



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## ÚSTAV MATERIÁLOVÝCH VĚD A INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING

# VLIV KONDICIONOVÁNÍ NA MECHANICKÉ VLASTNOSTI POLYMERŮ VYRÁBĚNÝCH TECHNOLOGIÍ VSTRÍKOVÁNÍM

THE INFLUENCE OF CONDITIONING ON THE MECHANICAL PROPERTIES OF  
POLYMERS PRODUCED BY INJECTION MOLDING TECHNOLOGY

## DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Tomáš Neužil

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Libor Válka, CSc.

BRNO 2018



# Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav materiálových věd a inženýrství
Student:	<b>Bc. Tomáš Neužil</b>
Studijní program:	Aplikované vědy v inženýrství
Studijní obor:	Materiálové inženýrství
Vedoucí práce:	<b>Ing. Libor Válka, CSc.</b>
Akademický rok:	2017/18

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

## **Vliv kondicionování na mechanické vlastnosti polymerů vyráběných technologií vstřikováním**

### **Stručná charakteristika problematiky úkolu:**

Vlastnosti většiny polymerních materiálů jsou ovlivněny jejich schopností absorbovat vlhkost z okolního prostředí. V důsledku navlhavosti polymerů dochází ke změnám např. mechanických vlastností tohoto typu materiálů. Z důvodu absorpce vlhkosti dochází nejen k rozměrovým změnám dílů, ale také k poklesu pevnostních charakteristik a modulu pružnosti, k nárůstu hodnot deformačních charakteristik (tažnosti) a k růstu houževnatosti.

### **Cíle diplomové práce:**

Cílem práce bude komparace zadaných typů polyamidů na základě vyšetření trendu změn materiálových charakteristik získaných při statickém a dynamickém zatěžování v závislosti na stupni kondicionování.

V teoretické části práce bude uveden popis a porovnání několika typů polymerních materiálů, použitých v experimentální části práce včetně popisu vlivu plniv na jejich vlastnosti. Pozornost bude věnována problematice navlhavosti polymerů, zejména s ohledem na kinetiku děje v souvislosti s tzv. kondicionováním. Bude rozebrán vliv navlhavosti polymerních materiálů na jejich mechanické vlastnosti.

Experimentální část práce bude spočívat ve stanovení statických a dynamických materiálových charakteristik vybraných typů polymerních materiálů vyráběných technologií vstřikováním v závislosti na stupni kondicionování.

### **Seznam doporučené literatury:**

DUCHÁČEK, Vratislav. Polymery-výroba, vlastnosti, zpracování, použití. 2. vyd. Praha: VŠCHT v Praze, 2006, 280 s. ISBN 80-7080-617-6.

PTÁČEK, Luděk a kol. Nauka o materiálu I. Brno: CERM, 2003, 516 s. ISBN 80-7204-283-1.

DOMININGHAUS, Hans. Plastic for Engineers – Materials, Properties, Applications. Munich: Hanser, 1993, 785 s. ISBN 3-446-15723-9.

ČSN EN ISO 1110. Plasty - Polyamidy - Zrychlené kondicionování zkušebních těles. Praha: ÚNMZ, 1999. 8 s.

ČSN EN ISO 527-2. Plasty - Stanovení tahových vlastností - Část 2: Zkušební podmínky pro tvářené plasty. Praha: ÚNMZ, 2012. 16 s.

ČSN EN ISO 179-1. Plasty - Stanovení rázové houževnatosti metodou Charpy - Část 1: Neinstrumentovaná rázová zkouška. Praha: ÚNMZ 2010. 24 s.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2017/18

V Brně, dne

L.S.

prof. Ing. Ivo Dlouhý,  
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D. CSc.  
děkan fakulty

## **ABSTRAKT**

Cílem diplomové práce je určit změnu mechanických vlastností třech typů navlhavých polymerních materiálů (polyamidů) v závislosti na obsahu absorbované vody. Před testováním byla zkušební tělesa všech třech typů materiálů umístěná do klimatizačních komor, dokud nebylo dosaženo rovnovážného (kondicionovaného) stavu. Stanoveny byly celkem tři hladiny pro kondicionaci, které zastupovaly kromě standardní hladiny určené pro kondicionaci i oba extrémní stavy, tedy stav, kdy byl materiál zcela vysušen a stav, kdy byl materiál uveden do stavu obsahující největší možné množství absorbované vody. S rostoucím obsahem vázané vody dochází k charakteristickým změnám mechanických vlastností materiálu, jako je pokles pevnosti a modulu pružnosti a nárůst houževnatosti a tažnosti. Pro zkoumání změn vlastností materiálů byly provedeny zkoušky tahem a zkoušky pro stanovení rázové houževnatosti Charpy jak pro zkušební tělesa bez vrubu, tak i pro tělesa opatřena vrubem. Mimo změny mechanických vlastností byla rovněž pozorována rychlost absorpce vody v závislosti na materiálu a jeho výplni.

Klíčová slova: Navlhavost, Polymer, Injekční vstřikování, Polyamid, Mechanické vlastnosti

## **ABSTRACT**

The aim of the thesis is to determine change of mechanical properties of three types of damp polymeric materials (polyamides) depending on the water content inside material. Before testing, specimens of all three types of materials were placed inside the air conditioning chambers until equilibrium (conditioned) state was reached when the specimens received the maximum possible amount of water from the environment. A total of three conditioning levels were set, representing besides the standard level of conditioning both extreme states like state when the material was fully dried and the state where the material content the largest possible amount of water. With the increasing content of water bound in material, there is a characteristic change in the mechanical properties of the material, such as a decrease in strength and modulus of elasticity and an increase in toughness and ductility. To examine material properties change, tensile and Charpy impact tests were performed, Charpy impact tests were performed for both specimens with and without a notch. Besides changes in mechanical properties, the rate of water absorption was also observed depending on the materials and its filling.

Keywords: Damp, Polymer, Injection molding, Polyamide Mechanical properties

## **CITACE**

NEUŽIL, T. *Vliv kondicionování na mechanické vlastnosti polymerů vyráběných technologií vstřikováním*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2018. 45 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Libor Válka, CSc..

## **ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ**

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracoval samostatně a na základě literatury a pramenů uvedených v Seznamu použité literatury.

V Brně dne 25. května 2018

.....  
Bc. Tomáš Neužil

## **PODĚKOVÁNÍ**

Děkuji tímto Ing. Liboru Válkovi, CSc. za vedení a pomoc při zpracování mé diplomové práce. Také bych chtěl poděkovat Ing. Martinu Kachlíkovi, Ph.D., Ing. Lukáši Řehořkovi, Ph.D. a Ing. Igoru Moravčíkovi, Ph.D. za pomoc při provádění experimentů.

# OBSAH

1 ÚVOD.....	2
2 TEORETICKÁ ČÁST .....	3
2.1 Polymery a jejich struktura .....	3
2.2 Navlhavost polymerů .....	7
2.3 Plasty.....	9
2.3.1 Rozdělení plastů .....	9
2.3.2 Polyamidy.....	10
2.3.3 Přísady do polymerů.....	11
2.3.4 Technologie vstřikování plastů.....	11
2.4 Kompozity.....	12
2.4.1 Částicové kompozity .....	14
2.4.2 Vlákná a vláknové kompozity .....	14
3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST .....	19
3.1 Experimentální materiál .....	19
3.2 Zkušební tělesa.....	19
3.3 Kondicionace.....	21
3.4 Zkouška rázové (vrubové) houževnatosti metodou Charpy.....	23
3.5 Zkouška tahem .....	27
4 DISKUZE .....	33
5 ZÁVĚR.....	38
LITERATURA .....	39
SEZNAM SYMBOLŮ .....	41
SEZNAM OBRÁZKŮ.....	43
SEZNAM TABULEK .....	44
SEZNAM PŘÍLOH.....	45

# 1 ÚVOD

S polymerními nebo kompozitními materiály se v dnešní době setkáme téměř všude. V mnohých oblastech jsou dnes již téměř nenahraditelné. To je způsobené mnoha faktory, jako například neustále se zvyšujícím sortimentem termoplastů (ať už výrobou nových typů polymerů anebo modifikací dosavadních polymerů), nebo možností vytvořit vhodnou volbou vstupních materiálů a vhodně zvolenou technologií zpracování materiál s přesně požadovanými vlastnostmi. [1]

Čemu je však u polymerních materiálů potřeba věnovat pozornost je jejich náchylnost na změnu mechanických vlastností nebo na degradační procesy způsobené vlivem prostředí, kterému jsou vystaveny. Polymerní materiály se s časem mění a to vlivem změn molekulární a nadmolekulární struktury, které o makroskopických vlastnostech rozhodují. Významným faktorem změn mechanických vlastností je schopnost některých polymerních materiálů absorbovat a zadržovat vodu. Změna mechanických vlastností vlivem rostoucího obsahu absorbované vody v materiálu je natolik citlivá, že u jednoho materiálu můžeme sledovat na dvou rozdílných místech světa (vlivem působení teploty a vzdušné vlhkosti) rozdílné mechanické chování. Degradace polymerních materiálů však může mít mnoho povah, například oxidační, fotooxidační, termickou, radiační, chemickou nebo mikrobiologickou a jejich kombinace. [3]

Znalost vlivu externích podmínek na chování a vlastnosti polymerních materiálů je nutnou podmínkou pro jejich efektivní použití v konstrukční praxi.

## 2 TEORETICKÁ ČÁST

### 2.1 Polymery a jejich struktura

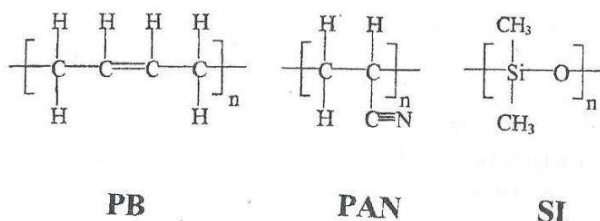
Polymery jsou přírodní nebo syntetické makromolekulární látky s přesně definovaným chemickým vzorcem, tvořené mnohonásobně opakovanou základní monomerní jednotkou. Základem struktury polymerních materiálů je atom uhlíku C, který je schopný v důsledku své atomové stavby tvořit čtyři kovalentní vazby svírající úhel  $109,5^\circ$ . Vazby tvořené atomy uhlíku mohou být jednoduché (nasycené uhlovodíky) nebo dvojně či trojně (nenasycené uhlovodíky). V nejjednodušších organických sloučeninách dochází k navázání atomu vodíku H na nevyužité vazby za vzniku sloučenin nazývaných uhlovodíky nebo karbohydráty. Každý typ vazby se vyznačuje rozdílnými vlastnostmi, konkrétně různou pevností popsanou tzv. disociační energií (energie potřebná k rozštěpení vazby) a různou délkou (vzdálenost mezi zapojenými atomy). [2]

Syntetické polymery vznikají chemickými reakcemi z nízkomolekulárních sloučenin, tzv. polymeracemi. Polymerace jsou dvojího typu, a to polymerace adiční a polymerace kondenzační. Adiční polymerace probíhá opakovaním adičního procesu, který může být iniciovaný např. přítomností volných radikálů. Reaktivním místem je při této reakci dvojná vazba. Při adiční polymeraci nedochází ke vzniku nízkomolekulární látky, kterou bývá nejčastěji voda. Naproti tomu během kondenzační polymerace chemicky reagují odlišné monomery, což vede ke vzniku polymerního řetězce a vedlejší nízkomolekulární látky (např.  $H_2O$ ). [2, 3, 5]

Strukturu polymerů lze popsat z hlediska submolekulárního, molekulárního a nadmolekulárního.

#### A) Submolekulární struktura

Submolekulární struktura (obr. 1) v podstatě představuje chemickou strukturu polymeru. Základními charakteristikami jsou druhy atomů a vazeb, rozmístění a velikost bočních skupin (substituentů) na uhlíkových atomech a rozmístění vazeb. Uvnitř jedné makromolekuly jsou atomy mezi sebou poutány kovalentními vazbami. Právě druh kovalentních vazeb ovlivňuje rozhodujícím způsobem vlastnosti materiálu, a to nejen jeho mechanickou pevnost, ale také stabilitu polymeru při působení korozního prostředí nebo při působení zvýšených teplot. Makromolekuly jsou pak poutány o jeden řád slabšími, sekundárními van der Waalsovými vazbami. [2]



obr. 1 Submolekulární struktura polymerů PB – polybutadien, PAN – polyakrylonitril, SI – silikon (polydimetylsiloxan) [2]

## B) Molekulární struktura

Pojmem molekulární struktura (obr. 2) se rozumí uspořádání makromolekul z hlediska velikosti a její distribuce, hustoty sítě, větvení a vzájemného uspořádání opakujících se konstitučních jednotek.

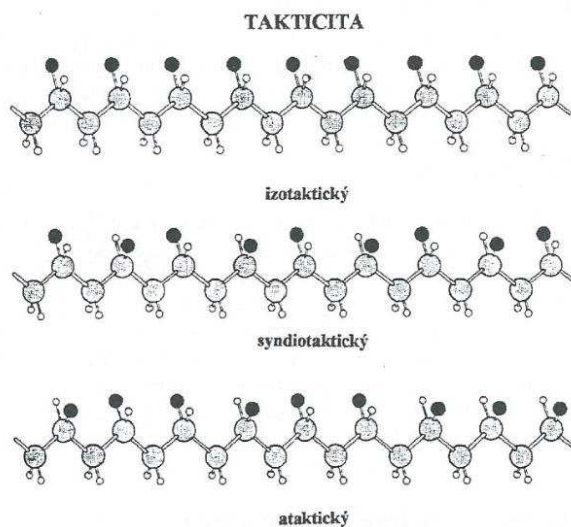
Jednou z nejvýznamnějších molekulárních charakteristik je délka makromolekul. Výrazně totiž ovlivňuje nejen mechanické a fyzikální vlastnosti, ale také zpracovatelské vlastnosti polymerů (viskozitu taveniny). Aby měl polymer požadované fyzikální a mechanické vlastnosti, musí během polymerační reakce monomeru vzniknout molekuly s určitou minimální velikostí.

Při polymeraci v závislosti na typu monomeru a reakčních podmínkách mohou vzniknout makromolekuly lineární (převážná část termoplastů), rozvětvené nebo zesíťené (reaktoplasty, pryže). Vlastnosti zesíťených polymerů jsou závislé na počtu příčných vazeb, který je charakterizován síťovou hustotou. Tu lze kvantitativně vyjádřit jako např. molární zlomek zesíťených konstitučních jednotek. Na síťové hustotě závisí zejména mechanické vlastnosti za vyšších teplot.



obr. 2 Struktura (stavba) řetězce [3]

Z hlediska geometrické uspořádanosti (obr. 3), kde je kritériem poloha postranních substituentů, rozdělujeme polymery na ataktické (zcela nahodilé uspořádání postranních substituentů), a izotaktické (substituenty jsou umístěny na jedné straně vzhledem k asymetrickému uhlíku). Tato uspořádanost podstatně ovlivňuje krystalizační schopnost polymerů. [2]



obr. 3 Molekulární struktura polymerů [2]

### C) Nadmolekulární struktura

Nadmolekulární strukturou je myšleno vzájemné uspořádání makromolekul a útvarů vzniklých agregací jejich většího množství.

Předpokladem pro uspořádání makromolekulárních řetězců do vyšších útvarů je jejich schopnost nabývat různých tvarů. Pozice, které jednotlivé segmenty (části molekul) zaujímají, se nazývají konformace. Nejpravděpodobnější je konformace zcela nahodilého klubka a to kvůli snaze makromolekul zaujmout polohy, které odpovídají minimální volné energii systému. Měnit polohy skupin atomů je možné působením vnějších sil a tepelné energie, kdy molekulární řetězce zaujímají nové pozice. Řetězce nabývají různých konformací rotací okolo jednoduchých vazeb.

Polymery mají různé schopnosti krystalizace. I při sebelepší schopnosti krystalizace polymer nikdy nekrystalizuje v celém svém objemu a určitý podíl vždy zůstává v neuspořádaném, amorfním stavu. Takové polymery se nazývají semikrystalické. Důležitou strukturální charakteristikou je tzv. krystalinita (podíl krystalické fáze). Na krystalinitě závisí většina mechanických i fyzikálních vlastností kvůli rozdílné těsnosti uspořádání řetězců v amorfní a krystalické fázi. Nejběžnějším způsobem je stanovení krystalinity z hustoty [2].

$$X_c = \frac{\rho_c}{\rho_n} \cdot \left( \frac{\rho_n - \rho_a}{\rho_c - \rho_a} \right), \quad (1)$$

kde

$X_c$	hmotnostní podíl krystalické fáze [-],
$\rho_n$	hustota vzorku o neznámé krystalinitě [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ],
$\rho_c$	hustota ideálního krystalu, vypočtená z mřížkových parametrů elementární buňky, ve které polymer krystalizuje [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ],
$\rho_a$	hustota ideální amorfní fáze získaná např. extrapolací z teplotní závislosti hustoty taveniny na laboratorní teplotu [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ].

Na rozdíl od kovů nekrystalizují polymery v krychlových soustavách. Je to dáno řetězcovitým charakterem a značnou nesouměrností polymerních látek, díky čemuž nelze vytvořit periodicitu struktury odpovídající krychlovému uspořádání.

Lamelární krystaly jsou jedním z možných výsledků krystalizace polymerů. Elementární lamely lze připravit krystalizací z velmi zředěných roztoků. Nejčastěji mají tvar destičkovitých lamel vytvořených skládáním makromolekul. Lamely dosahují nejčastěji tloušťky 30 až 60 nm.

Dalším možným výsledkem krystalizace polymerů jsou sférolity, které lze připravit krystalizací z taveniny, nebo z koncentrovaných roztoků. Jsou to nadmolekulární útvary vznikající růstem lamel z jednoho krystalizačního centra. Během

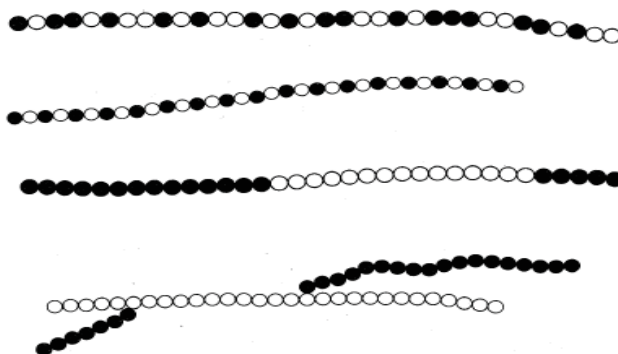
krystalizace sférolity rostou jako kulovité útvary a až po vzájemném dotyku se vytvářejí polyhedrální útvary. Dokonalost sférolitu, stejně jako jejich velikost jsou dány krystalizačními podmínkami a mohou mít vliv na mechanické vlastnosti polymerů, např. na jejich houževnatost.

Důležitým faktorem ovlivňujícím vlastnosti polymerů je orientace makromolekulárních řetězců. Nejjednodušším způsobem usměrnění řetězců je orientace osová (axiální). Osa řetězce je rovnoběžná s referenčním směrem, např. směrem toku taveniny při vytlačování nebo směr mechanického dloužení. Ideální orientace však není možné v reálných podmínkách dosáhnout. Do referenčního směru je orientován vždy pouze určitý podíl molekulárních segmentů. Hovoříme o určitém stupni orientace. Ten je důležitou charakteristikou, protože výrazně ovlivňuje mechanické vlastnosti a anizotropii mechanických vlastností ve výrobcích. [2, 5, 14]

## D) Kopolymery

Kopolymery jsou polymery, jejichž makromolekuly jsou tvořeny z monomerů dvou nebo více druhů s různým uspořádáním (v případě tří typů monomerů se výsledný produkt nazývá terpolymer, v případě čtyř a více druhů se používá označení multipolymer). U kopolymerů se molekuly mohou lišit uspořádáním komonomerních jednotek (komonomer je monomer účastnící se kopolymerace). V závislosti na uspořádání (obr. 4) kopolymery dělíme na statické (nahodilé střídání jednotek), alternující (pravidelné střídání jednotek), blokové (pravidelné střídání úseků řetězce tvořených jednotkami daného typu) a roubované (vzniká roubováním jednoho typu monomeru na řetězec tvořený monomerem jiného typu). Schopnost připravovat kopolymery s různě uspořádanou molekulární strukturou je jeden ze způsobů jak modifikovat jejich vlastnosti.

