> .....	102
<i>PŘÍLOHA 8 Materiálový list Elastosil M 4512 2/2</i> .....	103
<i>PŘÍLOHA 9 Produktový list durometru Zwick 3110 1/2</i> .....	104
<i>PŘÍLOHA 10 Produktový list durometru Zwick 3110 2/2</i> .....	105
<i>PŘÍLOHA 11 Měřicí protokol reometru Anton Paar 1/3</i> .....	106
<i>PŘÍLOHA 12 Měřicí protokol reometru Anton Paar 2/3</i> .....	107
<i>PŘÍLOHA 13 Měřicí protokol reometru Anton Paar 3/3</i> .....	108

## ZA 11-45 RED: Technical Data Sheet

### 1. Description and Main Features

ZA 11-45 RED is a bi component (base and catalyst) addition RTV 2 silicon rubber that vulcanizes at room temperature.

The main properties of the vulcanized product are:

- Good tear strength properties;
- High accuracy in reproducing very small details;
- High dimensional stability;
- Remarkable resistance to high temperatures and aging;
- Excellent anti-stick effect.

### 2. Main Fields of Application

Mould-making

### 3. Instructions for use

Take the two bi-component products supplied by Zhermack (base and catalyst) and shake before use. Weigh an equal amount of catalyst and base (ex. 100 grams of catalyst and 100 grams of base; within a 5% error range the end result is not altered). Once the product is weighed and it is assured that the base and catalyst are equal, the two components are inserted in a recipient and mixed thoroughly. It is important to check while mixing that no residue remains on the base and sides of the recipient. Mix energetically until the colour of the product is homogeneous. Once the product is mixed it is poured, preferably 30 cm above the recipient into the mould. The working time is approximately 40 minutes from the beginning of the mixing at 23°C. It is advised to vacuum the mixture to prevent air pockets.

The setting time (time the silicone needs to vulcanize) is about 4 h at 23°C. After the setting time is complete, from the start of the mixing, we can separate the model from the mould. If necessary use compress air to facilitate this separation. It is important not to force this separation with sharp objects that can deform the final stamp.

**IMPORTANT NOTE :** *The working time and thus the setting time are reduced if the temperature exceeds 23°C (ex. If the temperature is 40°C, the working time is halved and the setting time is approximately halved). If the temperature is less than 23°C both the working time and setting time increase considerably. (ex. If the temperature is 4°C, the working time doubles and the Setting time increases three times the minutes indicated at 23°C).*

### 4. Important Recommendations

The exact proportions 1 : 1 must be respected to obtain the correct times and not to alter the final characteristics of the product. The surfaces with which the material enters in contact must be perfectly clean, free of grease and dry.

**NB: before use, we recommend the two components be homogenized so as to avoid sedimentation.**

The silicone arrives till these temperatures: Minimum - 40 °C and Maximum +200°C.

Zhermack S.p.A.

Via Bovazecchino, 100  
45021 Badia Polesine (RO) Italy  
T +39 0425 597611 | F +39 0425 53596  
www.zhermack.com | info@zhermack.com

C.F. e P.IVA IT00594630295  
R.E.A. 86603 - R.I. RO 00594630295  
M. RO 001381 - Isc. Reg. A.E.E. IT07111000002  
Cap. Soc. € 1.032.000,00

PŘÍLOHA 1 Materiálový list ZA 11 RED 1/2



### 5. Chemical and Physical Properties

Mixing ratio / Rapporto di miscelazione	<b>1 : 1</b>	B : C
Color / Colore	<b>RED</b>	
Density / Densità	<b>1,1</b>	g/cc
Viscosity of pre-catalyzation mixture / Viscosità miscelato	<b>4500</b>	cPs
Working time at 23° C (73° F) / Tempo di lavoro a 23° C (73° F)	<b>43</b>	minutes
Setting time at 23° C (73° F) / Tempo di indurimento a 23° C (73° F)	<b>4</b>	hours
Shore A hardness after 24 hours / Durezza dopo 24 ore	<b>11</b>	sh A
Tensile Strength / Resistenza alla trazione	<b>3,3</b>	N/mm <sup>2</sup>
Elongation at break / Allungamento a rottura	<b>550</b>	%
Tear strength (Die B) / Resistenza alla lacerazione (Die B)	<b>11</b>	N/mm

### 6. Available Packages

Zhermack code	Packages
<b>DT25001</b>	<b>25 kg + 25 kg</b>

### 7. Safety Data Sheets

Before handling the product, read the safety data sheet and make sure to get all the information required for safe use.