Kopolymerace je z hlediska technické praxe značně významná, jelikož umožňuje upravovat polymer a jeho fyzikální vlastnosti požadovaným směrem. Samotné vlastnosti závisí na poměru monomerů a jejich uspořádání. Typickým příkladem je např. kopolymer polypropylenu, který vzniká polymerací ethenu a propenu. Účelem je získat materiál se zvýšenou rázovou houževnatostí i za bodu mrazu. [2, 5, 7]



obr. 4 Organizace zapojení merů u kopolymerů [3]

## 2.2 Navlhavost polymerů

Navlhavost polymerů je dlouhodobý vratný proces, obecně chápaný jako schopnost látek přijímat vlhkost z okolního prostředí do doby, než je dosaženo tzv. rovnovážného stavu, kdy vlhkost látky, potažmo polymeru, odpovídá relativní vlhkosti okolního prostředí. Z této definice vyplývá, že se nejedná o materiálovou konstantu. Doba, po kterou je polymer schopný přijímat vodu ze svého prostředí je závislá především na jeho chemickém složení, relativní vlhkosti a teplotě okolí i tloušťce polymerního dílu. [7, 8]

### A) Příčiny navlhavosti

Hlavními příčinami navlhavosti polymerů je složení materiálu a jejich chemická struktura. Z chemického hlediska budou navlhat snáze ty polymery, které mají v řetězci makromolekuly přítomny atomy silně elektronegativních prvků (souvisí tedy s jejich polaritou). Jedná zejména o atomy kyslíku -O, dusíku -N, případně chloru -Cl a další atomy vyznačující se silnou elektronegativitou. Elektronegativita se v chemii využívá k vyjádření schopnosti atomu přitahovat vazebné elektrony. Většina polymerních materiálů je tedy schopna více či méně přijímat vodu ze svého okolí. Do této skupiny polymerů, které se dají označit jako navlhavé, patří např. polyamidy (PA), polykarbonát (PC), polyoxymethylen (POM), kaučuky a další. Příčinou velmi nízké navlhavosti (pod 0,1 hm. %) je nepolární povaha polymerů. Tato skupina polymerů se označuje jako tzv. nenavlhavé polymery, mezi které vedle polytetrafluorethylenu (PTFE) patří pouze polyethylen (PE), polypropylen (PP) a polystyren (PS). Tyto polymerní materiály mají makromolekuly tvořeny výhradně atomy vodíku a uhlíku, vyznačující se přibližně stejnou schopností přitahovat vazebné elektrony. Schopnost navlhavosti polymerů je také závislá na typu a množství přísad. Organická plniva, která jsou na bázi přírodního materiálu (celulózy), např. dřevitá moučka, bavlna, vlákna juty, kokosu apod. navlhavost polymeru zvyšují, zatímco anorganická plniva, jako je např. mletý křemen, skleněná vlákna apod. ji budou snižovat. [7, 8, 9]

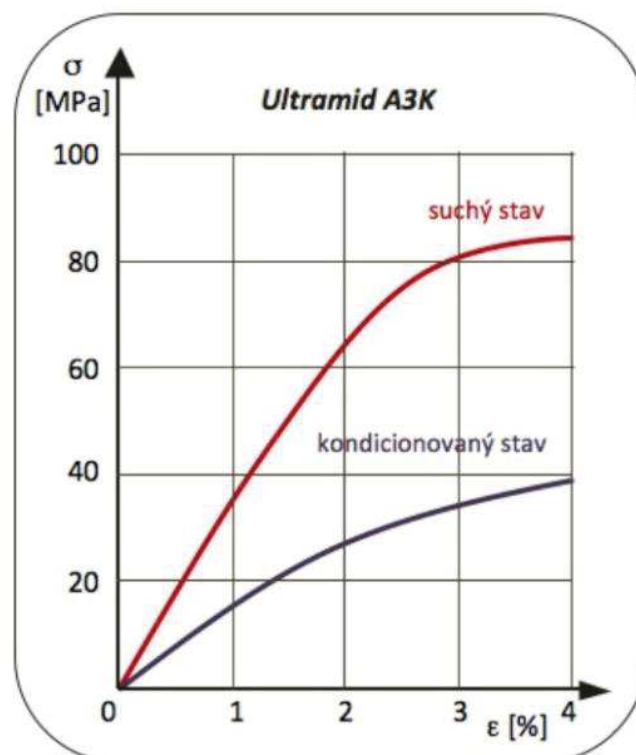
### B) Důsledky navlhavosti

Navlhavost polymerů má vliv na řadu jejich vlastností. Důsledkem rostoucího množství absorbované vody je pokles meze pevnosti a modulu pružnosti, zvýšení houževnatosti a tažnosti, zhoršení elektroizolačních vlastností, zhoršení odolnosti materiálu proti vyšším teplotám, pokles pevnosti svarového spoje, zvětšení rozměrů výrobku apod..

Před zpracováním se polymery zbavují absorbované vlhkosti (na úroveň 0,2 až 0,3 hm. %), neboť přítomnost vody má za následek nejen zhoršení kvality výrobku (vznikem vlhkostních šmouh nebo vzduchových bublin), ale také pokles mechanických vlastností vlivem štěpení makromolekul vodou za zvýšených teplot. Výrobky, které jsou zkoušené bezprostředně po jejich vyrobění, mají vlastnosti odpovídající vlastnostem

materiálu v suchém stavu. Během jejich používání však dochází u materiálu k přijímání vlhkosti z okolí, což vede např. ke snižování jeho pevnosti (obr. 5). Proto, aby bylo možné získat skutečné vlastnosti materiálu, je vhodné testované díly kondicionovat.

Kondicionace je proces, který směřuje k tomu, aby díl (vzorek) byl uveden do rovnovážného stavu vzhledem k vlhkosti okolí a teplotě, při kterých má být v praxi používán. Za běžných podmínek se navlhavé plasty kondicionují při standardním prostředí 23/50 (23 °C, 50% relativní vlhkost okolí) po dobu minimálně 88 hodin. Některé polyamidy a výrobky o tloušťce větší než je 2 mm vyžadují pro dosažení rovnovážného stavu delší dobu. [7]



obr. 5 Tahová křivka polymeru PA-66 [7]

### C) Sušení

Sušení je fyzikální děj, při kterém dochází vlivem působení tepla ke snížení obsahu vody či jiné kapaliny v látkách, aniž by došlo ke změně jejich chemického složení. Tento proces může probíhat u tuhých, kapalných i plynných látek, nejčastěji se však využívá k odstranění vlhkosti z pevných látek. [10]

O průběhu sušení rozhoduje charakter spojení vlhkosti s materiálem. V případě, kdy je voda vázána přilnavostí, jedná se o vlhkost povrchovou. Pokud je vázána kapilárními silami, voda se nachází v mikrokapilárech v celém objemu hmoty. Materiál (plast) je možné vysušit pouze do určité, tzv. rovnovážné vlhkosti. Ta je závislá na okolních podmínkách, konkrétně na teplotě a relativní vlhkosti okolí. Pokud má docházet k sušení, je nutné, aby pára, která se vytvoří těsně nad povrchem vlhkého materiálu, měla

vyšší tlak, než jaký je parciální tlak páry v okolním prostředí. Sušení bude poté probíhat až do vyrovnání těchto tlaků. K sušení se může použít čerstvý vzduch, suchý vzduch, horký vzduch, případně tlakový vzduch. Způsob sušení má vliv na dobu sušení.

Sušení nemůže probíhat za libovolně vysokých teplot nebo po libovolně dlouhou dobu. Je nutné volit doporučené teploty sušení, což má vliv na rychlost difuze molekul vody a tedy i na rychlost ztráty vlhkosti, a hlavně dobu sušení, jinak hrozí nebezpečí vzniku tzv. termooxidačního stárnutí (tzv. přesušení) polymeru. To se projevuje změnou barvy (např. u polyamidu dochází k zežloutnutí), ztrátou lesku nebo změnou mechanických vlastností polymeru. [11]

## 2.3 Plasty

Pojmem plasty se obecně označují materiály, které jsou z podstatné části tvořeny organickými makromolekulárními látkami (polymery). Kromě polymerů obsahují plasty za účelem specifické úpravy vlastností ještě další přísady (aditiva). Plasty, u kterých lze očekávat jistou užitnou úroveň vlastností (hlavně mechanických) nazýváme konstrukčními plasty. [2, 3]

### 2.3.1 Rozdělení plastů

Plasty se tradičně dělí na termoplasty a reaktoplasty.

**Termoplasty** při zahřívání měknou (eventuálně zkapalní) a po ochlazení opět ztvrdnou. Tento proces je zcela reversibilní a může být opakován. Z molekulárního hlediska, při zvyšování teploty dochází ke zmenšení sil sekundárních vazeb (vlivem zvýšení pohybu molekul), což způsobuje, že při aplikaci napětí mají sousedící řetězce usnadněný relativní pohyb. Při aplikaci příliš vysokých teplot však může dojít k degradaci materiálu a proces se stává v tomto případě nevratný. Struktura polymeru na konci zpracovatelského procesu je z hlediska submolekulární i molekulární stejná, jako u výchozího polymeru. Schopnost termoplastů opakovaně je převádět do stavu taveniny a poté je ochlazením nechat ztuhnout je základem recyklačních technologií termoplastů.

Naproti tomu u **reaktoplastů** dochází při zpracování díky chemické reakci a účinku tepla, záření nebo síťovacích činidel k vytvoření husté, prostorově zesíťované struktury, ve které dochází k pospojování původních molekul kovalentními vazbami. Tento proces se nazývá vytvrzování, u kaučuků vulkanizace. Ve vytvrzeném stavu je reaktoplast netavitelný a nerozpustný. Oproti termoplastům vynikají reaktoplasty vysokou tuhostí a tvrdostí, teplotní odolností a tvarovou stálostí za tepla, odolností proti UV záření a nerozpustností. Rovněž mají modul pružnosti v tahu  $E_t$  méně závislý na teplotě než termoplasty, díky čemuž nejsou mechanické vlastnosti v rozmezí obvyklých teplot použití tak proměnlivé. Jejich nevýhodou je nepatrná tažnost a obtížnější recyklace. [2, 3, 6]

Typickým zástupcem termoplastů, které se v dnešní době používají pro výrobu vláken, ale i jako konstrukční materiály nahrazující kovy, je skupina materiálu zvaná **polyamidy**.

### 2.3.2 Polyamidy

Polyamidy se řadí mezi semikrystalické termoplasty s krystalickým podílem 20 až 40 %. Znamější jsou tyto materiály pod názvem *nylony*. Jsou to lineární polymery charakterizované hlavním polymerním řetězcem, v němž dochází k pravidelnému střídání skupin -CO-NH- s větším množstvím skupin methylenových, tedy -CH<sub>2</sub>-. Používají se pro výrobu vláken i jako plasty. Vyrábějí se převážně na základě tří polyreakcí.

První řadou reakcí je polykondenzace  $\omega$ -aminokarboxylových kyselin nebo polymerace jejich cyklických aminů (laktamů). Za významné reprezentanty této řady můžeme považovat např. polykaprolaktam, obecně známý jako polyamid 6 (PA-6), respektive nylon 6, poly ( $\omega$  - aminoundekánová) kyselina označující se jako polyamid 11 (PA-11), respektive nylon 11 nebo polymer laktamu kyseliny 12-aminododekánové, tzv. polyamid 12 (PA-12), respektive nylon 12.

Další řadou reakcí jsou polykondenzace diaminů s dikarboxylovými kyselinami nebo jejich dichloridy. Reprezentanty této řady jsou např. polykondenzát hexamethylendiaminu s kyselinou adipovou, označující se jako polyamid 66 (PA-66), resp. Nylon 66, nebo polykondenzát hexamethylendiaminu s kyselinou sebakovou, označovaný jako polyamid 610, resp. Nylon 610.

Čísla, která se píší za označením „polyamid“ („nylon“) charakterizují výchozí polymery na základě počtu atomů uhlíku v jejich molekulách. Např. polymerací kaprolaktamu (cyklické sloučeniny obsahující šest atomů uhlíku v molekulách) vzniká polyamid 6, nebo polykondenzací lineárních monomerů hexamethylendiaminu s šesti atomy uhlíku a kyseliny adipové, která má rovněž šest uhlíkových atomů vznikne polyamid 66 (tj. 6 + 6). Tyto dva typy polyamidů jsou celosvětově nejrozšířenější.

Polyhexamethylenadipamid (PA-66) je v dnešní době nejrozšířenějším typem polyamidu vyráběného polykondenzací, pravděpodobně díky snadné dostupnosti obou surovin potřebných pro jeho výrobu, hexamethylendiaminu a kyseliny adipové. Polyamid 66 se vyrábí o polymeračním stupni v rozmezí 100 až 200. Ve srovnání s polyamidem 6 má vyšší teplotu tání, menší navlhavost a větší pevnost. Výhodu má především v tom, že neobsahuje žádný monomer, čímž odpadá jeho odstraňování a tudíž je možné jej bez obav použít např. k balení potravin. Pro tyto účely se zpracovává hlavně na fólie.

Polyamid 12 (PA-12) se připravuje polyreakcí probíhající za vyšších teplot, než při polymeraci 6-kaprolaktamu (používaného k výrobě polyamidu 6), a to nad 260 °C. Při této polyreakci dochází k silnému posunutí rovnováhy směrem k polymeru, což znamená, že výtěžek polymeru je téměř 100 %. Je možné ho zpracovávat vystřikováním i vytlačováním. PA-12 má dobrou pevnost a podobně jako PA-11 se vyznačuje nižší nasákavostí. Používá se na technické součásti s vyšší houževnatostí a odolností proti opotřebení, dobrými kluznými vlastnostmi a dobrou odolností proti korozi při napětí. [3,13]

Polyftalamid (PPA) je semikrystalický termoplast vyvinutý pro náročné aplikace. V porovnání s PA-6 a PA-66 má podstatně vyšší teplotu skelného přechodu i teplotu tání

( $T_g = 127\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $T_m = 310\text{ }^\circ\text{C}$ ). Jako ostatní polyamidy má velmi dobré mechanické vlastnosti. V čem však vyniká oproti běžným polyamidům je lepší odolnost proti creepu, cyklickému a teplotnímu namáhání a rovněž má lepší chemickou odolnost. V porovnání s PA-66 je méně navlhavý. Tento materiál představuje vzhledem k jeho vlastnostem a ceně jakýsi kompromis mezi tradičními konstrukčními polymery a speciálními, ale na druhou stranu dražšími materiály. [7]

### 2.3.3 Přísady do polymerů

Jak již bylo řečeno, plasty jsou v podstatě polymery obsahující nejrůznější přísady. Mezi nejdůležitější přísady patří stabilizátory, změkčovadla, plniva, síťovací činidla a barvicí činidla. Stabilizátory slouží k udržení vlastností polymeru na původních hodnotách během zpracování, skladování a použití. Změkčovadla upravují např. ohebnost, zpracovatelnost apod. Barvicí činidla slouží k zajištění estetických vlastností výrobku a dělí se na rozpustná (barviva) a nerozpustná (pigmenty). Cílem plniv je zlepšit mechanické nebo některé fyzikální vlastnosti, případně zlevnění plastu. Ta plniva, která zlepšují mechanické vlastnosti, zejména modul pružnosti, pevnost a houževnatost se obvykle označují jako vyztužující materiály a dělí se na částicová (např. uhlíčan vápenatý, saze aj.) a vláknová (např. uhlíková, skleněná vlákna aj.). Z fyzikálních vlastností plastů lze přísadami zlepšit např. elektrickou vodivost vlivem přidání kovových prášků nebo elektrovodivých sazí. Dalšími významnými přísadami jsou retardéry hoření, nadouvadla, antistatická činidla nebo kompatibilizátory, usnadňující přípravu polymerních směsí. [2]

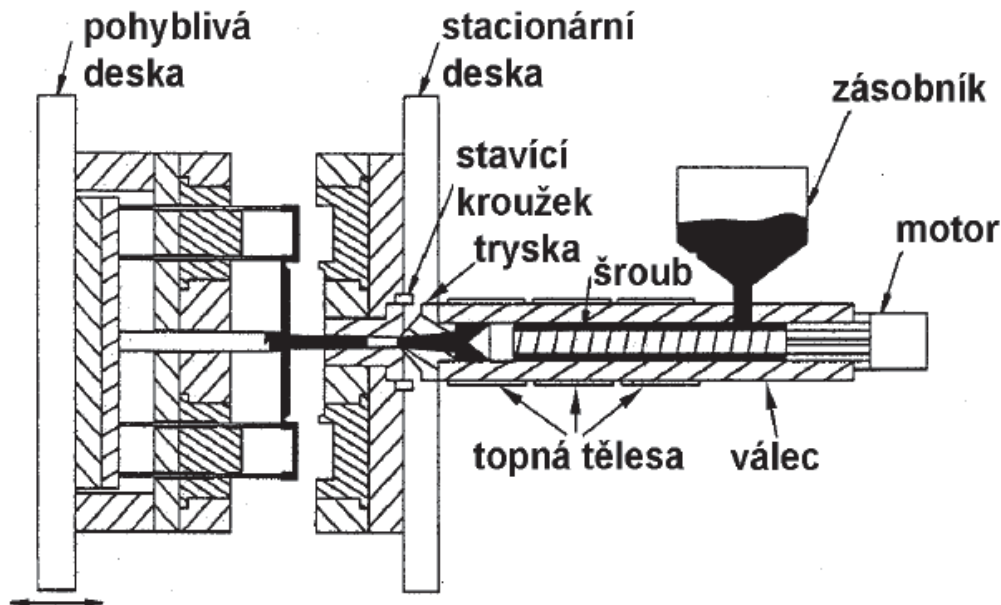
### 2.3.4 Technologie vstřikování plastů

Injekční vstřikování je v současné době nejpoužívanější technologií třídimenzionálního zpracování plastů, kterou je možné použít pro zpracování termoplastů, termoplastických elastomerů, polymerních směsí, kompozitů, ale i reaktoplastů, kaučuků a pryží. Jednoduše řečeno, podstatou technologie vstřikování je vysokotlaké vstříknutí určitého objemu plastického materiálu do uzavřené formy. Tato technologie vychází svým principem z technologie tlakového lití, ovšem za výrazně jiných teplot zpracování a tokových vlastností tavenin termoplastů. Typy a variace výrobků vzniklých injekčním vstřikováním jsou nekonečné.

Princip technologie vstřikování je následující. Plast (nejčastěji v podobě granulí), recyklát nebo regranulát je nasypán do násypky, ze které je odebírán pracovní částí vstřikovacího stroje (šnekem, pístem), která dopravuje hmotu do tavicí komory, kde za současného účinku tření a tepla plast taje a vzniká tavenina. Ta je následně vstřikována do dutiny formy, kterou zcela zaplní a získá její tvar a objem. Poté následuje dotlaková fáze pro snížení smrštění a rozměrových změn.

Plast ztuhne ve finální výrobek vlivem předávání tepla formě a postupným ochlazováním. Forma se poté otevře, finální výrobek je vyhozen ven z formy a celý výrobní proces se cyklicky opakuje. Ke vstřikování plastů se používají vstřikovací stroje,

kteří mohou být z hlediska typu pohonu elektrické, hydraulické nebo hybridní. Vstřikovací stroje mají na sobě dvě nezávislé jednotky, a to vstřikovací a uzavírací jednotku. Ty jsou řízeny řídicí mikroprocesorovou jednotkou. Schéma vstřikovacího stroje je možno vidět na obr. 6.



obr. 6 Injekční vstřikování [3]

Faktorů a parametrů, které ovlivňují konečné vlastnosti a kvalitu vstřikovaných plastových dílů je u technologie vstřikování poměrně velké množství. O konečných, užitých vlastnostech a kvalitě vstřikovaných plastových dílů rozhoduje druh plastu, technologické parametry, konstrukce výrobku, konstrukce vstřikovací formy a vlastní stroj. Jednotlivé parametry nepůsobí samostatně, ale vždy se navzájem ovlivňují. [3, 11]

## 2.4 Kompozity

Kompozity jsou materiály skládající se z minimálně dvou složek (fází), které se vyznačují fyzikální a chemickou odlišností. Nespojité složky se nazývají **výztuž**. Je obvykle tvrdší, tužší a pevnější. Dle geometrie výztuže se mohou kompozity dělit na dvě základní skupiny, a to na vláknové a částicové. Spojitá a obvykle poddajnější složka se nazývá **matrice**. Ta vzájemně spojuje vyztužující fázi a přenáší do ní zatížení. Rovněž chrání výztuž před vlivy okolí. Matrice by si měla udržet funkci pojiva i po prvních poruchách výztuže a její poměrné prodloužení při přetržení by mělo být větší, než mezní prodloužení výztuže. Tomuto požadavku však vyhovují pouze polymerní a kovové matrice.

Kompozity se připravují nejnadhěji, pokud je matrice v kapalném stavu (polymerní, kovová, skleněná a sklokeramická matrice). Základními charakteristikami kapalných matic jsou jejich povrchová energie a viskozita. Pokud má být výztuž dokonale obklopena maticí, je potřeba, aby při vysoké energii volného povrchu výztuže

měla kapalná matrice co nejmenší povrchovou energii, tedy aby při přípravě kompozitu došlo k dobrému smáčení výztuže. Nejmenší povrchovou energii mají matrice s malou kohezní energií, které jsou v tuhém stavu málo pevné. Sem patří všechny polymerní matrice. [2]

Aby mohl být materiál nazýván kompozitem, musí podle současného chápání těchto materiálů splňovat určité podmínky. První podmínkou je, že podíl výztuže v materiálu musí být větší než 5%. Dále vlastnosti výztuže a matrice se musí po mechanické, chemické a fyzikální stránce lišit. Výztuž je obvykle tužší a výrazně pevnější v tahu než matrice. Poslední podmínka říká, že kompozitní materiál musí být připraven mísením složek. Podle těchto podmínek nelze považovat za kompozit plasty obsahující pouze malá množství tuhých barviv, jako jsou částice sazí (černý pigment) nebo oxidů ( $\text{TiO}_2$  – bílý pigment) nebo částic elastomerů (přidávání elastomerních částic zvyšuje houževnatost, nejedná se však o výztuž) ani slitiny kovů, kde během tepelného zpracování nebo při ochlazování došlo k vyloučení tvrdé fáze. Kvůli poslední podmínce není možné považovat za kompozity ani eutektické slitiny kovů, u kterých došlo během tuhnutí taveniny k usměrněnému vyloučení tužších a tvrdších fází v podobě lamel nebo tyčinek. Na druhou stranu kov, který je disperzně zpevněný částicemi oxidů, se označuje jako kompozitní materiál, protože během jeho přípravy dochází k mechanickému míšení složek (např. hliník zpevněný částicemi  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ).

Vyztužující fáze kompozitních materiálů mohou nabývat různých rozměrů. Dle tohoto kritéria se dají rozdělit na mikrokompozitní, makrokompozitní a nanokompozitní materiály.

Největší význam v průmyslu mají **mikrokompozitní** materiály. Největší příčné rozměry výztuže (částic nebo vláken) jsou v rozmezí od 1 do 100  $\mu\text{m}$ . Mikrokompozitní materiály mají oproti kovům a jejich slitinám menší hustotu. Díky tomu mají příznivý poměr modulu pružnosti a pevnosti k hustotě, což znamená, že dosahují velké měrné pevnosti ( $\sigma_m/\rho$ ) a měrného modulu ( $E_v/\rho$ ).

**Makrokompozity**, jejichž výztuž dosahuje velikosti příčného průřezu v rozmezí 1 až 100 mm, nacházejí využití především ve stavebnictví. Jedná se o např. železobeton (beton zpevněný ocelovými lany nebo pruty), nebo polymerbetony (beton obsahující drcené kamenivo a pryskyřici). Za makrokompozity lze považovat i plátované kovy, vícevrstevné materiály a některé typy konstrukcí (chodníky a vozovky).

**Nanokompozity** jsou kompozitní materiály, které mají polymerní matici a částicovou výztuž, kde se rozměry částic pohybují v jednotkách nm. Příkladem nanokompozitů na polymerní bázi jsou termoplasty vyztužené částicemi jílu, které jsou destičkovitého tvaru a mají plošné rozměry v nm. [2]

## 2.4.1 Částicové kompozity

### A) Částicové kompozity s polymerní matricí

Částicové kompozity s polymerní matricí mají v porovnání s polymery větší modul pružnosti v tahu, vyšší tvarovou stálost za tepla a tepelnou vodivost, menší smrštění při chladnutí z teplot zpracování a nižší tepelnou roztažnost. V případě navlhavých polymerů (polyamidy) dochází díky částicím ke zmenšení rozměrové změny vlivem absorpce vody. Částice tedy nejsou pouhé plnivo sloužící ke snížení ceny polymeru, ale rovněž zlepšují jeho vlastnosti.

Částice se většinou vyrábí mikromletím anorganických materiálů. Jedná se především o hlinitokřemičitany (mstek, kaolin), vrstevnaté hlinitokřemičitany (slídy) a uhličitany (vápenec, živec). U reaktoplastů je možné použít práškový kov nebo cement, např. na přípravu tmelů z epoxidových pryskyřic. Kombinací částic bronzu (vyztužující materiál) s částicemi grafitu, sulfidu, molybdenu nebo polytetrafluorethylenu lze docílit zlepšení kluzných vlastností a zvýšení odolnosti proti otěru. [2]

### B) Částicové kompozity s kovovou nebo keramickou matricí

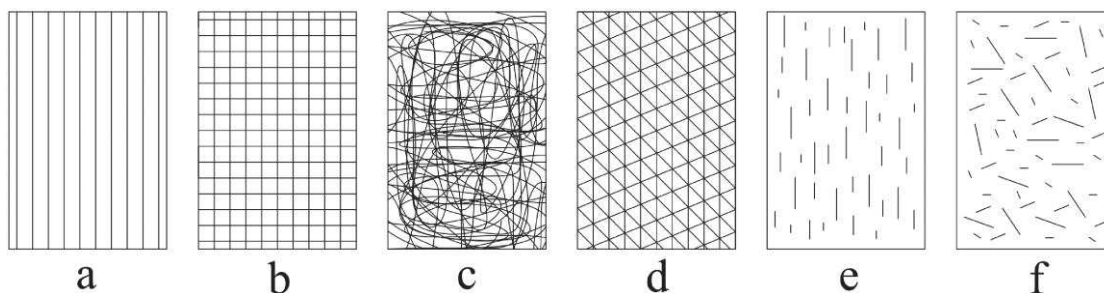
Vlivem přítomnosti velmi malých tvrdých částic v kovové matrici dochází v kompozitu k výraznému zvýšení tvrdosti, meze kluzu a pevnosti. Příkladem je disperzně zpevněný hliník, označovaný SAP („Sintered Aluminium Powder“), vyráběný práškovou metalurgií, ve kterém velmi malé částice  $Al_2O_3$  (hmotnostní podíl 14 %) účinně brzdí pohyb dislokací. Pro zpevnění hliníku je možné využívat také částice oxidu zirkonia ( $Zr_2O$ ) nebo karbidu křemíku (SiC). Další významnou skupinou disperzně zpevněných kovů jsou žárovečné slitiny niklu a wolframu vyztužené částicemi  $ThO_2$  nebo  $Y_2O_3$ .

V případě kompozitů s keramickou matricí jsou pro výztuž vhodné pouze acikulární částice, které křehkou, tvrdou a málo pevnou keramickou matrici zpevňují. Nejvhodnějším způsobem zpevnění a zhouževnatění keramických matric je však vyztužení vlákny, např. kovovými, keramickými nebo whiskery (velmi pevnými a ohebnými vláknovými monokrystal). [2]

## 2.4.2 Vlákna a vláknové kompozity

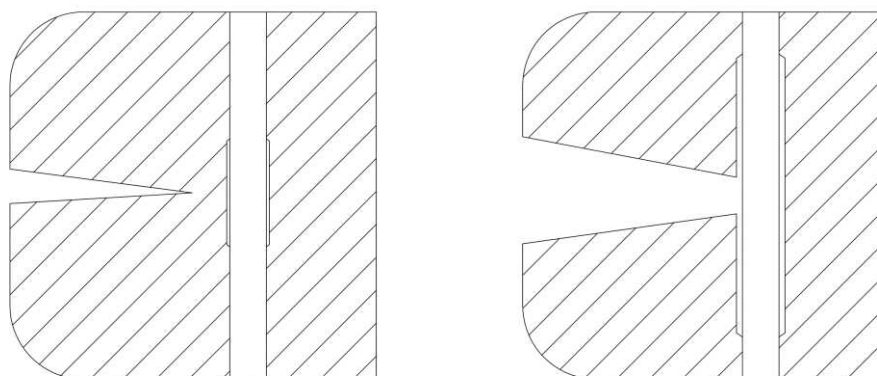
Při dělení vláknových kompozitů se vychází jednak z materiálu vláken, jednak z materiálu matrice. Vlákna mohou být skleněná, uhlíková, polymerní, keramická a kovová. Matrice může být polymerní, kovová, keramická, uhlíková, skleněná nebo sklokeramická.

Vlákna sloužící jako výztuž kompozitu mohou být v materiálu různě orientována (obr. 7), a to jednoose (jednosměrně), dvouose, víceose v rovině, prostorově (třídímenzionální výztuž), a nahodile. V případě krátkých (diskontinuálních) vláken a whiskerů mohou být vlákna orientována přednostně nebo nahodile.



obr. 7 Příklady rovinného uspořádání vláken: a) jednosměrné uspořádání kontinuálních vláken, b) dvouosá orientace, tkanina z kontinuálních vláken, c) rohož, nahodilá orientace kontinuálních nebo krátkých vláken (netkaná textilie), d) víceosá výztuž z kontinuálních vláken, e) krátká vlákna jednosměrně orientovaná, f) krátká vlákna s nahodilou orientací, upraveno podle [2]

Významnou vlastností kompozitů vyztuženými vlákny je tzv. synergický efekt (synergismem se označuje spolupůsobení několika složek vedoucí k zesílení účinku). Jedná se o skutečnost, že kompozit dosahuje lepších vlastností, než jaké by odpovídaly průměru odvozenému z vlastních složek, ze kterých se kompozit skládá. Negativní mechanické vlastnosti složek se u výsledného materiálu neprojevují. Např. kompozit obsahující křehká vlákna, která jsou uložena v křehké matrici, má dobrou vrubovou houževnatost a není vrubově citlivý. Mohou nastat četnější poruchy vláken i matrice aniž by došlo ke katastrofickému lomu. To je způsobeno tím, že křehká trhlinka se v kompozitu po interakci s vláknem šíří přednostně podél rozhraní vlákno/matrice (obr. 8). U keramických a grafitových matric se tento proces podporuje povrchovou úpravou vláken, která způsobí zmenšení adheze matrice k vláknem.



obr. 8 Mechanismus interakce trhliny v matrici a vlákna, upraveno podle [2]

Vlastnosti vláknových kompozitů jsou mimo jiné závislé i na součinitelích tepelné roztažnosti jednotlivých složek. K úplnému popisu kompozitu je nutné mít znalost termoelastických konstant. Problém velkého rozdílu součinitelů teplotní roztažnosti obou složek může nastat např. u kovových matric a keramických vláken. U polymerních matric hrají roli i objemové změny matrice, které jsou způsobené jejím případným navlháním. [2]

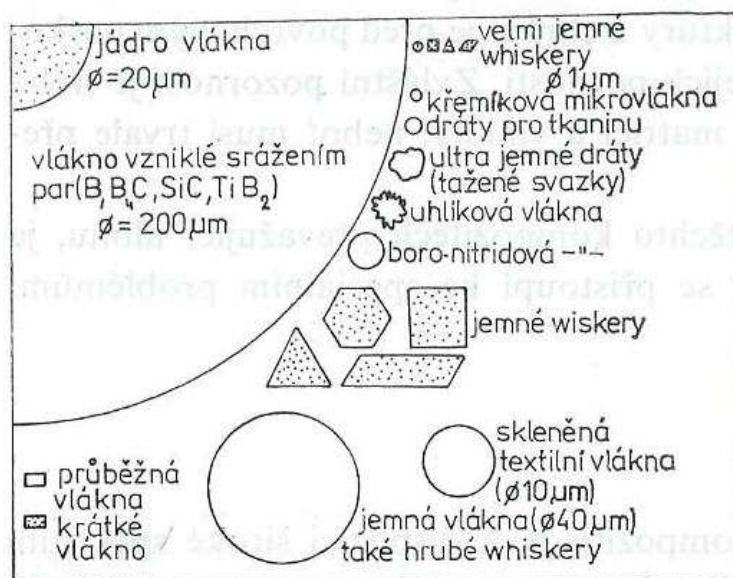
## A) Vlákna

Oproti materiálu v kompaktní podobě jsou vlákna, vyrobená ze stejného materiálu vždy mnohem pevnější. Se zmenšujícím se průřezem vláken roste jejich pevnost, protože se také zmenšují přirozené defekty a klesá jejich počet v jednotce objemu. Dalším faktorem, na kterém závisí pevnost v tahu, je délka vlákna. Pokud dojde k porušení vlákna, části vzniklé porušením mají větší pevnost než vlákno původní, jelikož k lomu vlákna došlo v místě, ve kterém se nacházel největší defekt.

Z hlediska sktruktury materiálu můžeme vlákna dělit na amorfní (sklo, křemen, bor), monokrystalická (keramická, kovová), polykrystalická (keramická, kovová, uhlíková), multifázová (karbidy) a makromolekulární (organická).

Whiskery jsou vláknové monokrystaly, které nemají kruhový průřez. Příčný rozměr mají okolo 0,1 až 100  $\mu\text{m}$  a jsou velmi pevné (pevnost v tahu až 14 GPa). Vzhledem k vysoké pevnosti a příčným rozměrům jsou ohebné, což znamená, že nedochází k jejich lámání při přípravě mechanickým míšením s práškovou kovovou nebo keramickou maticí.

U kompozitních materiálu vyztuženými vlákny není možné libovolně kombinovat různé typy matic a vláken. U polymerních matic se k vyztužení nepoužívají kovová nebo keramická vlákna nejen z cenových důvodů, ale také z toho důvodu, že tato vlákna mají větší hustotu, což by vedlo ke zmenšení měrné pevnosti a měrného modulu kompozitu. V případě kovových a keramických matic se zase nepoužívají vlákna s nedostatečnou tepelnou odolností. Každý materiál má určitou limitní teplotu, při které dochází k vnitřní degradaci. Do teploty 100  $^{\circ}\text{C}$  lze použít všechna vlákna. Od 100 do 400  $^{\circ}\text{C}$  lze použít skleněná, uhlíková, borová a keramická vlákna, od 400 do 700  $^{\circ}\text{C}$  vlákna kovová, keramická a uhlíková a nad teplotu 700  $^{\circ}\text{C}$  vlákna grafitová a keramická. Proto se mohou vlákna rozdělit do dvou skupin na vlákna pro polymerní matrice (skleněná, uhlíková a polymerní) a vlákna pro kovové a keramické matrice (uhlíková, kovová a keramická). Průřezy různými typy vláken jsou schematicky uvedeny na obr. 9.



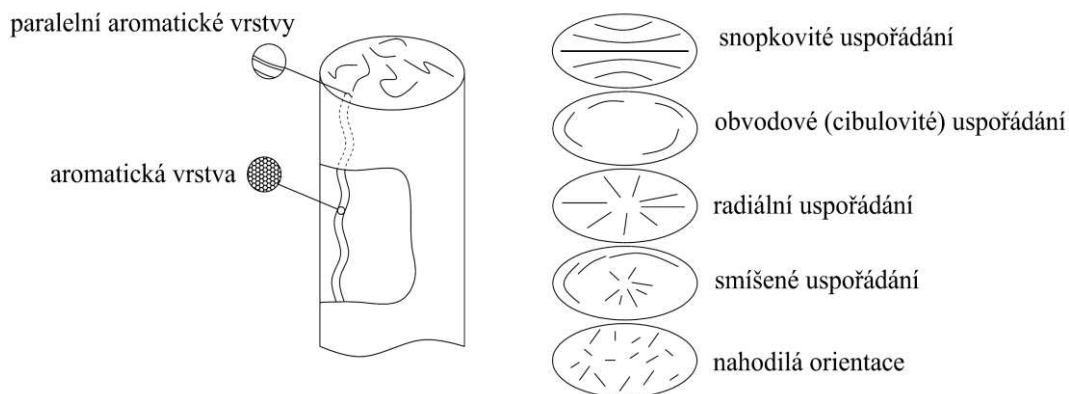
obr. 9 Relativní průřezová plocha a tvar některých vláken [12]

V úvahu je nutné brát i okolní prostředí, ve kterém se vlákna nachází. Grafitová vlákna mohou odolávat teplotám až 2 000 °C, ale musí být dokonale chráněna před oxidací. Borová vlákna začínají krystalizovat až při teplotách nad 600 °C, ale kvůli oxidaci a reakci s kovy není možné použít borová vlákna pro teploty nad 450 °C. U kovových vláken jsou problémem reakce probíhající mezi kovem a keramikou za vysokých teplot. [2, 12]

**Skleněná vlákna** jsou amorfní, což je způsobeno velmi malou krystalizační rychlostí roztavené směsi oxidů, ze kterých se vlákna vyrábí ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{B}_2\text{O}_3$ ). Pevnost je hlavní charakteristikou skleněných vláken. Pevnost v tahu vláken je silně závislá na stavu povrchu. Poškození povrchu, ke kterému může dojít vlivem silného abrazivního působení vláken, které nastává při sdružování vláken do svazků elementárních vláken, tzv. pramenů a adsorpce vzdušné vlhkosti snižuje tzv. panenskou pevnost čerstvě vytaženého vlákna, a to až o 50 %. Vlákna je možné ochránit před vzájemným poškozováním nanášením povlaků ještě před jejich sdružením.

Většina skleněných vláken je vyráběna rychlým tažením z taveniny (až  $400 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ ), což znamená, že struktura je fixována přibližně za  $10^{-5}$  s, obvykle s průměrem 3,5 až 20  $\mu\text{m}$ . Důležitý vliv na zvláknění má viskozita (50 až 100 Pa·s) a rychlost změny viskozity se změnou teploty. Obě tyto charakteristiky jsou závislé na chemickém složení skla. Neméně důležitá je teplota počátku tuhnutí taveniny, tedy teplota, při níž tekutá fáze a krystalická fáze mohou koexistovat v rovnováze. Proto nemůže být struktura skla definována pouze chemickým složením; dalším důležitým faktorem je teplotní historie. [2, 12]

**Uhlíková vlákna** jsou krystalická. Na rozdíl od polykrystalického grafitu, který má orientaci krystalů zcela nahodilou, mají uhlíková vlákna aromatické vrstvy, které obsahují pouze atomy uhlíku, orientovány přednostně ve směru podélné osy vlákna. Z důvodu uspořádání paralelních aromatických rovin ve směru normály k těmto rovinám, které je nepravidelné a nejedná se o hexagonální mřížku tvořenou sledem vrstev ABABAB..., je používání názvu grafitová vlákna nesprávné. Jedná se totiž o tzv. turbostratický uhlík, u kterého je vzdálenost aromatických vrstev větší než u grafitu. Vlastnosti vláken jsou závislé na paralelnosti aromatických rovin s osou vlákna, na dokonalosti a rozměrech krystalů, jejich uspořádání v příčném řezu vlákna (obr. 10), na obsahu vnitřních defektů (dutin, vměstků, trhlin) a na kvalitě povrchu vlákna. S využitím vhodných technologií je možné připravit produkty s velmi širokým spektrem vlastností. Přednostní orientace aromatických rovin v uhlíkovém vláknu ve směru podélné osy způsobuje vysokou anizotropii uhlíkových vláken. Modul pružnosti ve směru osy vlákna je výrazně větší než ve směru kolmo na osu, koeficient teplotní roztažnosti ve směru osy vlákna je záporný, kolmo k ose vlákna je ale kladný. Podobně je na tom i tepelná a elektrická vodivost, která je rovněž směrově závislá. Vhodnou orientací vláken je možno měnit vlastnosti kompozitu v širokém rozmezí. Lze vyrobit díl s minimálními rozměrovými změnami při rozmezí teplot - 200 až + 200 °C.



obr. 10 Schematický obrázek uspořádání aromatických rovin v uhlíkovém vláknu vyrobeném z polyakrylonitrilu PAN (vlevo) a z mezofázových smol (vpravo, pouze příčné řezy), upraveno podle [2]

Oproti skleněným vláknům jsou uhlíková vlákna křehčí. Ohebnost potřebná pro textilní zpracování je zaručena díky jejich menším průměrům (obvykle 6 až 8  $\mu\text{m}$ ). Pro lepší soudržnost vláken s polymery a pro zvýšení jejich odolnosti proti vzájemnému poškozování se uhlíková vlákna povrchově upravují. Nejčastěji se jedná o elektrochemickou úpravu povrchu (uhlíková vlákna jsou elektricky vodivá). Ta má za úkol očistit povrch od slabě vázaných plynů a zvýšit tak povrchovou energii vláken. Elementární vlákna se poté opatřují povlakem ze speciálních epoxydových pryskyřic. Kompozity se středněmodulovými uhlíkovými vlákny v epoxidové matrici mají velmi vysokou odolnost proti poškozování při dynamické únavě. [2, 12]

## B) Vláknové kompozity s polymerními matricemi

Vláknové kompozity s polymerní matricí se kromě velké měrné pevnosti a měrného modulu pružnosti ( $\rho_m = 900$  až  $1500 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ) používají také pro svoji korozivzdornost a dobrou chemickou odolnost, dobré dielektrické vlastnosti a elektrickou nevodivost (pouze kompozity se skleněnými, křemennými nebo polymerními vlákny) a dobrou propustnost pro rentgenové záření (kompozity s uhlíkovými vlákny).