### 8. Shelf Life

ZA 11-45 RED is guaranteed for a period of 12 months if stored correctly at a temperature of between 5° - 27°C (41° - 80°F).

Close the bottles after use, do not invert the caps or lids between the base and catalyst.

### IMPORTANT OBSERVATIONS

The advice given verbally, in writing or through demonstrations on the use of the products are based on our knowledge. The use and application of the product by the user lie beyond the control of the company and are therefore the user's own responsibility.

#### Zhermack S.p.A.

Via Bovazecchino, 100  
45021 Badia Polesine (RO) Italy  
T +39 0425 597611 | F +39 0425 53596  
www.zhermack.com | info@zhermack.com

C.F. e P.IVA IT00594630295  
R.E.A. 86603 - R.L. RO 00594630295  
M. RO 001381 - Isc. Reg. A.E.E. IT07111000002  
Cap. Soc. € 1.032.000,00

Basis	
Resin	VP GM 15 (3-7) Comp. A
Hardener	VP GM 15 (3-7) Comp. B
Colour	light blue

### Applications

- Casting mould for gypsum

### Properties

- shore A hardness approx. 17
- good tear propagation resistance
- highly flexible

### Processing data

Product		Mixture VP GM 15 (3-7) / Comp. A+B	Resin VP GM 15 (3-7) Comp. A	Hardener VP GM 15 (3-7) Comp. B
Colour		light blue	light blue	brown transparent
Mixing ratio	p. b. w.		100	50
Viscosity at 25°C	mPas	700 ± 150	1600 ± 200	200 ± 25
Density at 20°C	g / cm <sup>3</sup>	1,17 ± 0,03	1,25 ± 0,03	1,01 ± 0,03
Pot life 150 g / 20°C	min	12 - 17	-	-
Curing time at RT	hrs.	16 - 24	-	-

### Physical data

Properties	Inspect. requirem.	Unit	Value
Tensile strength / test piece type 2	ISO 37	MPa	1,1 ± 0,1
Elongation at break / test piece type 2	ISO 37	%	570 ± 50
Shore hardness	DIN ISO 7619-1	Shore A	17 ± 2
Tear resistance arch shaped test piece with incision 1 mm	DIN ISO 34-1	kN/m	1,8 ± 0,2
Tear resistance arch shaped test piece without incision 1 mm	DIN ISO 34-1	kN/m	5,4 ± 0,2

### Sales units (packages)

tooling resins . blocks . auxiliaries . silicones

as of: 22.02.2016

Revision: 0

### Safety measure

Please follow the precaution instructions of the Government Safety Organisation of the chemical industry when working with this material. Please follow safety advices!

### Waste Disposal

According to arrangement with local authorities cured material can be disposed as domestic or commercial waste. Non-cured products are waste which is subject to inspection and has to be disposed accordingly. In case of further questions please do not hesitate to contact our Department for Product Safety.

The instructions and recommendations are given in good faith and are based on long experience and careful tests. Since the conditions of use are beyond our control, and due to versatility of applications and working methods, we can't give any guarantee. All information are non-binding and are no guarantee for special characteristics or properties of the product. Despite information given from ebalta the customer has to make his own tests regarding applications and processing. If any special warranty is requested, written agreement on this subject is essential.

ebalta Kunststoff GmbH . Erlbacher Straße 100 . 91541 Rothenburg ob der Tauber / Germany  
Tel.: +49 9861 7007-0 . Fax: +49 9861 7007-77 . info@ebalta.de . www.ebalta.de

## CENUSIL® M 810 A/B

RTV-2 SILICONE RUBBER / MOLD MAKING

### Product description

Pourable, addition-curing RTV-2 silicone rubber that cures at room temperature.