Velmi produktivní výrobu dílů umožňují polotovary s termoplastickou matricí, jelikož oproti reaktoplastickým matricím, které je nutno vytvrdit, mají kratší výrobní cyklus. Termoplastický polotovar se před tvarováním pouze nahřeje a teplota formy se udržuje pod teplotou tvarové stálosti termoplastu. Nejlevnější matrice jsou polypropylenové (PP). Dražší, pevnější, tepelně a chemicky odolné termoplasty lze použít i pro značně mechanicky a tepelně namáhané součásti. Termoplasty jsou oproti reaktoplastům houževnatější, mez kluzu (případně pevnost) při 20 °C je ale obvykle menší než 100 MPa a modul pružnosti se pohybuje mezi 2 a 4 GPa. Maximální pracovní teplota závisí na nadmolekulární struktuře. U amorfních plastů se jedná o teplotu v průměru o 50 °C nižší, než je teplota skelného přechodu ( $T_g$ ). U semikrystalických termoplastů je o 50 až 100 °C nižší než teplota tání krystalů ( $T_m$ ). [2]

## 3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

### 3.1 Experimentální materiál

Změna mechanických vlastností materiálů vlivem absorpce vody byla hodnocena celkem na třech typech plastů. Prvním testovaným materiálem byl materiál označovaný obchodním názvem **Grivory GVL-5H HP black 9915** (dále jen Grivory). Jedná se o kopolymer založený na kombinaci tepelně stabilizovaného semikrystalického a částečně aromatického polyamidu, vyztuženého dlouhými skelnými vlákny v objemovém podílu 50 %. Vyznačuje se vysokou tuhostí a pevností v širokém teplotním rozmezí, nízkým creepem, nižší absorpcí vlhkosti, rozměrovou stabilitou a vyšší odolností proti nárazu i při nízkých teplotách v porovnání s nevyztuženou variantou polymeru GVL-5H.

V pořadí dalším testovaným materiálem byl materiál nesoucí obchodní označení **Grilamid LV-2A NZ black 9205** (dále jen Grilamid). V tomto případě se jedná se o polyamid 12, vyztužený 20 % skelných vláken (PA-12 + GF20). Charakteristická je pro něj vysoká odolnost proti absorpci vody a nárazům. Kromě technologie vstřikování je vhodný také pro zpracování extruzí.

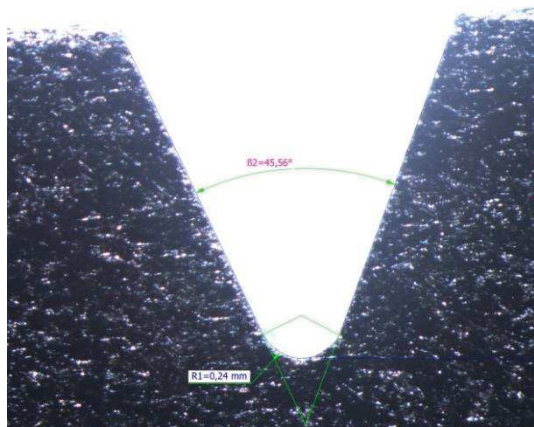
Posledním testovaným materiálem byl materiál **Grilon AZ3 black** (dále jen Grilon). Jedná se o polyamid 66 (PA-66 – Hi), modifikovaný pro zvýšení odolnosti vůči velkým rázům („high impact modified“). Je charakteristický vysokou houževnatostí jak za nízkých teplot, tak i v suchém stavu bezprostředně po tepelném zpracování (injekční vstřikování), nenáročností výroby a nízkou hustotou. [21, 22, 23]

### 3.2 Zkušební tělesa

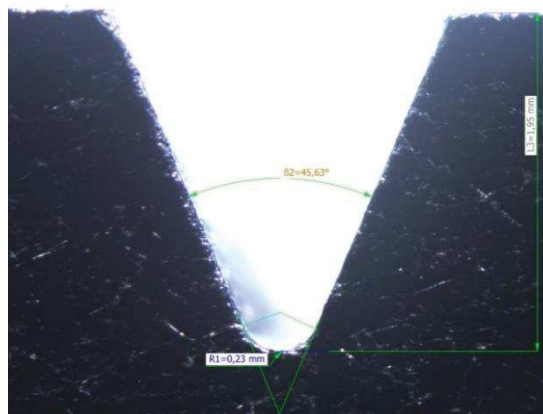
Zkušební tělesa pro *zkoušky rázové houževnatosti metodou Charpy* podle normy ČSN EN ISO 179-1 [17] byla dodána bez vrubu. Pro určení *vrubové houževnatosti Charpy* byla polovina z celkového počtu 180 zkušebních těles opatřena vruby dle podmínek daných uvedenou normou. Vruby byly v tělesech vytvořeny frézováním. Před vlastními zkouškami vrubové houževnatosti byla kvalita vrubů namátkově kontrolována (viz příklad na obr. 11). Ve všech případech byly vruby shledány vyhovujícími. Na fotografiích pořízených stereomikroskopem (obr. 11) je kromě geometrie vrubu rovněž patrný rozdíl v obsahu skelných vláken v jednotlivých typech polymerů.

Pro *zkoušku tahem* bylo použito celkem 77 zkušebních těles. Kromě procesu kondicionování (viz dále), který proběhl těsně před vlastní zkouškou, byla zkušební tělesa použita v dodaném stavu.

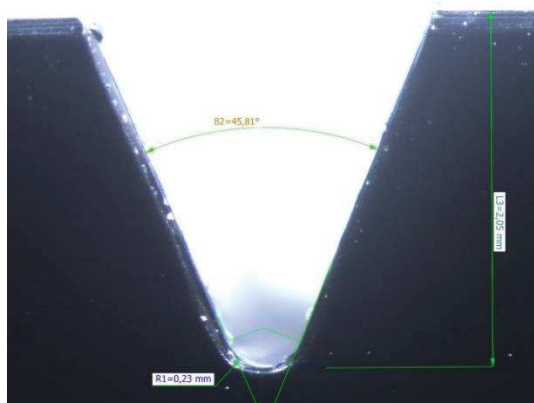
Zkušební tělesa pro zkoušky tahem i zkoušky rázové houževnatosti byla vyrobena technologií injekčního vstřikování.



a) Grivory (50% objemový podíl skelných vláken)



b) Grilamid (20% objemový podíl skelných vláken)



c) Grilon (0% objemový podíl skelných vláken)

obr. 11 Kontrola geometrie vrubu pomocí stereomikroskopu

Všechna zkušební tělesa byla označena podle schématu, uvedeného v tab. 1. Na přední straně tělesa bylo uvedeno označení materiálu a příslušná hladina kondicionování, na zadní straně potom pořadové číslo zkušební tělesa.

tab. 1 Způsob značení zkušebních těles

	Název	Označení
Materiál	Grivory GVL-5H HP black 9915	GVL
	Grilamid LV-2A NZ black 9205	LV
	Grilon AZ3 black	AZ
Hladina *)	Standardní hladina pro kondicionování	70/63
	Hladina pro absorpci maximálního množství vody	50/100
	Hladina určená pro vysoušení	70/0

\*) viz následující kapitola 3.3 Kondicionace

### 3.3 Kondicionace

Kondicionací se rozumí proces, při kterém jsou tělesa umístěna do klimatizační komory s kontrolovanou atmosférou (se stabilní relativní vlhkostí a teplotou) a jsou v ní ponechána, dokud není dosaženo tzv. rovnovážného stavu, kdy materiál již není schopen absorbovat žádné nebo pouze velmi malé množství vody z okolí. Dosažení rovnovážného stavu, tj. stavu, kdy struktura různých typů polymerů obsahuje stejné množství vody je nezbytnou podmínkou pro vzájemné porovnávání jejich vlastností (mechanických, fyzikálních apod.). Kondicionování nabývá na důležitosti zejména u vysoce navlhavých variant polymerních materiálů.

Ve standardní atmosféře 23/50 (23 °C, 50% relativní vlhkost) je dosažení rovnovážného stavu z časového hlediska velice náročným procesem. Kupříkladu polyamid PA 66 dosahuje rovnovážného stavu za uvedených podmínek po více než roce kondicionování. Z tohoto důvodu zavádí norma ČSN EN ISO 1110 pojem tzv. zrychleného kondicionování, kdy při zvýšené teplotě a vyšší relativní vlhkosti je rovnovážného stavu dosaženo za podstatně kratší dobu. [15] Umístěním polymerního materiálu do prostředí o teplotě 70 °C a relativní vlhkosti 63 % (70/63) je rovnovážného stavu v mnoha případech dosaženo v průběhu několika dní, přičemž množství vody ve struktuře je stejné nebo velmi blízké množství, které je ve struktuře polymeru přítomno po kondicionování na hladině 23/50. Pro kondicionování byly v rámci diplomové práce zvoleny ještě další dvě hladiny, konkrétně hladiny 50/100 (teplota 50 °C, relativní vlhkost 100 %) a 70/0 (teplota 70 °C, relativní vlhkost 0 %). Kondicionování na těchto hladinách teploty a relativní vlhkosti mělo simulovat stavy polymerů s maximálním (50/100) a minimálním (70/0) množstvím vody ve struktuře. Pro kondicionování na hladině (70/63) byla použita klimatizační komora CTS 70/350, na hladině 50/100 klimatizační komora D100 a pro vysoušení teplovzdušná sušárna s otevřenou cirkulací Memmert UNB. Vlastní kondicionace experimentálního materiálu byla provedena postupem, uvedeným ve výše uvedené normě a ve standardu ČSN EN ISO 291. [16]

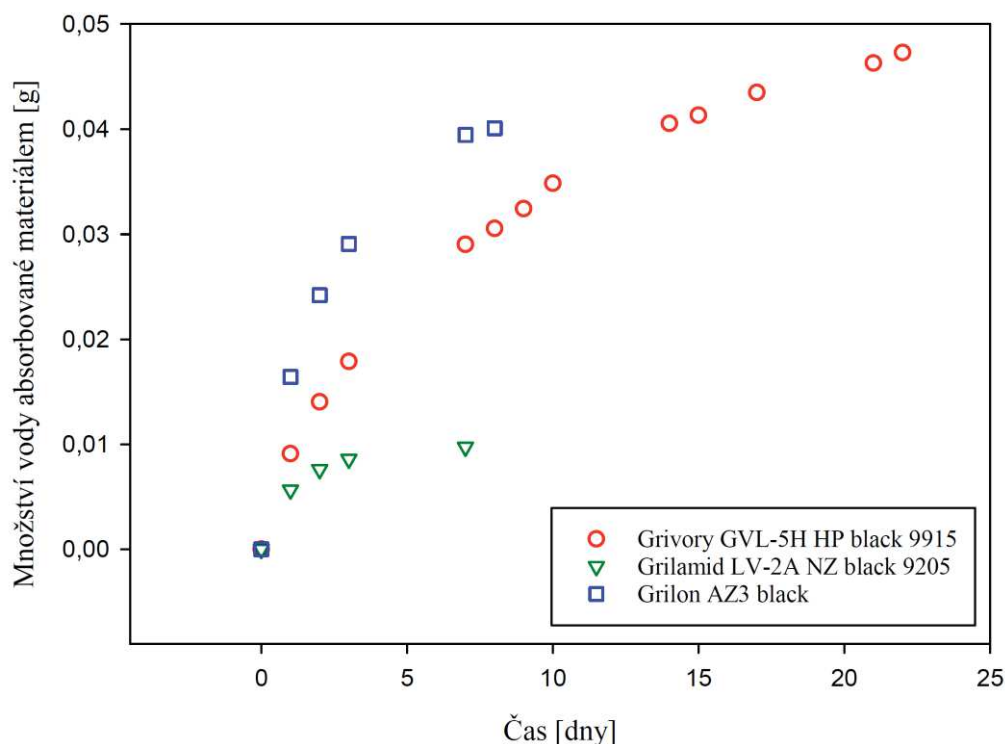
V průběhu kondicionování byla zkušební tělesa periodicky vyjímána z klimatizační komory a vážena. Ke kontrole hmotnosti byly použity analytické váhy s přesností vážení  $1 \cdot 10^{-4}$  g. Výsledky všech měření jsou uvedeny v Příloze č. 1. Kondicionace byla považována za ukončenou, jakmile tři následná vážení ležela v toleranci 0,1 % (pro každý materiál se doba kondicionování lišila). Veškerá měření kinetiky navlhavosti materiálů byla prováděna na stejném typu vzorků pro všechny hladiny i materiály. Celkové změny hmotností jednotlivých polymerů jako rozdíl hmotností před započítáním a po ukončení kondicionování jsou uvedeny v tab. 2.

**tab. 2** Změny hmotnosti v důsledku absorpce vody polymery

Hladina kondicionování	70/63			50/100		
	GVL	LV	AZ	GVL	LV	AZ
Celková hmotnost absorbované vody [g]	0,047	0,010	0,040	0,120	0,038	0,168
Nárůst hmotnosti [%]	0,910	0,267	1,180	2,320	1,030	4,950

### A) Hladina 70/63

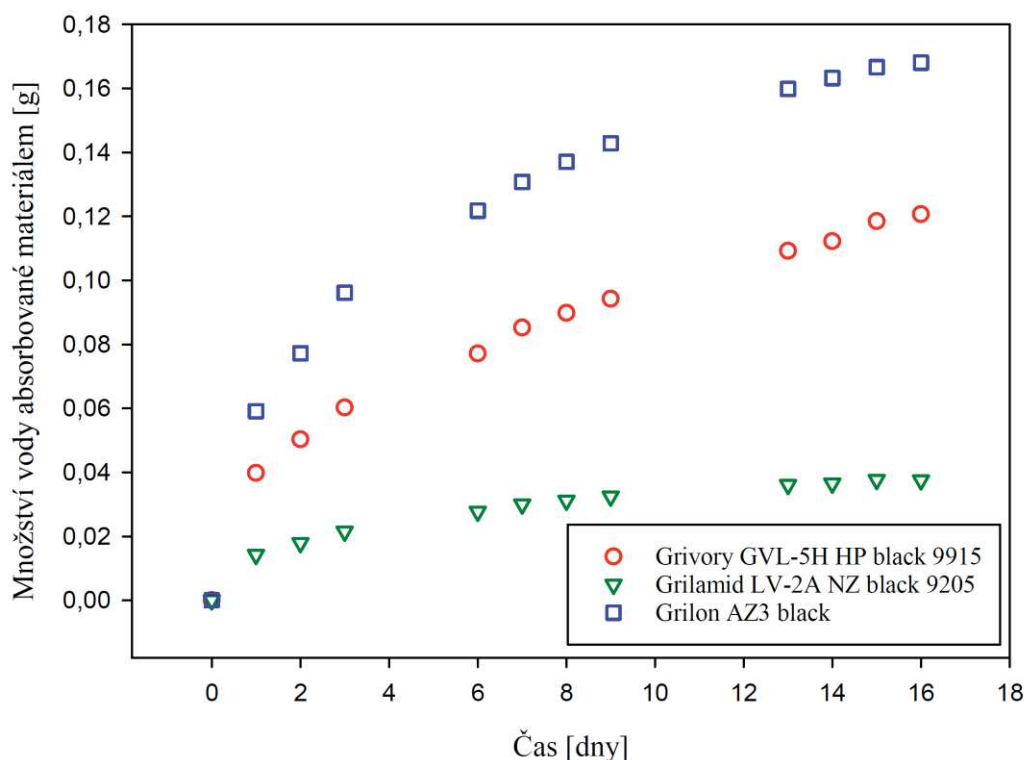
Na základě dat získaných během vážení zkušebních těles byl sestaven graf (obr. 12), znázorňující změnu hmotnosti v závislosti na době kondicionování pro všechny materiály. Graf však neukazuje celkové množství vody obsažené v materiálu, ale pouze množství, které materiál absorboval během procesu kondicionace. Obsah vody v materiálu před začátkem kondicionace není znám, jelikož zkušební tělesa byla před kondicionací po delší dobu skladována.



obr. 12 Porovnání nárůstu hmotnosti polymerů vlivem absorpce vody na hladině 70/63

### B) Hladina 50/100

Stejně jako v případě hladiny 70/63, byl i pro hladinu 50/100 sestaven graf znázorňující změnu hmotnosti všech materiálů v závislosti na době kondicionace (obr. 13). Jedná se opět o porovnání stavů těsně před kondicionací a po jejím ukončení, nikoli o celkové množství vody absorbované materiálem.



obr. 13 Porovnání nárůstu hmotnosti polymerů vlivem absorpce vody na hladině 50/100

### C) Hladina 70/0

Tato hladina byla zvolena pro vysoušení materiálu. Zkušební tělesa byla umístěná do sušárny s otevřenou cirkulací vzduchu a při teplotě 70 °C byla vysoušena po dobu čtyř dnů. V porovnání s předchozími hladinami, v tomto případě by nebylo možné ponechat zkušební tělesa v komoře po delší dobu, než bylo nutné z důvodu předejití možné tepelné degradace materiálu vlivem vystavení vysoké teplotě.

Pro hladinu 70/0 nebyla stanovována kinetika vysoušení materiálů. Důvodem byl příliš krátký čas vysoušení a nedostatečný počet naměřených dat, na základě kterých by bylo možné rychlost úbytku vody spolehlivě vyhodnotit.

### 3.4 Zkouška rázové (vrubové) houževnatosti metodou Charpy

Jak již bylo zmíněno dříve, pro zkoušku rázové (vrubové) houževnatosti bylo použito celkem 180 zkušebních těles, z toho polovina byla opatřena vrubem typu A dle normy. Pro každý materiál a hladinu kondicionování bylo zkoušeno deset těles s vrubem a deset těles bez vrubu. Zkouška byla provedena na kyvadlovém kladivu Heckert PSd 50/15 s nominální energií 15 J a rychlostí v okamžiku rázu  $3,8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Všechna měření probíhala za pokojové teploty (23 °C). Zkoušky byly provedeny v souladu s ČSN EN ISO 179-1 rázem na užší stranu zkušebního tělesa („edgewise“). [17] Pro jednotlivé série zkušebních těles byl určen průměr naměřených hodnot a směrodatná odchylka měření,

viz tab. 3 až tab. 8. Kompletní experimentální výsledky jsou uvedeny v tabulkách v Příloze č. 2 a v Příloze č. 3.

Před vlastní zkouškou byla všechna tělesa proměřena pro zjištění skutečných rozměrů (tloušťky  $h$ , šířky  $b$ , resp. šířky pod vrubem  $b_N$ ). Z naměřených hodnot energie  $E_d$  byla po odečtení ztrátové energie experimentálního zařízení  $E_z$  určena tzv. korigovaná energie  $E_c$  (viz rov. (2)), sloužící pro výpočet rázové houževnatosti  $a_{cU}$ , resp. rázové houževnatosti (vrubové houževnatosti) vrubovaných těles  $a_{cN}$  dle rov. (3) a rov. (4).

$$E_c = E_d - E_z \quad (2)$$

$$a_{cU} = \frac{E_c}{h \cdot b} \cdot 10^3 \quad (3)$$

$$a_{cN} = \frac{E_c}{h \cdot b_N} \cdot 10^3 \quad (4)$$

V uvedených rovnicích je

$E_c$	korigovaná energie [J]
$E_d$	energie změřená kladivem Charpy [J]
$E_z$	ztrátová energie kladiva Charpy [J]
$a_{cU}$	rázová houževnatost Charpy pro tělesa bez vrubu [kJ/m <sup>2</sup> ]
$a_{cN}$	vrubová houževnatost Charpy pro tělesa opatřena vrubem [kJ/m <sup>2</sup> ]
$h$	tloušťka zkušební tělesa [mm]
$b$	šířka zkušební tělesa [mm]
$b_N$	šířka zkušební tělesa pod vrubem [mm]

U zkušebních těles z materiálu Grilon nebylo možné na žádné hladině určit hodnotu rázové houževnatosti  $a_{cU}$  z důvodu nepřeražení zkušební tělesa. Tělesa byla po provedení zkoušky pouze mírně prohnutá (viz příklad na obr. 14), při vlastní zkoušce byla obvykle beranem kladiva vtažena mezi podpory a vymrštěna bez porušení mimo prostor kladiva. Tento jev lze přisuzovat vysoké houževnatosti testovaného materiálu. Při měření vrubové houževnatosti  $a_{cN}$  proběhly všechny zkoušky všech materiálů bez podobných problémů.



obr. 14 Zkušební těleso materiálu Grilon po provedení zkoušky rázové houževnatosti

#### A) Hladina 70/63

tab. 3 Výsledky zkoušky rázové houževnatosti, zkušební tělesa bez vrubu

	Grivory	Grilamid	Grilon
Průměr $a_{cU}$ [kJ/m <sup>2</sup> ]	57,59	68,54	-
Směrodatná odchylka [kJ/m <sup>2</sup> ]	4,37	9,53	-

tab. 4 Výsledky zkoušky rázové houževnatosti, zkušební tělesa s vrubem

	Grivory	Grilamid	Grilon
Průměr $a_{cN}$ [kJ/m <sup>2</sup> ]	7,85	19,28	68,90
Směrodatná odchylka [kJ/m <sup>2</sup> ]	0,60	0,59	2,41

#### B) Hladina 50/100

tab. 5 Výsledky zkoušky rázové houževnatosti, zkušební tělesa bez vrubu

	Grivory	Grilamid	Grilon
Průměr $a_{cU}$ [kJ/m <sup>2</sup> ]	63,54	65,08	-
Směrodatná odchylka [kJ/m <sup>2</sup> ]	3,98	3,53	-

**tab. 6** Výsledky zkoušky rázové houževnatosti, zkušební tělesa s vrubem

	Grivory	Grilamid	Grilon
Průměr $a_{cN}$ [kJ/m <sup>2</sup> ]	13,31	18,91	62,18
Směrodatná odchylka [kJ/m <sup>2</sup> ]	0,89	2,45	3,01

### C) Hladina 70/0

**tab. 7** Výsledky zkoušky rázové houževnatosti, zkušební tělesa bez vrubu

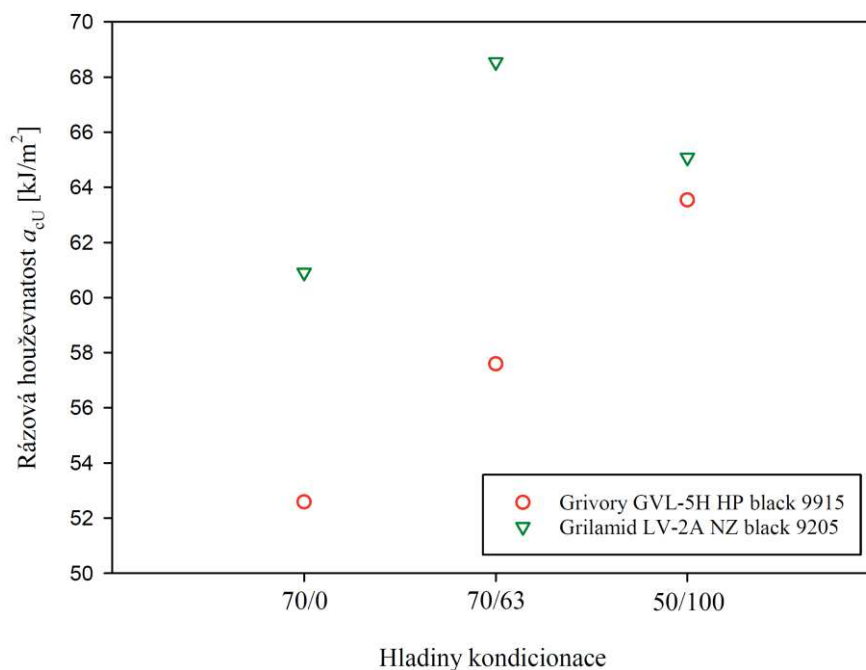
	Grivory	Grilamid	Grilon
Průměr $a_{cU}$ [kJ/m <sup>2</sup> ]	52,58	60,91	-
Směrodatná odchylka [kJ/m <sup>2</sup> ]	4,53	2,93	-

**tab. 8** Výsledky zkoušky rázové houževnatosti, zkušební tělesa s vrubem

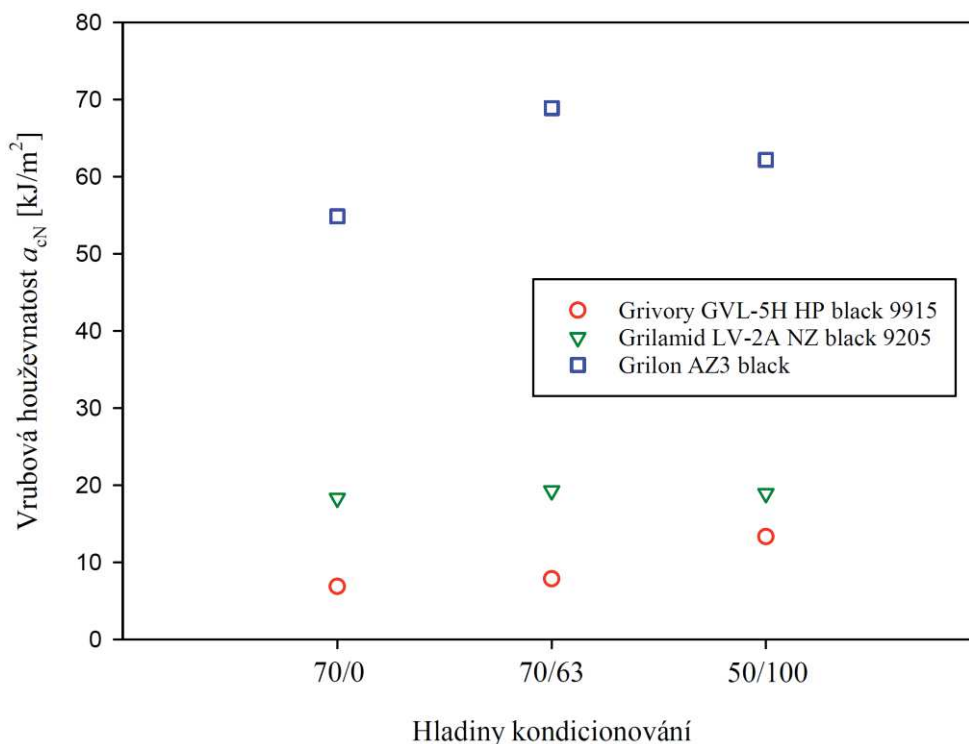
	Grivory	Grilamid	Grilon
Průměr $a_{cN}$ [kJ/m <sup>2</sup> ]	6,85	18,30	54,85
Směrodatná odchylka [kJ/m <sup>2</sup> ]	0,53	0,44	2,29

Střední hodnoty rázové, resp. vrubové houževnatosti uvedené v tab. 3 až tab. 8 jsou v grafické podobě uvedeny v obr. 15 a obr. 16.

Hladiny jsou seřazeny podle obsahu absorbované vody ve struktuře polymeru od nejmenšího (vysoušení na hladině 70/0) po maximální obsah vody (hladina 50/100).



obr. 15 Závislost rázové houževnatosti  $a_{cU}$  na obsahu ve vody ve struktuře polymeru (hladině kondicionování)



obr. 16 Závislost vrubové houževnatosti  $a_{cN}$  na obsahu vody ve struktuře polymeru (hladině kondicionování)

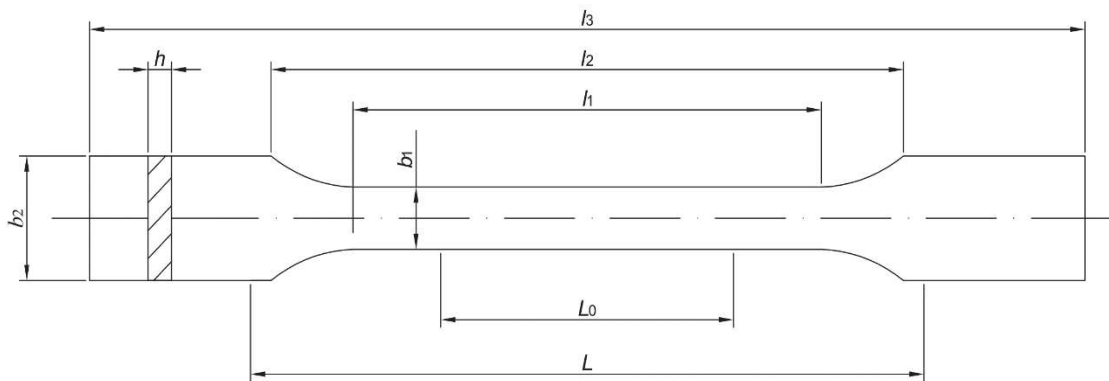
### 3.5 Zkouška tahem

Pro zkoušku tahem bylo použito celkem 77 zkušebních těles, a to osm těles pro každý materiál a hladinu kondicionování. Výjimku tvořil materiál Grilon na hladině kondicionování 70/0, kdy byla dvě tělesa vyřazena kvůli výskytu předčasných lomů, způsobených zjevnou výrobní vadou zkušebních těles.

Pro tentýž materiál bylo na hladině 70/63 testováno pět zkušebních těles navíc. Důvodem bylo podezření na předčasné porušení dvou zkušebních těles. Při bližším prozkoumání lomových ploch však nebyla zjištěna přítomnost výrobní či jiné vady a naměřené hodnoty byly zahrnuty do výsledkových souborů pro vyhodnocení mechanických charakteristik. Předčasné lomy dvou zmíněných zkušebních těles byly vyhodnoceny podle příslušné normy jako nehomogenní chování materiálu, které je třeba zahrnout do výsledkových souborů.

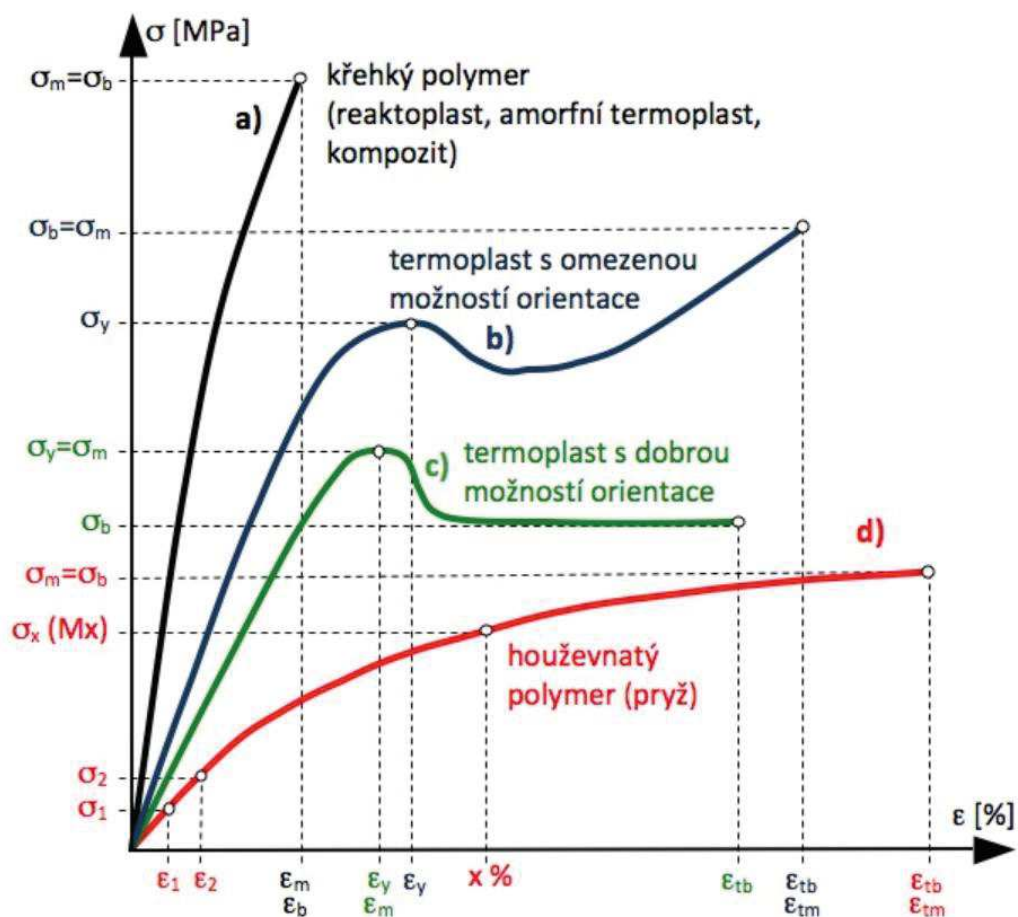
Zkouška tahem byla provedena na zkušebním stroji Zwick Z250All-round Line, tCII. Zkušební stroj byl vybaven extenzometrem, pomocí kterého bylo měřeno prodloužení zkušebních těles. Zkouška proběhla za pokojové teploty 23 °C v souladu s normou ČSN EN ISO 527-1 a ČSN EN ISO 527-2. [19, 20]

Zkoušena byla dle normy zkušební tělesa tvaru oboustranných lopatek (obr. 17) typu 1A (typ používaný pro vstřikovaná víceúčelová zkušební tělesa).



obr. 17 Tvar zkušebních těles pro zkoušku tahem, upraveno podle [7]

Deformační odezva na zatěžování polymerních materiálů, vyjádřená ve formě tahové křivky je závislá na vlastnostech konkrétního typu polymeru. Přehled typických tahových křivek, které je možné zaznamenat u polymerních materiálů v závislosti na úrovni jejich houževnatosti (křehkosti) je uveden na obr. 18.



obr. 18 Typické deformační křivky polymerů v tahu [7]

S ohledem na rozdílné deformační chování byly pro jednotlivé experimentální materiály zvoleny různé rychlosti zatěžování. Pro nejvíce křehký materiál Grivory byla stanovena rychlost zatěžování  $2 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ , pro materiál Grilamid rychlost  $5 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$  a pro nejvíce tažný Grilon rychlost zatěžování  $50 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ .

Tahové křivky materiálu Grivory a Grilamid odpovídají dle obr. 18 typu křivky „a“ (křivka pro křehký polymer). Materiál Grilon odpovídá typu křivky „d“ (křivka pro houževnatý polymer). Veškeré tahové diagramy jsou uvedeny v Příloze č. 4.

Výše uvedeným typům záznamů odpovídá výčet vyhodnocovaných charakteristik. Jednou z vyhodnocovaných veličin byl sečnový modul  $E_t$  v tahu (rov. (5)), stanovený z hodnot deformací  $\varepsilon_1 = 0,05 \%$  a  $\varepsilon_2 = 0,25 \%$  a z napětí odpovídajícím těmto deformacím. Jako další byla vyhodnocována deformace na mezi pevnosti  $\varepsilon_m$ , tedy deformace odpovídající hodnotě maximálního tahového napětí, nalezeného na tahové křivce (rov. (6)). Poslední vyhodnocenou veličinou byla mez pevnosti  $\sigma_m$ , odpovídající napětí při prvním lokálním maximu pozorovaném v průběhu tahové zkoušky (rov. (7)). Všechna zkušební tělesa byla, stejně jako v případě zkoušek rázové houževnatosti, před vlastní zkouškou tahem proměřena z důvodu zjištění jejich skutečných rozměrů.

$$E_t = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1} \quad (5)$$

$$\varepsilon_m = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (6)$$

$$\sigma_m = \frac{F_m}{A_0} \quad (7)$$

kde

$E_t$	sečnový modul [MPa]
$\sigma_1$	napětí odpovídající 0,05% deformaci [MPa]
$\sigma_2$	napětí odpovídající 0,25% deformaci [MPa]
$\varepsilon_1$	0,05% deformace [-]
$\varepsilon_2$	0,25% deformace [-]
$\varepsilon_m$	deformace na mezi pevnosti [-]
$\Delta L$	změna délky zkušebního tělesa [mm]
$L_0$	počáteční délka zkušebního tělesa [mm]
$\sigma_m$	mez pevnosti [MPa]
$F_m$	síla na mezi pevnosti [N]
$A_0$	obsah plochy průřezu zkušebního tělesa [ $\text{mm}^2$ ]

Pro jednotlivé typy polymerů a hladiny kondicionování (obsah vody ve struktuře) byly stanoveny průměrné hodnoty měřených charakteristik a jejich směrodatné odchylky. [18] Výsledky jsou uvedeny v tab. 9 až tab. 11.