### Special features

- excellent flowability and good self-deaeration
- high tear strength
- very low hardness (Shore A 10)
- mixing ratio of 1:1 for straightforward processing
- fast and non-shrink cure at room temperature which can be accelerated considerably by the application of heat
- excellent long-term stability of the mechanical properties of the vulcanizate
- good resistance to common reproduction materials

### Application

Due to the outstanding elongation and low demolding forces as well as the superior mechanical properties, CENUSIL® M 810 A/B is especially suitable for preparing glove molds, i.e. one part skin molds.

The benefits are easy and quick mold making as well as straightforward demolding and seamless copies. Hence no further rework of the reproduction is required and process time is being extensively reduced.

As a low-hardness addition-curing RTV-2 silicone rubber that cures without undergoing dimensional shrinkage CENUSIL® M 810 A/B is especially suitable for casting all common reproduction materials, particularly if absolutely accurate copies of models with pronounced undercuts are required.

### Processing

Mix components A and B in a ratio of 1 : 1.

#### Important note:

The platinum catalyst is contained in component A.

#### Important:

A and B components may only be used together if they have the same batch number.

Comprehensive instructions are given in our leaflet "Wacker RTV-2 Silicone Rubber - Processing."

### Storage

The 'Best use before end' date of each batch is shown on the product label.

Storage beyond the date specified on the label does not necessarily mean that the product is no longer usable. In this case however, the properties required for the intended use must be checked for quality assurance reasons.

### Additional information

Please visit our website [www.wacker.com](http://www.wacker.com).

### Safety notes

Comprehensive instructions are given in the corresponding Material Safety Data Sheets. They are available on request from WACKER subsidiaries or may be printed via WACKER web site <http://www.wacker.com>.

**Product data**

Typical general characteristics	Inspection Method	Value
<b>Component A</b>		
Color		white
Density at 23 °C	ISO 2811	1,05 g/cm <sup>3</sup>
Viscosity	Brookfield	3000 mPa s
<b>Component B</b>		
Color		white
Density at 23 °C	ISO 2811	1,05 g/cm <sup>3</sup>
Viscosity	Brookfield	3000 mPa s
<b>Product data (catalyzed A + B)</b>		
Mix ratio p.b.w.	A : B	1 : 1
Color		white
Pot life , up to 60000 mPa s		40 min
Curing time, tack-free		4 h
<b>Product data (cured)</b>		
Hardness Shore A	ISO 868	10
Tensile strength	ISO 37	3,50 N/mm <sup>2</sup>
Elongation at break	ISO 37	600 %
Tear strength	ASTM D 624 B	15 N/mm

After 24 h at 23°C. These figures are only intended as a guide and should not be used in preparing specifications.

The data presented in this medium are in accordance with the present state of our knowledge but do not absolve the user from carefully checking all supplies immediately on receipt. We reserve the right to alter product constants within the scope of technical progress or new developments. The recommendations made in this medium should be checked by preliminary trials because of conditions during processing over which we have no control, especially where other companies' raw materials are also being used. The information provided by us does not absolve the user from the obligation of investigating the possibility of infringement of third parties' rights and, if necessary, clarifying the position. Recommendations for use do not constitute a warranty, either express or implied, of the fitness or suitability of the product for a particular purpose.

The management system has been certified according to DIN EN ISO 9001 and DIN EN ISO 14001  
 WACKER® is a trademark of Wacker Chemie AG.  
 CENUSIL® is a trademark of Wacker Chemie AG.

For technical, quality, or product safety questions, please contact:  
 Wacker Chemie AG  
 Hanns-Seidel-Platz 4  
 81737 München, Germany  
 info.silicones@wacker.com  
 www.wacker.com

# ELASTOSIL® M 4512

RTV-2 Silicone Rubber / Mold Making

## Characteristics

Pourable, condensation-curing, two-component silicone rubber that vulcanizes at room temperature.

## Special characteristics

- Low Shore A hardness (approx. 20)
- Very good flowability and self-deaeration
- Excellent tear strength
- Very high elongation and flexibility
- Outstanding chemical resistance to attack by polyester and polyurethane resins. Mold life is significantly extended.

## Application

ELASTOSIL® M 4512 is a high-performance mold-making compound, which is particularly suitable for the reproduction of models with extensive undercuts.

ELASTOSIL® M 4512 is especially suitable for the processing of polyester and polyurethane resins.