**tab. 9** Výsledky zkoušek tahem pro hladinu 70/63

		Grivory	Grilamid	Grilon
$E_t$ [MPa]	Průměr	13050,00	3196,25	537,63
	Směrodatná odchylka	223,61	70,35	26,24
$\varepsilon_m$ [%]	Průměr	3,55	12,75	195,75
	Směrodatná odchylka	0,12	0,66	65,52
$\sigma_m$ [MPa]	Průměr	161,13	74,00	38,50
	Směrodatná odchylka	0,93	0,29	3,94

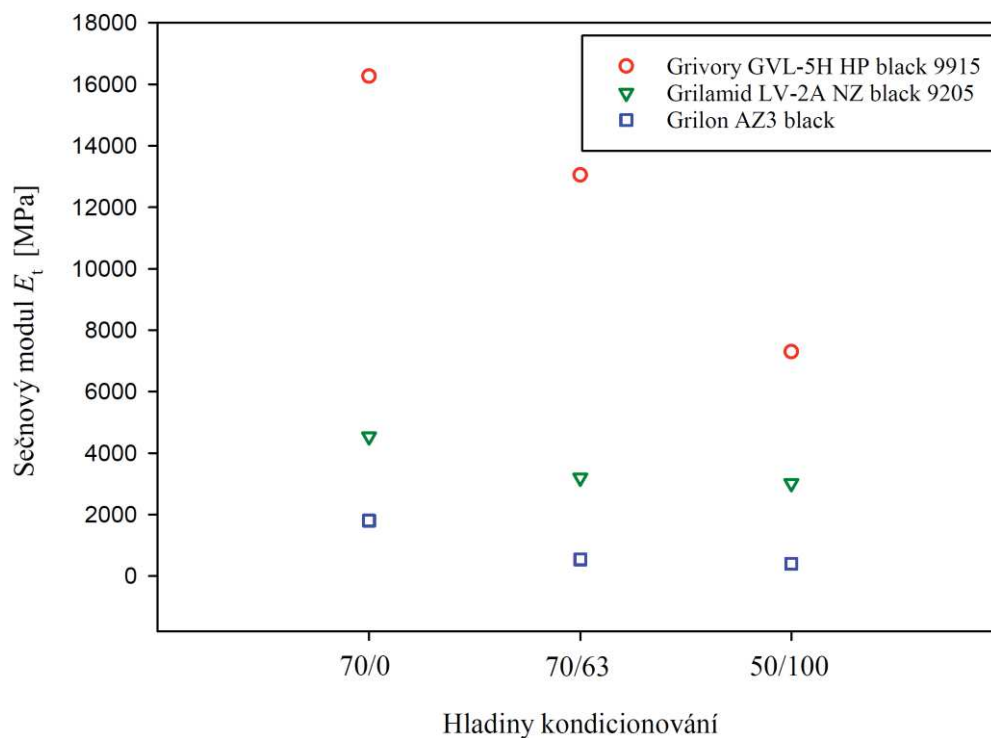
**tab. 10** Výsledky tahových zkoušek pro hladinu 50/100

		Grivory	Grilamid	Grilon
$E_t$ [MPa]	Průměr	7398,75	3013,75	398,13
	Směrodatná odchylka	119,90	30,39	15,23
$\varepsilon_m$ [%]	Průměr	5,46	13,38	242,50
	Směrodatná odchylka	0,11	0,48	22,22
$\sigma_m$ [MPa]	Průměr	102,00	68,65	35,30
	Směrodatná odchylka	0,71	0,21	1,44

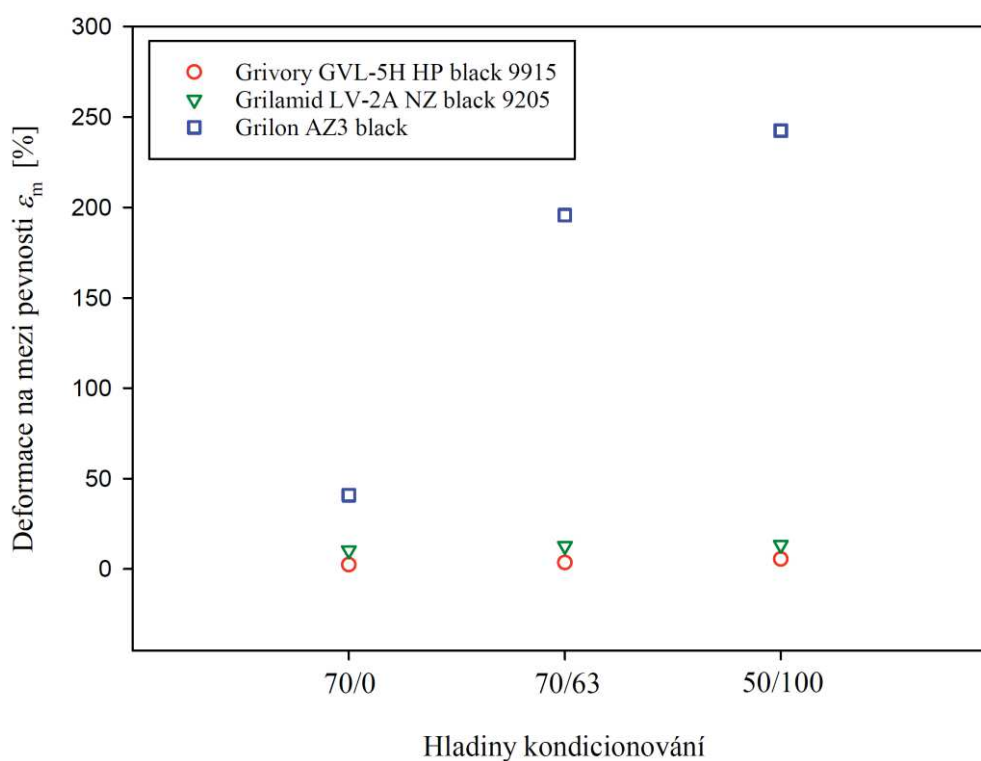
**tab. 11** Výsledky tahových zkoušek pro hladinu 70/0

		Grivory	Grilamid	Grilon
$E_t$ [MPa]	Průměr	16262,50	4536,25	1800,00
	Směrodatná odchylka	421,12	102,70	90,74
$\varepsilon_m$ [%]	Průměr	2,40	10,38	40,85
	Směrodatná odchylka	0,11	0,38	5,35
$\sigma_m$ [MPa]	Průměr	217,00	84,48	43,63
	Směrodatná odchylka	1,94	0,74	0,93

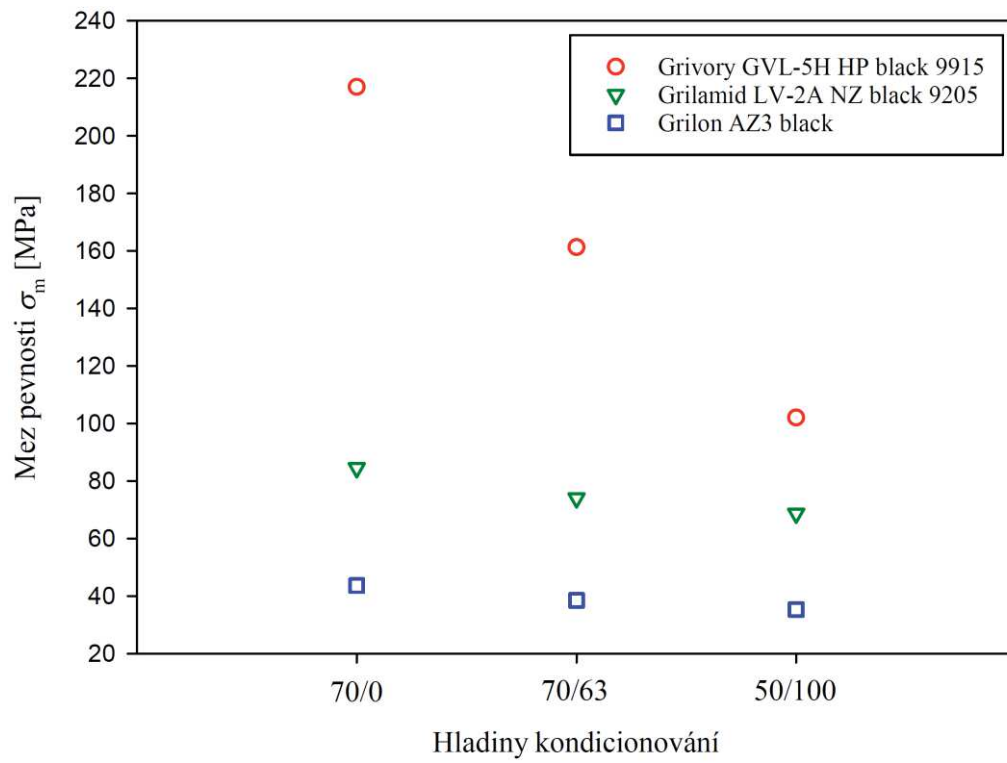
V grafech na obr. 19 až obr. 21 jsou pro jednotlivé testované polymerní materiály uvedeny výše zmíněné základní mechanické charakteristiky v závislosti na úrovni kondicionování, tj. na míře obsahu vody ve struktuře.



obr. 19 Závislost modulu pružnosti  $E_t$  na obsahu vody ve struktuře polymeru (hladině kondicionování)



obr. 20 Závislost deformace  $\epsilon_m$  na obsahu vody ve struktuře polymeru (hladině kondicionování)

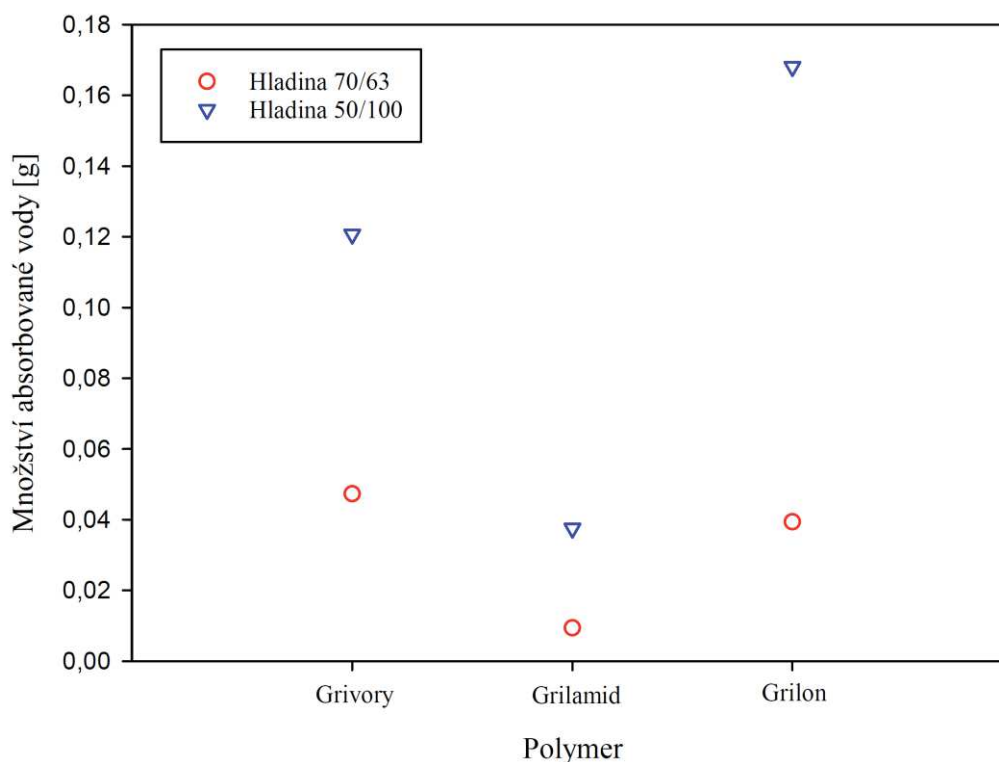


obr. 21 Závislost meze pevnosti  $\sigma_m$  na obsahu vody ve struktuře polymeru (hladině kondicionování)

## 4 DISKUZE

Na základě experimentů byly vyhodnocovány a porovnávány materiálové charakteristiky tří typů polymerních materiálů v závislosti na obsahu vody v jejich struktuře. Obsah vody ve struktuře byl dán úrovní (hladinou) kondicionování, tj. vystavení polymeru prostředí o dané teplotě a relativní vlhkosti. Hodnocena byla také schopnost jednotlivých typů polymerů absorbovat vodu.

Z hlediska celkové absorpce vody byl jako nejméně nasákavý vyhodnocen polymer Grilamid LV-2A NZ black 9205, který na obou hladinách absorboval jednoznačně nejmenší množství vody (obr. 22).

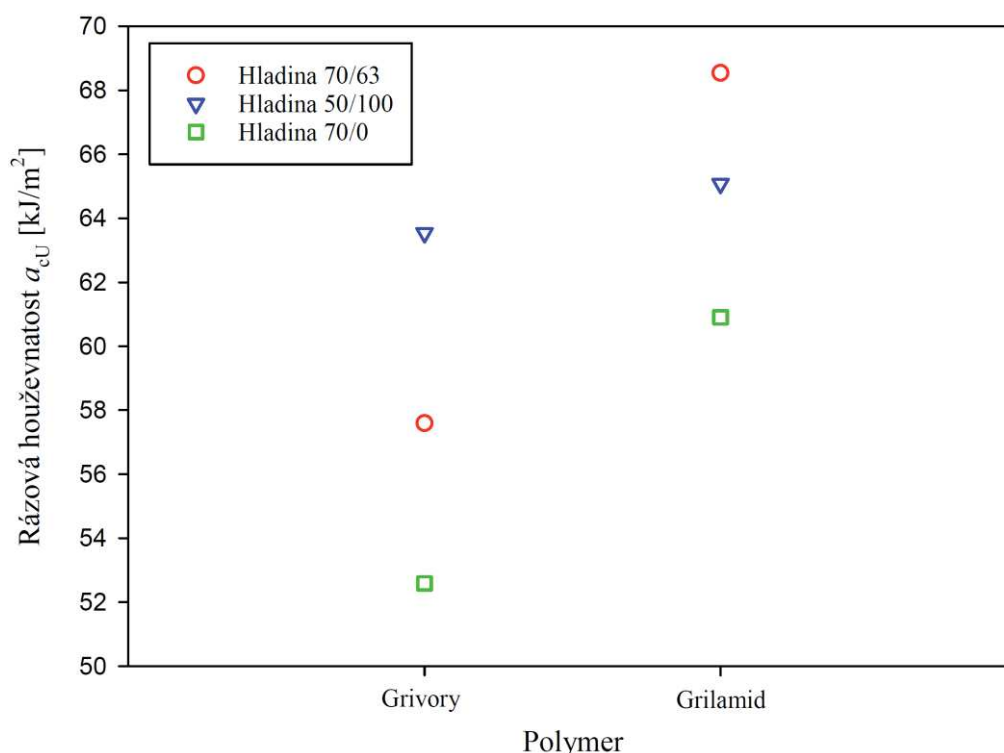


obr. 22 Vzájemné porovnání polymerů z hlediska schopnosti absorbovat vodu

Z obr. 22 je patrné, že Grilamid absorboval v porovnání s ostatními polymery několikanásobně menší množství vody, což může být způsobeno nízkou polaritou polyamidu 12 (PA-12), který tvoří jeho základ, a také vlivem 20% objemovému podílu skelných vláken, která stejně jako další anorganická plniva (mletý křemen apod.) snižují navlhavost polymerů. Naproti tomu u polymeru Grivory GVL-5H HP black 9915, který obsahuje 50% objemový podíl skelných vláken, byla zaznamenána na hladině 70/63 největší absorpce vody. Nejpravděpodobnější příčinou této navlhavosti, i přes vysoký obsah skelných vláken, může být alifatický segment tohoto kopolymerního materiálu, polyamid 66 (PA-66), který je sice v porovnání např. s polyamidem 6 (PA-6) méně navlhavý, i tak se ale tyto dva polyamidy řadí mezi silně navlhavé polymery. Dalším

důvodem může být semi-aromatická povaha materiálu, jelikož se v materiálu kromě alifatické složky, polyamidu 66, vyskytují i jiné aromatické segmenty obsahující benzenové jádro. Navlhavost polyamidu 66 potvrzuje i materiál Grilon AZ3 black, u kterého byla na hladině 70/63 zaznamenána mírně nižší absorpce vody. Na hladině 50/100 však tento materiál prokázal ze všech kondicionovaných materiálů největší absorpční schopnost. To je zdůvodněno absencí anorganických plniv a povahou polyamidu 66 tvořící hlavní složku materiálu. Snížit schopnost materiálu vázat vodu je teoreticky možné přidáním anorganických plniv (např. skelných vláken), což by mělo pozitivní vliv i na pevnost materiálu, ovšem za cenu snížení houževnatosti, což je u tohoto materiálu, z pohledu jeho typických využití, obvykle nežádoucí.

Z hlediska houževnatosti dle očekávání jednoznačně dominoval materiál Grilon (obr. 23), modifikovaný pro zvýšení odolnosti vůči velkým rázům.



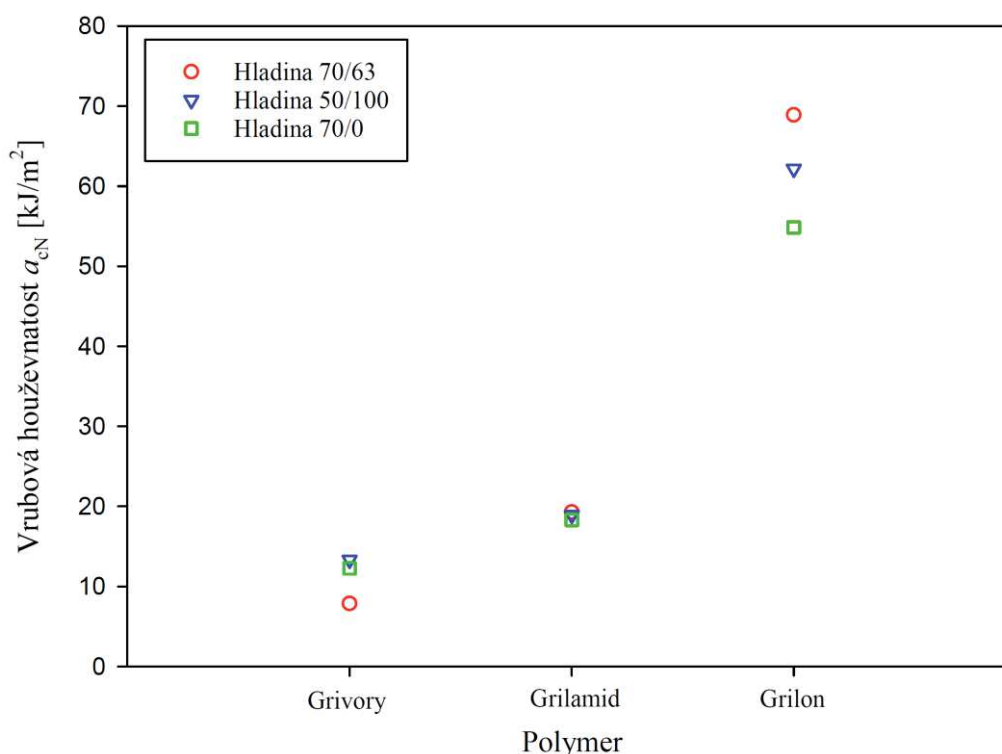
obr. 23 Úroveň rázové houževnatosti polymerů v závislosti na obsahu vody ve struktuře (hladině kondicionování)

Tento polymer je natolik houževnatý (plastický), že u něj nebylo možné úspěšně provést zkoušku rázové houževnatosti na tělesech bez vrubu (při zkouškách nebylo možné dosáhnout porušení zkušebních těles). Důvodem tak vysoké houževnatosti je modifikace základního materiálu, ke které se v případě polyamidu 66 využívá buď chemicky modifikovaný elastomer (ethylen), nebo anhydridem modifikovaný kopolymer ethylenu. Výsledky experimentů jsou z tohoto pohledu v souladu s literárními údaji. [21]

V pořadí druhým nejhouževnatějším materiálem, u kterého byly naměřeny více jak trojnásobně nižší hodnoty vrubové houževnatosti (rázové houževnatosti na

vrubovaných tělesech) v porovnání s materiálem Grilon byl materiál Grilamid. Na nižší houževnatost, kromě absence modifikátoru pro zvýšení odolnosti proti rázům, má negativní vliv také obsah skelných vláken. To potvrzuje i materiál Grivory obsahující 50% objemový podíl skelných vláken, který při zkoušení vykazoval nejnižší houževnatost ze všech testovaných polymerů. Tento polymer však jako jediný vykazoval při vyhodnocení rázové i vrubové houževnatosti stálý růst houževnatosti s rostoucím obsahem absorbované vody (obr. 24). U ostatních materiálů došlo při přechodu z vysušeného stavu na hladinu 70/63 k nárůstu houževnatosti, ovšem na hladině 50/100 došlo k jejímu mírnému poklesu. Materiály však byly na hladině 50/100 stále houževnatější než v případě vysušeného stavu.

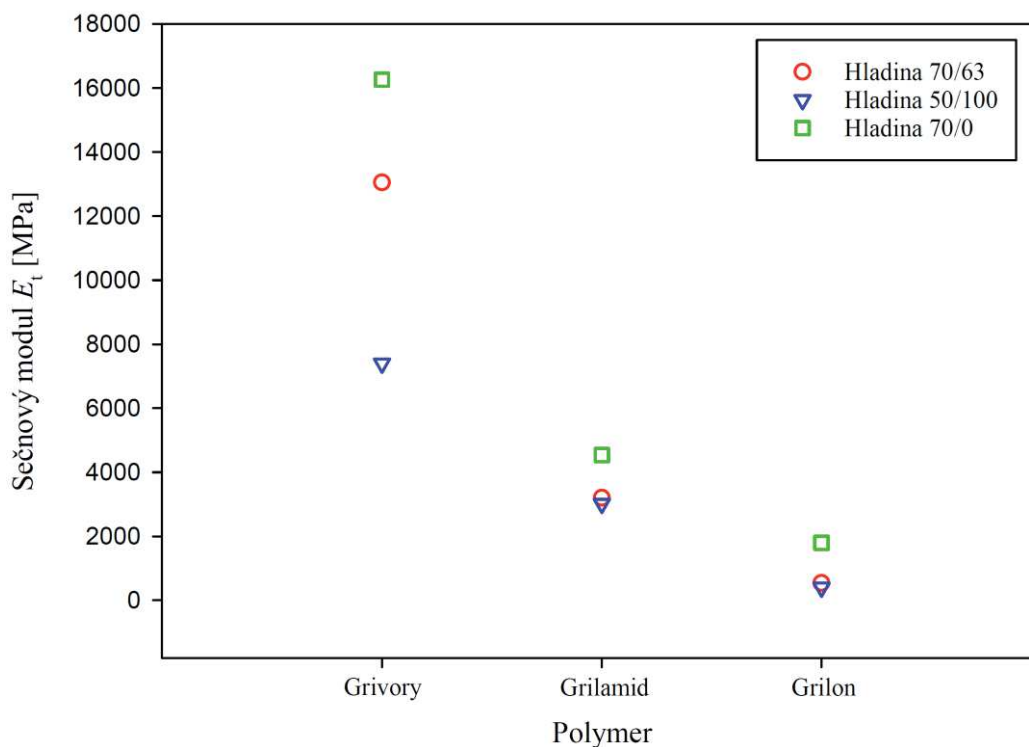
Z obr. 23 a obr. 24 je zřejmé, že z hlediska změny houževnatosti v závislosti na obsahu absorbované vody vykazuje nejnižší citlivost materiál Grilamid. Tento jev může být způsoben nízkým obsahem absorbované vody v materiálu.