## Processing

If molds for processing epoxy or **polyurethane resins** are to be made, ELASTOSIL® M 4512 is cured by adding 5 wt % Catalyst T 21 for long pot lives and curing times, or 5 wt % Catalyst T 26 for short pot lives and curing times.

For molds used to process other reproduction materials such as **polyester resins**, plaster, concrete, synthetic stone, wax or low-melting alloys, 5 wt % Catalyst T 51 for long pot lives and curing times, or 5 wt % Catalyst T 56 for short pot lives and curing times should be used.

Catalyst	Pot life, [min]	Curing time (tack-free), [h]
5 % T 21	60-90	8-10
5 % T 26	20-40	4-6
5 % T 51	60-90	8-10
5 % T 56	20-40	4-6

The pot life is the period of time at 23 °C / 50 % rel. humidity during which the catalyzed mix to attain a

## Product data (uncured)

Property	Test method	Unit	Value
Color			White
Density at 23 °C		[g/cm <sup>3</sup> ]	1.20
Viscosity at 23 °C, after stirring	ISO 3219	[mPa s]	30,000

## Product data (catalyzed with 5 wt % Catalyst T 51)

Property	Test method	Unit	Value
Viscosity at 23 °C	ISO 3219	[mPa s]	25,000

## Product data (cured)

Property	Test method	Unit	Value
Density at 23 °C in water	ISO 2781	[g/cm <sup>3</sup> ]	1.19
Hardness Shore A	ISO 867		20
Tensile strength	ISO 37	[N/mm <sup>2</sup> ]	3.5
Elongation at break	ISO 37	[%]	500
Tear strength	ASTM D 624 B	[N/mm]	> 24
Linear shrinkage		[%]	< 0.4

With 5 wt % Catalyst T 51, after 4 days at 23 °C / 50 % rel. humidity.

These figures are only intended as a guide and should not be used in preparing specifications.

viscosity of 60,000 mPa s and still be just pourable.

Comprehensive instructions are given in our leaflet "WACKER RTV-2 Silicone Rubber - Processing."

Detailed information on other mold-making compounds in the ELASTOSIL® M range is contained in our brochure "ELASTOSIL® M. Mold-Making Compounds For Maximum Precision".

### Storage

ELASTOSIL® M 4512 should be stored between 5 °C and 30 °C in the tightly closed original container. The 'Best use before end' date of each batch appears on the product label.

Catalysts T 21, T 26, T 51 and T 56 should be stored in the sealed original bottles between 5 °C and 25 °C.

Storage beyond the date specified on the label does not necessarily mean that the product is no longer usable. In this case however, the properties required for the intended use must be checked for quality assurance reasons.

### Safety information

Being a condensation-curing silicone rubber, ELASTOSIL® M 4512 contains only constituents that over many years have proved to be neither toxic nor aggressive. Special handling precautions are therefore not required, i.e., only the general industrial hygiene regulations apply.

Catalysts T 21, T 26, T 51 and T 56 contain organotin compounds, are flammable (flash points > 50 °C) and may cause irritation in contact with eyes and skin. Adequate protective measures are required.

Detailed safety information is contained in each Material Safety Data Sheet, which can be obtained from our sales offices.

### Additional information

Please visit our website [www.wacker.com](http://www.wacker.com)

The data presented in this leaflet are in accordance with the present state of our knowledge, but do not absolve the user from carefully checking all supplies immediately on receipt. We reserve the right to alter product constants within the scope of technical progress or new developments. The recommendations made in this leaflet should be checked by preliminary trials because of conditions during processing over which we have no control, especially where other companies' raw materials are also being used. The recommendations do not absolve the user from the obligation of investigating the possibility of infringement of third parties' rights and, if necessary, clarifying the position. Recommendations for use do not constitute a warranty, either express or implied, of the fitness or suitability of the products for a particular purpose.

The management system has been certified according to DIN EN ISO 9001 and DIN EN ISO 14001

**WACKER**

and ELASTOSIL® are registered trademarks of Wacker Chemie AG.

Version 5.00 from 16-03-07 replaces Version 4.00 from 10-08-05

For technical, quality, or product safety questions, please contact:

Wacker Chemie AG  
WACKER-SILICONES  
Hanns-Seidel-Platz 4  
D-81737 Munich, Germany

[www.wacker.com](http://www.wacker.com)  
[info.elastosil-m@wacker.com](mailto:info.elastosil-m@wacker.com)

**Product Information**

## Zwick 3110...17 Analogue Shore hardness testers

	<b>Value</b>	<b>Unit</b>
Scale value	1	Shore hardness unit
Accuracy limit	< ± 1	Shore hardness unit
Contact area, dia.	18	mm
Dimensions (height x width x depth)	80 x 65 x 30	mm
Weight with carry case (Zwick 3114...17/3110...13)	210/230	g

**Display of the individual test devices**

<b>Device</b>	<b>Indenter</b>	<b>Contact force</b>	<b>Spring force</b>	<b>Range of applications</b>	<b>Item number</b>
Zwick 3114/5 (Shore A)	Truncated cone Opening angle 35°	10 N	8.065 N	Soft rubber, elastomers, Natural rubber, PVC soft	<b>321618</b> <b>321619<sup>(†)</sup></b>
Zwick 3116/7 (Shore D)	Cone Opening angle 30°	50 N	44.5 N	Hard rubber, acrylic glass, polystyrene, rigid thermo-plasts	<b>321620</b> <b>321621<sup>(†)</sup></b>
Zwick 3112 (Shore B)	Cone Opening angle 30°	1 kg	8.065 N	Elastomers harder than Shore A	<b>342717</b> <b>342718<sup>(†)</sup></b>
Zwick 3113 (Shore C)	Truncated cone Opening angle 35°	5 kg	44.5 N	Middle hard elastomers and rubber materials	<b>342719</b> <b>342720<sup>(†)</sup></b>
Zwick 3110 (Shore 0)	Ball dia. 3/32 inch	1 kg	8.065 N	Soft elastomers and textile fabrics	<b>342714</b> <b>342715<sup>(†)</sup></b>
Zwick 3111 (Shore 00)	Ball dia. 3/32 inch	0.4 kg	1.10853 N	Foam, sponge and cellular rubber	<b>320991</b>

<sup>(†)</sup> ... device with drag-pointer*PŘÍLOHA 9 Produktový list durometru Zwick 3110 1/2*



Technical Data	Unit	MCR 102	MCR 302	MCR 502
Bearing		Air	Air	Air
EC motor		Yes	Yes	Yes
Maximum torque	mNm	200	200	230 (300)*
Min. torque, rotation	nNm	5	1	1
Min. torque, oscillation	nNm	7.5	0.5	0.5
Angular deflection (set value)	μrad	0.5 to ∞	0.05 to ∞	0.05 to ∞
Min. angular velocity	rad/s	10 <sup>-6</sup>	10 <sup>-6</sup>	10 <sup>-6</sup>
Max. angular velocity	rad/s	314	314	314
Max. speed	1/min	3000	3000	3000
Min. angular frequency	rad/s	10 <sup>-7</sup>	10 <sup>-7</sup>	10 <sup>-7</sup>
Max. angular frequency	rad/s	628	628	628
Normal force range	N	0.01-50	0.005-50	0.005-50 (70)*
Normal force resolution	mN	1	0.5	0.5
Max. temperature range	°C	-150 to +1000	-150 to +1000	-150 to +1000
Toolmaster™		Yes	Yes	Yes
QuickConnect	-	Yes	Yes	Yes
Automatic gap control / setting (AGC/AGS)	-	Yes	Yes	Yes
TruGap™	-	Yes	Yes	Yes
TwinDrive-ready	-	No	No	Yes
Direct strain controller	-	Yes	Yes	Yes
Direct stress controller	-	Yes	Yes	Yes
TruRate™	-	Optional	Yes	Yes
TruStrain™	-	Optional	Yes	Yes
Normal force and velocity profiles, tack, squeeze	-	Optional	Yes	Yes
Raw data (LAOS, waveform)	-	Optional	Optional	Yes
*Rheometer EC-Twist 502 with max. 300 mNm / 70 N available on request				