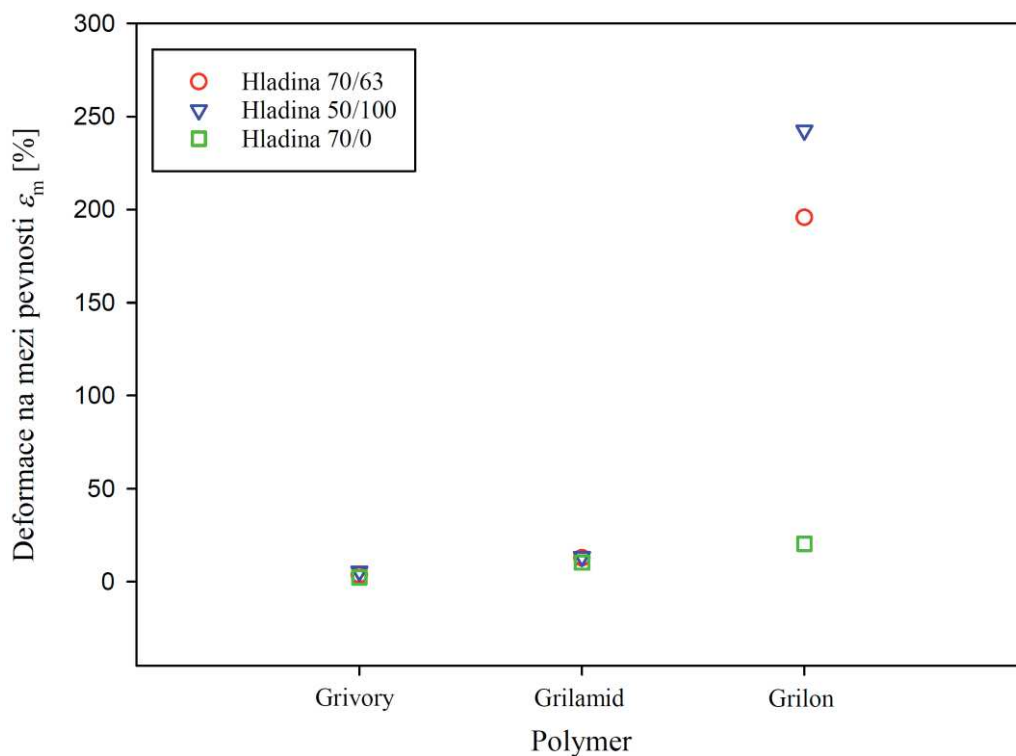
obr. 24 Úroveň vrubové houževnatosti polymerů v závislosti na obsahu vody ve struktuře (hladině kondicionování)

Jako nejpevnější a nejtužší materiál byl na základě tahových zkoušek vyhodnocen materiál Grivory, jehož hodnoty materiálových charakteristik určené v suchém stavu jsou srovnatelné s dohledatelnými materiálovými listy [23]. Výjimku tvoří mez pevnosti  $\sigma_m$ , jejíž experimentálně určená hodnota vyšla v porovnání s materiálovými listy nižší. Vysoká pevnost a tuhost je zapříčiněna mimo jiné vysokým obsahem skelných vláken, který na úkor houževnatosti zvyšuje pevnostní charakteristiky materiálu. Tento materiál

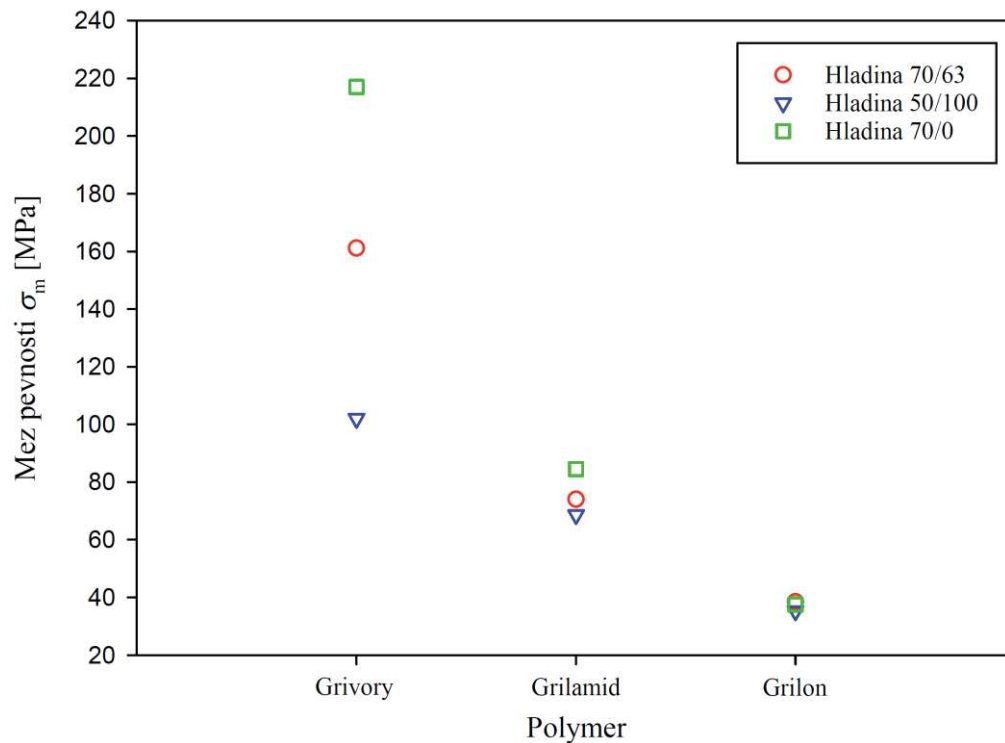
však vykazuje vysokou citlivost modulu pružnosti  $E_t$  a meze pevnosti  $\sigma_m$  na obsah vody ve struktuře (obr. 25 až 27). S rostoucím obsahem vody poměrně výrazně klesá hodnota obou uvedených charakteristik. Podobnou závislost (citlivost) bylo možné sledovat z hlediska deformačního chování u polymeru Grilon, kde s rostoucím obsahem absorbované vody došlo k výraznému nárůstu deformace  $\varepsilon_m$  (viz obr. 26) Tento polymer byl však zároveň ze všech studovaných polymerů vyhodnocen jako nejméně pevný. Pevnostní charakteristiky se v případě ostatních materiálů chovaly dle očekávání. S rostoucím obsahem absorbované vody v jednotlivých polymerech docházelo k mírnému poklesu modulů  $E_t$  a mezí pevností  $\sigma_m$ . Z hlediska materiálových charakteristik zjištěných zkouškou tahem ( $E_t, \sigma_m, \varepsilon_m$ ) vykazuje nejvyšší citlivost na úroveň obsahu vody ve struktuře opět materiál Grilamid.



obr. 25 Závislost modulů pružnosti  $E_t$  na obsahu vody ve struktuře polymeru (hladině kondicionování)



obr. 26 Závislost deformace  $\varepsilon_m$  na obsahu vody ve struktuře polymeru (hladině kondicionování)



obr. 27 Závislost meze pevnosti  $\sigma_m$  na obsahu vody ve struktuře polymeru (hladině kondicionování)

## 5 ZÁVĚR

Cílem předložené práce bylo stanovit statické a dynamické materiálové charakteristiky tří typů polymerních materiálů vyráběných technologií vstřikováním a určit závislost těchto charakteristik na obsahu vody absorbované ve struktuře jednotlivých polymerů. Výsledkem práce je vzájemná komparace polymerů Grilon AZ3 black, Grilamid LV-2A NZ black 9205 a Grivory GVL-5H HP black 9915, lišících se vzájemně strukturou (typem) matrice a objemového podílu plniva (skelných vláken), v závislosti na úrovni obsahu vody v jejich struktuře.

Pro stanovení materiálových charakteristik byly provedeny zkoušky rázové houževnatosti  $a_{cU}$  a vrubové houževnatosti  $a_{cN}$  metodou Charpy a zkoušky tahem pro všechny tři materiály kondicionované na tři zvolené hladiny, tj. s různým podílem vody ve struktuře.

Na základě výsledků zkoušek byl jako nejhouževnatější materiál vyhodnocen materiál Grilon AZ3 black, který se vyznačoval rovněž vysokou mírou deformace na mezi pevnosti  $\varepsilon_m$ , která se však projevila jako velmi citlivá na obsah vody vázané v materiálu. Jako nejpevnější byl vyhodnocen materiál Grivory GVL-5H HP black 9915, který je ovšem také velmi citlivý na obsah vody vázané ve struktuře polymeru. Hodnoty meze pevnosti  $\sigma_m$  i modul pružnosti  $E_t$  výrazně klesají s rostoucím množstvím v polymeru obsažené vody.

Jako nejlépe odolný proti absorpci vody a změně mechanických vlastností vlivem absorbované vody byl vyhodnocen materiál Grilamid LV-2A NZ black 9205. Na všech hladinách bylo u tohoto materiálu zaznamenáno nejnižší množství absorbované vody a na rozdíl od zbývajících dvou polymerů u něj nebyla u žádné z měřených materiálových charakteristik zjištěna výrazná závislost na obsahu vody ve struktuře.

## LITERATURA

- [1] LENFELD, Petr. *Technologie II. – Vstřikování plastů* [online]. Technická univerzita Liberec. Dostupné z WWW: [http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta\\_tkp/obsah.htm](http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/obsah.htm)
- [2] PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu II. 2.*, opr. a rozš. vyd. Brno: CERM, 2002, 392 s.; 25 cm. ISBN 80-7204-248-3.
- [3] MOLLIKOVÁ, Eva. *Konstrukční plasty*. 1. Brno: vytvořena s podporou projektu FRVŠ č. 1517/2004, 2004.
- [4] DUCHÁČEK, Vratislav. *Polymery: výroba, vlastnosti, zpracování, použití*. Vyd. 2., přeprac. Praha: Vydavatelství VŠCHT, 2006. ISBN 80-7080-617-6.
- [5] PROKOPOVÁ, Irena. *Makromolekulární chemie* [online]. 1. VŠCHT Praha: Praha, 2007 [cit. 2018-04-09]. ISBN 978-80-7080-662-3. Dostupné z: [http://147.33.74.135/knihy/uid\\_isbn-978-80-7080-662-3/pages-img/obalka-1.html](http://147.33.74.135/knihy/uid_isbn-978-80-7080-662-3/pages-img/obalka-1.html)
- [6] CALLISTER, William D. a David G. RETHWISCH. *Materials science and engineering: an introduction*. 9th edition. Hoboken, NJ: Wiley, 2014. ISBN 978-1-118-32457-8.
- [7] BĚHÁLEK, Luboš. *Polymery* [online]. Střední odborné učiliště Svitavy: © Code Creator, 2016 [cit. 2018-04-09]. ISBN 978-80-88058-68-7. Dostupné z: <https://publi.cz/books/180/Cover.html>
- [8] *Docplayer* [online]. [cit. 2018-04-09]. Dostupné z: <http://docplayer.cz/8201622-Navlhavost-polymeru-dusledky.html>
- [9] *Anzdoc* [online]. [cit. 2018-04-09]. Dostupné z: <https://anzdoc.com/navlhavost-a-sueni-plast.html>
- [10] *Vyšší odborná škola zdravotnická a Střední zdravotnická škola Hradec Králové* [online]. [cit. 2018-04-09]. Dostupné z: <http://lat.zshk.cz/vyuka/suseni.aspx>
- [11] LENFELD, Petr. *Technologie vstřikování* [online]. Střední odborné učiliště Svitavy © Code Creator, 2016 [cit. 2018-04-09]. ISBN 978-80-88058-74-8. Dostupné z: <https://publi.cz/books/184/Cover.html>
- [12] BAREŠ, Richard. *Kompozitní materiály*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1988.
- [13] MLEZIVA, Josef. *Polymery - výroba, struktura, vlastnosti a použití*. 2. přepr. vyd. Praha: Sobotáles, 2000. ISBN 80-85920-72-7.
- [14] PLUHAŘ, J. a kol. *Nauka o materiálech*. Praha: SNTL - nakladatelství technické literatury, 1989.
- [15] ČSN EN ISO 1110: *Plasty - Polyamidy - Zrychlené kondicionování zkušebních těles*. 1. Praha: Český normalizační institut, 1997.
- [16] ČSN EN ISO 291: *Plasty - Standardní prostředí pro kondicionování a zkoušení*. 1. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, 2009.

- [17] *ČSN EN ISO 179-1: Plasty - Stanovení rázové houževnatosti metodou Charpy*. 1. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, 2010.
- [18] *ČSN ISO 2602: Statistická interpretace výsledků zkoušek*. 1. Praha: Český normalizační institut, 1993.
- [19] *ČSN ISO 257-1: Plasty - stanovení tahových vlastností*. 1. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, 2012.
- [20] *ČSN EN ISO 527-2: Plasty - Stanovení tahových vlastností*. 1. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, 2012.
- [21] *Technical data sheet: Grilon AZ3* [online]. 2002, 5 [cit. 2018-05-25]. Dostupné z: [http://kphuaxun.com/cn/grilon/AZ\\_3\\_E.pdf](http://kphuaxun.com/cn/grilon/AZ_3_E.pdf)
- [22] *Technical data sheet: Grilamid LV-2A NZ* [online]. 2002, 4 [cit. 2018-05-25]. Dostupné z: [http://kphuaxun.com/cn/Grilamid/LV-2A\\_NZ\\_E.pdf](http://kphuaxun.com/cn/Grilamid/LV-2A_NZ_E.pdf)
- [23] *Material data center: Grivory GV XE 16101 (GVL-5H HP) - PA\*-GF50* [online]. [cit. 2018-05-25]. Dostupné z: [https://www.materialdatacenter.com/ms/en/tradenames/Grivory/EMS-GRIVORY+%7C+a+unit+of+EMS-CHEMIE+AG/Grivory+GV+XE+16101+\(GVL-5H+HP\)/32f78994/929](https://www.materialdatacenter.com/ms/en/tradenames/Grivory/EMS-GRIVORY+%7C+a+unit+of+EMS-CHEMIE+AG/Grivory+GV+XE+16101+(GVL-5H+HP)/32f78994/929)

## SEZNAM SYMBOLŮ

$\rho_n$	[kg·m <sup>-3</sup> ]	hustota vzorku o neznámé krystalinitě
$\rho_a$	[kg·m <sup>-3</sup> ]	hustota ideální amorfni fáze získaná např. extrapolací z teplotní závislosti hustoty taveniny na laboratorní teplotu
$\rho_c$	[kg·m <sup>-3</sup> ]	hustota ideálního krystalu, vypočtená z mřížkových parametrů elementární buňky, ve které polymer krystalizuje
$\sigma_1$	[MPa]	napětí odpovídající 0,05% deformaci
$\sigma_2$	[MPa]	napětí odpovídající 0,25% deformaci
$\sigma_b$	[MPa]	napětí při přetržení
$\sigma_m$	[MPa]	mez pevnosti
$\varepsilon_1$	[%]	0,05% deformace
$\varepsilon_2$	[%]	0,25% deformace
$\varepsilon_b$	[%]	deformace při přetržení
$\varepsilon_m$	[%]	deformace na mezi pevnosti
$\Delta L$	[mm]	změna délky zkušební tělesa
$a_{cU}$	[kJ/m <sup>2</sup> ]	rázová houževnatost
$a_{cN}$	[kJ/m <sup>2</sup> ]	vrubová houževnatost (rázová houževnatost těles s vruby)
$A_0$	[mm <sup>2</sup> ]	obsah plochy průřezu zkušební tělesa
$b$	[mm]	šířka zkušební tělesa
$b_N$	[mm]	šířka zkušební tělesa pod vrubem
$E_c$	[J]	korigovaná energie spotřebovaná při přeražení zkušební tělesa
$E_d$	[J]	energie změřená kladivem Charpy
$E_z$	[J]	ztrátová energie kladiva Charpy
$E$	[GPa]	modul pružnosti v tahu
$E_t$	[MPa]	sečnový modul pružnosti v tahu
$F_m$	[N]	síla na mezi pevnosti
$h$	[mm]	výška zkušební tělesa
$L_0$	[mm]	počáteční délka zkušební tělesa
$r_N$	[mm]	poloměr kořene vrubu
$S_v$	[mm <sup>2</sup> ]	obsah plochy průřezu zkušební tělesa s vrubem
$S_z$	[mm <sup>2</sup> ]	obsah plochy průřezu zkušební tělesa
$T_g$	[°C]	teplota skelného přechodu
$T_m$	[°C]	teplota tání
$X_c$	[-]	hmotnostní podíl krystalické fáze
$Al_2O_3$		oxid hlinitý
$B_2O_3$		oxid boritý
$CaO$		oxid vápenatý
GF-20		20% objemový podíl skelných vláken
GF-50		50% objemový podíl skelných vláken

MgO	oxid hořečnatý
PA	polyamidy
PB	polybutadien
PA-6	polyamid 6
PA-11	polyamid 11
PA-12	polyamid 12
PA-66	polyamid 66
PAN	polyakrylonitril
PC	polykarbonát
PE	polyethylen
POM	polyoxymethylen
PP	polypropylen
PPA	polyftalamid
PS	polystyren
PTFE	polytetrafluorethylenu
SAP	disperzně zpevněný hliník
SI	silikon (polydimetylsiloxan)
SiC	karbid křemíku
SiO <sub>2</sub>	oxid křemičitý
ThO <sub>2</sub>	oxid thoričitý
TiO <sub>2</sub>	oxid titaničitý
Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	oxid ittritý
Zr <sub>2</sub> O	oxid zirkonia

## SEZNAM OBRÁZKŮ

- obr. 1 Submolekulární struktura polymerů PB – polybutadien, PAN–polyakrylonitril, SI – silikon (polydimetylsiloxan)
- obr. 2 Struktura (stavba) řetězce
- obr. 3 Molekulární struktura polymerů
- obr. 4 Organizace zapojení merů u kopolymerů
- obr. 5 Tahová křivka polymeru PA-66
- obr. 6 Injekční vstřikování
- obr. 7 Příklady rovinného uspořádání vláken: a) jednosměrné uspořádání kontinuálních vláken, b) dvouosá orientace, tkanina z kontinuálních vláken, c) rohož, nahodilá orientace kontinuálních nebo krátkých vláken (netkaná textilie), d) víceosá výztuž z kontinuálních vláken, e) krátká vlákna jednosměrně orientovaná, f) krátká vlákna s nahodilou orientací
- obr. 8 Mechanismus interakce trhliny v matrici a vlákna
- obr. 9 Relativní průřezová plocha a tvar některých vláken
- obr. 10 Schematický obrázek uspořádání aromatických rovin v uhlíkovém vláknu vyrobeném z polyakrylonitrilu PAN (vlevo) a z mezofázových smol (vpravo, pouze příčné řezy),
- obr. 11 Kontrola geometrie vrubu pomocí stereomikroskopu
- obr. 13 Porovnání nárůstu hmotnosti polymerů vlivem absorpce vody na hladině 50/100
- obr. 14 Zkušební těleso materiálu Grilon po provedení zkoušky rázové houževnatosti
- obr. 15 Závislost rázové houževnatosti  $a_{cU}$  na obsahu ve vody ve struktuře polymeru
- obr. 16 Závislost vrubové houževnatosti  $a_{cN}$  na obsahu vody ve struktuře polymeru
- obr. 17 Tvar zkušebních těles pro zkoušku tahem, upraveno podle
- obr. 18 Typické deformační křivky polymerů v tahu
- obr. 19 Závislost modulu pružnosti  $E_t$  na obsahu vody ve struktuře polymeru
- obr. 20 Závislost deformace  $\varepsilon_m$  na obsahu vody ve struktuře polymeru
- obr. 21 Závislost meze pevnosti  $\sigma_m$  na obsahu vody ve struktuře polymeru
- obr. 22 Vzájemné porovnání polymerů z hlediska schopnosti absorbovat vodu
- obr. 23 Úroveň rázové houževnatosti polymerů v závislosti na obsahu vody ve struktuře
- obr. 24 Úroveň vrubové houževnatosti polymerů v závislosti na obsahu vody ve struktuře
- obr. 25 Závislost modulů pružnosti  $E_t$  na obsahu vody ve struktuře polymeru
- obr. 26 Závislost deformace  $\varepsilon_m$  na obsahu vody ve struktuře polymeru
- obr. 27 Závislost meze pevnosti  $\sigma_m$  na obsahu vody ve struktuře polymeru