*PŘÍLOHA 10 Produktový list durometru Zwick 3110 2/2*

Měřicí Bod	Čas	Dynamická Viskozita	Soufázový Modul	Ztrátový Modul	Otáčky	Úhlová Frekvence	Útlumový Faktor	Úhel vychýlení
	[s]	[Pa·s]	[Pa]	[Pa]	[μNm]	[rad/s]	[1]	[mrad]
47	274	5,68	5,08	35,40	1,09	6,28	6,96	0,40
48	280	5,69	5,17	35,40	1,09	6,28	6,83	0,40
49	286	5,68	5,12	35,30	1,09	6,28	6,91	0,40
50	291	5,71	5,21	35,50	1,10	6,28	6,81	0,40
51	297	5,71	5,09	35,50	1,10	6,28	6,97	0,40
52	303	5,71	4,95	35,50	1,10	6,28	7,19	0,40
53	309	5,70	5,11	35,40	1,10	6,28	6,93	0,40
54	314	5,74	5,12	35,70	1,10	6,28	6,97	0,40
55	320	5,73	5,13	35,60	1,10	6,28	6,94	0,40
56	326	5,74	5,22	35,70	1,10	6,28	6,83	0,40
57	332	5,76	5,23	35,80	1,11	6,28	6,85	0,40
58	337	5,75	5,17	35,80	1,11	6,28	6,92	0,40
59	343	5,78	5,31	35,90	1,11	6,28	6,76	0,40
60	349	5,77	5,24	35,80	1,11	6,28	6,84	0,40
61	355	5,77	5,20	35,90	1,11	6,28	6,89	0,40
62	360	5,77	5,23	35,90	1,11	6,28	6,86	0,40
63	366	5,79	5,28	36,00	1,11	6,28	6,81	0,40
64	372	5,80	5,20	36,10	1,12	6,28	6,93	0,40
65	378	5,80	5,22	36,10	1,11	6,28	6,90	0,40
66	383	5,80	5,23	36,10	1,12	6,28	6,90	0,40
67	389	5,81	5,27	36,10	1,12	6,28	6,85	0,40
68	395	5,81	5,28	36,10	1,12	6,28	6,84	0,40
69	401	5,82	5,26	36,20	1,12	6,28	6,87	0,40
70	406	5,81	5,27	36,10	1,12	6,28	6,85	0,40
71	412	5,83	5,29	36,20	1,12	6,28	6,84	0,40
72	418	5,84	5,29	36,30	1,12	6,28	6,87	0,40
73	424	5,85	5,33	36,40	1,12	6,28	6,83	0,40
74	430	5,84	5,27	36,30	1,12	6,28	6,88	0,40
75	435	5,85	5,32	36,40	1,12	6,28	6,83	0,40
76	441	5,85	5,29	36,40	1,12	6,28	6,87	0,40
77	447	5,86	5,24	36,40	1,13	6,28	6,95	0,40
78	453	5,87	5,36	36,50	1,13	6,28	6,80	0,40
79	458	5,88	5,34	36,60	1,13	6,28	6,85	0,40
80	464	5,87	5,34	36,50	1,13	6,28	6,83	0,40
81	470	5,89	5,40	36,60	1,13	6,28	6,79	0,40
82	476	5,92	5,45	36,80	1,14	6,28	6,75	0,40
83	481	5,91	5,28	36,80	1,14	6,28	6,96	0,40
84	487	5,92	5,39	36,80	1,14	6,28	6,82	0,40
85	493	5,90	5,36	36,70	1,14	6,28	6,84	0,40
86	499	5,91	5,41	36,80	1,14	6,28	6,80	0,40
87	504	5,92	5,38	36,80	1,14	6,28	6,84	0,40
88	510	5,95	5,51	36,90	1,14	6,28	6,70	0,40
89	516	5,95	5,36	37,00	1,14	6,28	6,90	0,40
90	522	5,94	5,43	36,90	1,14	6,28	6,80	0,40
91	527	5,95	5,42	37,00	1,14	6,28	6,82	0,40
92	533	5,95	5,48	37,00	1,14	6,28	6,75	0,40
93	539	5,96	5,48	37,10	1,15	6,28	6,77	0,40

*PŘÍLOHA 11 Měřicí protokol reometru Anton Paar 1/3*

Měřicí Bod	Čas	Dynamická Viskozita	Souřazový Modul	Ztrátový Modul	Otáčky	Úhlová Frekvence	Útlumový Faktor	Úhel vychýlení
	[s]	[Pa·s]	[Pa]	[Pa]	[μNm]	[rad/s]	[1]	[mrad]
1	9,39	5,57	10,90	33,30	1,07	6,28	3,06	0,56
2	15,10	5,90	11,90	35,10	1,13	6,28	2,94	0,56
3	20,90	6,14	12,30	36,60	1,18	6,28	2,98	0,56
4	26,70	6,49	13,00	38,70	1,25	6,28	2,97	0,56
5	32,40	6,72	15,00	39,40	1,29	6,28	2,63	0,56
6	38,20	7,09	14,30	42,20	1,36	6,28	2,95	0,56
7	43,90	7,43	15,40	44,10	1,43	6,28	2,86	0,56
8	49,70	7,81	16,40	46,30	1,50	6,28	2,82	0,56
9	55,50	8,19	17,30	48,50	1,57	6,28	2,80	0,56
10	61,20	8,60	18,30	50,90	1,65	6,28	2,78	0,56
11	67,00	9,04	19,40	53,40	1,74	6,28	2,75	0,56
12	72,70	9,49	20,60	56,00	1,82	6,28	2,72	0,56
13	78,50	9,97	21,80	58,70	1,91	6,28	2,70	0,56
14	84,30	10,50	23,20	61,60	2,01	6,28	2,65	0,56
15	90,00	11,00	24,60	64,50	2,11	6,28	2,63	0,56
16	95,80	11,60	26,30	67,90	2,22	6,28	2,58	0,56
17	102,00	12,10	27,70	71,10	2,33	6,28	2,56	0,56
18	107,00	12,80	29,70	74,80	2,46	6,28	2,52	0,56
19	113,00	13,40	31,50	78,30	2,58	6,28	2,49	0,56
20	119,00	14,20	33,70	82,50	2,72	6,28	2,45	0,56
21	125,00	14,90	35,80	86,50	2,86	6,28	2,41	0,56
22	130,00	15,70	38,30	90,80	3,01	6,28	2,37	0,56
23	136,00	16,50	40,90	95,50	3,17	6,28	2,33	0,56
24	142,00	17,40	44,00	100,00	3,33	6,28	2,27	0,56
25	148,00	18,30	46,80	105,00	3,52	6,28	2,25	0,56
26	153,00	19,30	50,10	110,00	3,70	6,28	2,20	0,56
27	159,00	20,30	53,60	116,00	3,89	6,28	2,16	0,56
28	165,00	21,40	57,50	122,00	4,10	6,28	2,11	0,56
29	171,00	22,50	61,50	128,00	4,32	6,28	2,08	0,56
30	176,00	23,70	66,00	134,00	4,55	6,28	2,03	0,56
31	182,00	25,00	70,60	140,00	4,79	6,28	1,99	0,56
32	188,00	26,30	75,60	147,00	5,04	6,28	1,95	0,56
33	194,00	27,70	81,00	154,00	5,31	6,28	1,90	0,56
34	199,00	29,20	86,90	161,00	5,59	6,28	1,86	0,56
35	205,00	30,70	93,00	169,00	5,88	6,28	1,82	0,56
36	211,00	32,30	99,60	177,00	6,19	6,28	1,78	0,56
37	217,00	34,00	107,00	185,00	6,52	6,28	1,74	0,56
38	222,00	35,80	114,00	194,00	6,85	6,28	1,69	0,56
39	228,00	37,70	122,00	203,00	7,21	6,28	1,66	0,56
40	234,00	39,60	131,00	212,00	7,58	6,28	1,62	0,56
41	240,00	41,70	140,00	221,00	7,97	6,28	1,58	0,56
42	246,00	43,80	149,00	231,00	8,37	6,28	1,55	0,56
43	251,00	46,00	160,00	241,00	8,80	6,28	1,51	0,56
44	257,00	48,30	170,00	251,00	9,24	6,28	1,48	0,56
45	263,00	50,80	182,00	262,00	9,71	6,28	1,44	0,56
46	269,00	53,20	194,00	273,00	10,20	6,28	1,41	0,56
47	274,00	55,90	206,00	284,00	10,70	6,28	1,38	0,56

Měřicí Bod	Čas	Dynamic ká Viskozita	Soufázový Modul	Ztrátový Modul	Otáčky	Úhlová Frekvence	Útlumov ý Faktor	Úhel vychýlení
	[s]	[Pa·s]	[Pa]	[Pa]	[μNm]	[rad/s]	[1]	[mrad]
1	7,51	2,16	3,48	13,10	0,41	6,28	3,77	0,56
2	13,30	2,19	3,41	13,30	0,42	6,28	3,91	0,56
3	19,00	2,19	3,48	13,30	0,42	6,28	3,82	0,56
4	24,80	2,20	3,52	13,40	0,42	6,28	3,79	0,56
5	30,50	2,19	3,55	13,30	0,42	6,28	3,75	0,56
6	36,30	2,22	3,63	13,50	0,43	6,28	3,71	0,56
7	42,10	2,25	3,63	13,60	0,43	6,28	3,75	0,56
8	47,80	2,24	3,56	13,60	0,43	6,28	3,83	0,56
9	53,60	2,25	3,76	13,70	0,43	6,28	3,63	0,56
10	59,30	2,27	3,71	13,80	0,44	6,28	3,72	0,56
11	65,10	2,32	3,93	14,00	0,45	6,28	3,57	0,56
12	70,90	2,30	3,85	13,90	0,44	6,28	3,62	0,56
13	76,60	2,29	3,88	13,90	0,44	6,28	3,58	0,56
14	82,40	2,27	3,96	13,70	0,44	6,28	3,47	0,56
15	88,10	2,34	4,37	14,00	0,45	6,28	3,21	0,56
16	93,90	2,33	3,96	14,10	0,45	6,28	3,56	0,56
17	99,70	2,34	3,94	14,10	0,45	6,28	3,59	0,56
18	105,00	2,36	3,97	14,30	0,45	6,28	3,59	0,56
19	111,00	2,37	4,10	14,30	0,46	6,28	3,49	0,56
20	117,00	2,37	4,07	14,30	0,46	6,28	3,51	0,56
21	123,00	2,37	4,06	14,30	0,46	6,28	3,52	0,56
22	128,00	2,39	4,02	14,50	0,46	6,28	3,60	0,56
23	134,00	2,44	4,42	14,70	0,47	6,28	3,32	0,56
24	140,00	2,41	4,22	14,60	0,46	6,28	3,45	0,56
25	146,00	2,40	3,82	14,60	0,46	6,28	3,81	0,56
26	151,00	2,41	4,29	14,50	0,46	6,28	3,38	0,56
27	157,00	2,45	4,50	14,70	0,47	6,28	3,27	0,56
28	163,00	2,52	3,42	15,50	0,48	6,28	4,52	0,56
29	169,00	2,42	3,51	14,80	0,47	6,28	4,22	0,56
30	175,00	2,52	4,34	15,20	0,48	6,28	3,51	0,56
31	180,00	2,47	4,66	14,80	0,47	6,28	3,17	0,56
32	186,00	2,47	4,40	14,90	0,47	6,28	3,38	0,56
33	192,00	2,48	4,53	14,90	0,48	6,28	3,30	0,56
34	198,00	2,49	4,48	15,00	0,48	6,28	3,34	0,56
35	203,00	2,50	4,55	15,10	0,48	6,28	3,31	0,56
36	209,00	2,52	4,59	15,10	0,48	6,28	3,30	0,56
37	215,00	2,52	4,57	15,20	0,48	6,28	3,31	0,56
38	221,00	2,54	4,62	15,20	0,49	6,28	3,30	0,56
39	226,00	2,53	4,83	15,10	0,49	6,28	3,14	0,56
40	232,00	2,52	4,63	15,20	0,49	6,28	3,27	0,56
41	238,00	2,57	4,75	15,40	0,49	6,28	3,24	0,56
42	244,00	2,55	4,84	15,30	0,49	6,28	3,16	0,56
43	249,00	2,58	4,75	15,50	0,50	6,28	3,26	0,56
44	255,00	2,58	4,83	15,50	0,50	6,28	3,21	0,56
45	261,00	2,59	4,86	15,50	0,50	6,28	3,20	0,56
46	267,00	2,58	4,82	15,50	0,50	6,28	3,22	0,56
47	272,00	2,60	4,92	15,60	0,50	6,28	3,17	0,56