## SEZNAM TABULEK

- tab. 1** Způsob značení zkušebních těles
- tab. 2** Změny hmotnosti v důsledku absorpce vody polymery
- tab. 3** Výsledky zkoušky rázové houževnatosti, zkušební tělesa bez vrubu
- tab. 4** Výsledky zkoušky rázové houževnatosti, zkušební tělesa s vrubem
- tab. 5** Výsledky zkoušky rázové houževnatosti, zkušební tělesa bez vrubu
- tab. 6** Výsledky zkoušky rázové houževnatosti, zkušební tělesa s vrubem
- tab. 7** Výsledky zkoušky rázové houževnatosti, zkušební tělesa bez vrubu
- tab. 8** Výsledky zkoušky rázové houževnatosti, zkušební tělesa s vrubem
- tab. 9** Výsledky zkoušek tahem pro hladinu 70/63
- tab. 10** Výsledky tahových zkoušek pro hladinu 50/100
- tab. 11** Výsledky tahových zkoušek pro hladinu 70/0

# SEZNAM PŘÍLOH

Příloha č. 1: Měření kinetiky navlhavosti

- a) Hladina 70/63
- b) Hladina 50/100

Příloha č. 2: Výsledky zkoušek rázové houževnatosti

- a) Hladina 70/0
- b) Hladina 70/63
- c) Hladina 50/100

Příloha č. 3: Výsledky zkoušek vrubové houževnatosti

- a) Hladina 70/0
- b) Hladina 70/63
- c) Hladina 50/100

Příloha č. 4: Tahové diagramy

- a) Materiál Grivory GVL-5H HP black 9915
- b) Materiál Grilamid LV-2A NZ black 9205
- c) Materiál Grilon AZ3 black

## Příloha č. 1: Měření kinetiky navlhavosti

### a) Hladina 70/63

1. Měření				2. Měření			
číslo vzorku	Grivory hmotnost [g]	Grilamid hmotnost [g]	Grilon hmotnost [g]	číslo vzorku	Grivory hmotnost [g]	Grilamid hmotnost [g]	Grilon hmotnost [g]
1.	5,1913	3,6388	3,2807	1.	5,2001	3,6442	3,2971
2.	5,1911	3,6495	3,2682	2.	5,2001	3,6551	3,2841
3.	5,2383	3,6334	3,4424	3.	5,2472	3,6389	3,4589
4.	5,2229	3,6358	3,4435	4.	5,2319	3,6416	3,4597
5.	5,2508	3,6408	3,4571	5.	5,2602	3,6462	3,4737
6.	5,2150	3,6363	3,4336	6.	5,2240	3,6419	3,4504
7.	5,2210	3,6303	3,4355	7.	5,2303	3,6359	3,4522
8.	5,2291	3,6394	3,4386	8.	5,2384	3,6448	3,4551
9.	5,2208	3,6365	3,4445	9.	5,2296	3,6421	3,4610
10.	5,2496	3,7023	3,2705	10.	5,2591	3,7089	3,2864

3. Měření				4. Měření			
číslo vzorku	Grivory hmotnost [g]	Grilamid hmotnost [g]	Grilon hmotnost [g]	číslo vzorku	Grivory hmotnost [g]	Grilamid hmotnost [g]	Grilon hmotnost [g]
1.	5,2053	3,6461	3,3045	1.	5,2093	3,6471	3,3091
2.	5,2049	3,6570	3,2916	2.	5,2088	3,6579	3,2962
3.	5,2522	3,6408	3,4668	3.	5,2561	3,6417	3,4717
4.	5,2369	3,6435	3,4676	4.	5,2406	3,6444	3,4724
5.	5,2649	3,6481	3,4815	5.	5,2688	3,6490	3,4864
6.	5,2290	3,6438	3,4583	6.	5,2327	3,6448	3,4632
7.	5,2352	3,6377	3,4601	7.	5,2390	3,6388	3,4651
8.	5,2434	3,6468	3,4631	8.	5,2472	3,6477	3,4681
9.	5,2345	3,6440	3,4690	9.	5,2384	3,6450	3,4740
10.	5,2639	3,7112	3,2941	10.	5,2678	3,7124	3,2991

5. Měření				6. Měření			
číslo vzorku	Grivory hmotnost [g]	Grilamid hmotnost [g]	Grilon hmotnost [g]	číslo vzorku	Grivory hmotnost [g]	Grilamid hmotnost [g]	Grilon hmotnost [g]
1.	5,2205	3,6484	3,3177	1.	5,2222	3,6479	3,3187
2.	5,2200	3,6591	3,3055	2.	5,2214	3,6587	3,3065
3.	5,2673	3,6430	3,4824	3.	5,2690	3,6425	3,4833
4.	5,2521	3,6456	3,4833	4.	5,2536	3,6453	3,4842
5.	5,2800	3,6502	3,4976	5.	5,2814	3,6499	3,4982
6.	5,2440	3,6458	3,4740	6.	5,2452	3,6457	3,4745
7.	5,2503	3,6400	3,4759	7.	5,2518	3,6395	3,4764
8.	5,2585	3,6488	3,4792	8.	5,2598	3,6485	3,4795
9.	5,2485	3,6460	3,4849	9.	5,2505	3,6457	3,4853
10.	5,2789	3,7135	3,3086	10.	5,2804	3,7132	3,3088

7. Měření				8. Měření			
	Grivory	Grilamid	Grilon		Grivory	Grilamid	Grilon
číslo vzorku	hmotnost [g]	hmotnost [g]	hmotnost [g]	číslo vzorku	hmotnost [g]	hmotnost [g]	hmotnost [g]
1.	5,2241	-	3,3178	1.	5,2262	-	-
2.	5,2230	-	3,3055	2.	5,2254	-	-
3.	5,2706	-	3,4826	3.	5,2732	-	-
4.	5,2553	-	3,4832	4.	5,2578	-	-
5.	5,2835	-	3,4974	5.	5,2859	-	-
6.	5,2469	-	3,4739	6.	5,2495	-	-
7.	5,2536	-	3,4757	7.	5,2559	-	-
8.	5,2618	-	3,4788	8.	5,2641	-	-
9.	5,2527	-	3,4849	9.	5,2552	-	-
10.	5,2827	-	3,3083	10.	5,2850	-	-

9. Měření				10. Měření			
	Grivory	Grilamid	Grilon		Grivory	Grilamid	Grilon
číslo vzorku	hmotnost [g]	hmotnost [g]	hmotnost [g]	číslo vzorku	hmotnost [g]	hmotnost [g]	hmotnost [g]
1.	5,2316	-	-	1.	5,2320	-	-
2.	5,2308	-	-	2.	5,2313	-	-
3.	5,2787	-	-	3.	5,2797	-	-
4.	5,2635	-	-	4.	5,2643	-	-
5.	5,2919	-	-	5.	5,2926	-	-
6.	5,2552	-	-	6.	5,2560	-	-
7.	5,2617	-	-	7.	5,2626	-	-
8.	5,2701	-	-	8.	5,2710	-	-
9.	5,2610	-	-	9.	5,2620	-	-
10.	5,2907	-	-	10.	5,2916	-	-

11. Měření				12. Měření			
	Grivory	Grilamid	Grilon		Grivory	Grilamid	Grilon
číslo vzorku	hmotnost [g]	hmotnost [g]	hmotnost [g]	číslo vzorku	hmotnost [g]	hmotnost [g]	hmotnost [g]
1.	5,2347	-	-	1.	5,2374	-	-
2.	5,2336	-	-	2.	5,2362	-	-
3.	5,2820	-	-	3.	5,2850	-	-
4.	5,2666	-	-	4.	5,2693	-	-
5.	5,2947	-	-	5.	5,2972	-	-
6.	5,2579	-	-	6.	5,2608	-	-
7.	5,2646	-	-	7.	5,2678	-	-
8.	5,2732	-	-	8.	5,2759	-	-
9.	5,2638	-	-	9.	5,2665	-	-
10.	5,2936	-	-	10.	5,2965	-	-

13. Měření	Grivory	Grilamid	Grilon
číslo vzorku	hmotnost [g]	hmotnost [g]	hmotnost [g]
1.	5,2380	-	-
2.	5,2371	-	-
3.	5,2858	-	-
4.	5,2702	-	-
5.	5,2983	-	-
6.	5,2618	-	-
7.	5,2685	-	-
8.	5,2774	-	-
9.	5,2680	-	-
10.	5,2976	-	-

**b) Hladina 50/100**

1. Měření				2. Měření			
číslo vzorku	Grivory hmotnost [g]	Grilamid hmotnost [g]	Grilon hmotnost [g]	číslo vzorku	Grivory hmotnost [g]	Grilamid hmotnost [g]	Grilon hmotnost [g]
1.	5,1999	3,6395	3,4229	1.	5,2262	3,6406	3,4824
2.	5,1942	3,6276	3,4226	2.	5,2201	3,6533	3,4822
3.	5,1879	3,6086	3,4225	3.	5,1763	3,6221	3,4829
4.	5,1820	3,6305	3,4271	4.	5,2615	3,6470	3,3282
5.	5,2153	3,7395	3,4236	5.	5,2023	3,7617	3,3402
6.	5,2270	3,6319	3,4239	6.	5,2405	3,6448	3,4864
7.	5,1379	3,6336	3,2710	7.	5,2344	3,6439	3,5012
8.	5,2215	3,6315	3,2827	8.	5,2678	3,6455	3,5030
9.	5,1625	3,6225	3,4429	9.	5,2558	3,6379	3,4822
10.	5,2260	3,6249	3,4408	10.	5,2667	3,6356	3,4824

3. Měření				4. Měření			
číslo vzorku	Grivory hmotnost [g]	Grilamid hmotnost [g]	Grilon hmotnost [g]	číslo vzorku	Grivory hmotnost [g]	Grilamid hmotnost [g]	Grilon hmotnost [g]
1.	5,1866	3,6417	3,5006	1.	5,2884	3,7730	3,5163
2.	5,2363	3,6493	3,5012	2.	5,1936	3,6287	3,5358
3.	5,2451	3,6254	3,5005	3.	5,2622	3,6540	3,5214
4.	5,2672	3,6503	3,4999	4.	5,2772	3,6517	3,3611
5.	5,2774	3,7672	3,5050	5.	5,2551	3,6525	3,5165
6.	5,2783	3,6440	3,3576	6.	5,2886	3,6450	3,5174
7.	5,2303	3,6481	3,5195	7.	5,2406	3,6472	3,3738
8.	5,2126	3,6472	3,3461	8.	5,2827	3,6422	3,5379
9.	5,2717	3,6393	3,5216	9.	5,2222	3,6601	3,5161
10.	5,2515	3,6565	3,5005	10.	5,2458	3,6506	3,5158

5. Měření				6. Měření			
číslo vzorku	Grivory hmotnost [g]	Grilamid hmotnost [g]	Grilon hmotnost [g]	číslo vzorku	Grivory hmotnost [g]	Grilamid hmotnost [g]	Grilon hmotnost [g]
1.	5,2726	3,6658	3,5500	1.	5,3143	3,7839	3,5594
2.	5,3056	3,6487	3,5454	2.	5,3080	3,6528	3,5548
3.	5,2620	3,6578	3,5458	3.	5,3022	3,6610	3,5535
4.	5,2567	3,6345	3,5449	4.	5,3136	3,6371	3,3981
5.	5,3054	3,7813	3,5643	5.	5,2646	3,6556	3,5737
6.	5,2118	3,6509	3,4018	6.	5,2475	3,6506	3,4103
7.	5,2997	3,6529	3,5672	7.	5,2875	3,6680	3,5542
8.	5,2788	3,6587	3,5450	8.	5,2690	3,6622	3,5758
9.	5,2389	3,6599	3,3894	9.	5,2199	3,6600	3,5546
10.	5,2939	3,6565	3,5442	10.	5,2800	3,6588	3,5537

7. Měření				8. Měření			
	Grivory	Grilamid	Grilon		Grivory	Grilamid	Grilon
číslo vzorku	hmotnost [g]	hmotnost [g]	hmotnost [g]	číslo vzorku	hmotnost [g]	hmotnost [g]	hmotnost [g]
1.	5,3073	3,6381	3,5596	1.	5,2736	3,6636	3,4102
2.	5,2523	3,6623	3,5823	2.	5,3228	3,6647	3,5668
3.	5,2920	3,6563	3,4045	3.	5,3229	3,6395	3,5666
4.	5,3127	3,6519	3,5606	4.	5,3175	3,6530	3,5713
5.	5,2246	3,6693	3,5605	5.	5,2294	3,6555	3,5860
6.	5,2741	3,6632	3,5800	6.	5,3114	3,6577	3,5670
7.	5,2843	3,6609	3,4167	7.	5,2897	3,6623	3,5655
8.	5,3186	3,6599	3,5600	8.	5,2777	3,6609	3,5875
9.	5,3176	3,7859	3,5612	9.	5,2555	3,6705	3,5658
10.	5,2688	3,6540	3,5651	10.	5,2960	3,7868	3,4221

9. Měření				10. Měření			
	Grivory	Grilamid	Grilon		Grivory	Grilamid	Grilon
číslo vzorku	hmotnost [g]	hmotnost [g]	hmotnost [g]	číslo vzorku	hmotnost [g]	hmotnost [g]	hmotnost [g]
1.	5,3383	3,6744	3,4390	1.	5,3411	3,6590	3,4416
2.	5,3121	3,6427	3,5820	2.	5,2963	3,7920	3,5859
3.	5,3267	3,6589	3,5844	3.	5,3297	3,6650	3,4289
4.	5,2936	3,6648	3,5840	4.	5,3352	3,6673	3,5865
5.	5,2709	3,7915	3,5829	5.	5,2746	3,6662	3,5916
6.	5,3320	3,6566	3,4249	6.	5,3076	3,6748	3,6069
7.	5,2429	3,6657	3,6031	7.	5,2462	3,6571	3,5876
8.	5,3380	3,6615	3,5835	8.	5,3140	3,6433	3,5869
9.	5,2880	3,6667	3,6059	9.	5,2908	3,6618	3,5878
10.	5,3040	3,6680	3,5888	10.	5,3409	3,6688	3,6088

11. Měření				12. Měření			
	Grivory	Grilamid	Grilon		Grivory	Grilamid	Grilon
číslo vzorku	hmotnost [g]	hmotnost [g]	hmotnost [g]	číslo vzorku	hmotnost [g]	hmotnost [g]	hmotnost [g]
1.	5,3140	3,6628	3,4319	1.	5,3237	3,6677	3,5919
2.	5,3366	3,6579	3,4444	2.	5,2553	3,6633	3,5910
3.	5,3015	3,6664	3,6107	3.	5,3441	3,6584	3,4456
4.	5,3468	3,6698	3,5899	4.	5,3386	3,7937	3,5908
5.	5,2522	3,7929	3,5905	5.	5,3166	3,6666	3,6146
6.	5,3420	3,6673	3,5914	6.	5,3490	3,6716	3,5924
7.	5,2800	3,6442	3,5907	7.	5,3039	3,6607	3,6122
8.	5,3210	3,6604	3,5894	8.	5,3495	3,6445	3,5970
9.	5,3475	3,6687	3,5954	9.	5,2819	3,6689	3,5923
10.	5,2976	3,6758	3,6123	10.	5,2985	3,6701	3,4329

**Příloha č. 2: Výsledky zkoušek rázové houževnatosti****a) Hladina 70/0**

## Grivory

	$h$ [mm]	$b$ [mm]	$S_z$ [mm <sup>2</sup> ]	$E_d$ [J]	$E_z$ [J]	$E_c$ [J]	$a_{cU}$ [kJ/m <sup>2</sup> ]
1.	4,025	10,118	40,725	2,27	0,04	2,23	54,758
2.	4,017	10,112	40,620	2,04	0,04	2,00	49,237
3.	4,036	10,126	40,869	1,92	0,04	1,88	46,001
4.	4,027	10,119	40,749	2,38	0,04	2,34	57,424
5.	4,025	10,118	40,725	2,12	0,04	2,08	51,074
6.	4,032	10,130	40,844	2,37	0,04	2,33	57,046
7.	4,033	10,128	40,846	2,44	0,04	2,40	58,757
8.	4,031	10,129	40,830	1,96	0,04	1,92	47,024
9.	4,041	10,126	40,919	2,27	0,04	2,23	54,498
10.	4,030	10,129	40,820	2,08	0,04	2,04	49,976

## Grilamid

	$h$ [mm]	$b$ [mm]	$S_z$ [mm <sup>2</sup> ]	$E_d$ [J]	$E_z$ [J]	$E_c$ [J]	$a_{cU}$ [kJ/m <sup>2</sup> ]
1.	3,953	10,018	39,601	2,57	0,04	2,53	63,887
2.	3,939	10,027	39,496	2,54	0,04	2,50	63,297
3.	3,951	10,026	39,613	2,61	0,04	2,57	64,878
4.	3,944	10,022	39,527	2,31	0,04	2,27	57,429
5.	3,935	10,019	39,425	2,27	0,04	2,23	56,563
6.	3,936	10,015	39,419	2,40	0,04	2,36	59,870
7.	3,946	10,022	39,547	2,37	0,04	2,33	58,918
8.	3,962	10,022	39,707	2,58	0,04	2,54	63,968
9.	3,958	10,025	39,679	2,41	0,04	2,37	59,729
10.	3,943	10,017	39,497	2,43	0,04	2,39	60,511

**b) Hladina 70/63**

Grivory

	$h$ [mm]	$b$ [mm]	$S_z$ [mm <sup>2</sup> ]	$E_d$ [J]	$E_z$ [J]	$E_c$ [J]	$a_{cU}$ [kJ/m <sup>2</sup> ]
1.	4,047	10,173	41,170	2,55	0,04	2,51	60,967
2.	4,053	10,177	41,244	2,04	0,04	2,00	48,492
3.	4,049	10,185	41,239	2,46	0,04	2,42	58,682
4.	4,063	10,184	41,378	2,39	0,04	2,35	56,794
5.	4,062	10,183	41,363	2,72	0,04	2,68	64,792
6.	4,056	10,172	41,258	2,47	0,04	2,43	58,898
7.	4,056	10,183	41,302	2,32	0,04	2,28	55,203
8.	4,055	10,184	41,296	2,54	0,04	2,50	60,538
9.	4,060	10,190	41,371	2,38	0,04	2,34	56,561
10.	4,058	10,182	41,319	2,31	0,04	2,27	54,939

Grilamid

	$h$ [mm]	$b$ [mm]	$S_z$ [mm <sup>2</sup> ]	$E_d$ [J]	$E_z$ [J]	$E_c$ [J]	$a_{cU}$ [kJ/m <sup>2</sup> ]
1.	3,982	10,035	39,959	3,00	0,04	2,96	74,075
2.	3,989	10,071	40,173	2,97	0,04	2,93	72,934
3.	3,984	10,053	40,051	2,75	0,04	2,71	67,663
4.	3,993	10,039	40,086	2,91	0,04	2,87	71,597
5.	3,955	10,068	39,819	3,09	0,04	3,05	76,597
6.	3,970	10,071	39,982	3,13	0,04	3,09	77,285
7.	3,943	10,060	39,667	2,53	0,04	2,49	62,773
8.	3,998	10,040	40,140	2,79	0,04	2,75	68,510
9.	3,980	10,040	39,959	2,82	0,04	2,78	69,571
10.	4,002	10,069	40,296	1,83	0,04	1,79	44,421

c) Hladina 50/100

Grivory

	$h$ [mm]	$b$ [mm]	$S_z$ [mm <sup>2</sup> ]	$E_d$ [J]	$E_z$ [J]	$E_c$ [J]	$a_{cU}$ [kJ/m <sup>2</sup> ]
1.	4,118	10,258	42,242	2,56	0,04	2,52	59,656
2.	4,118	10,255	42,230	2,72	0,04	2,68	63,462
3.	4,110	10,252	42,136	2,79	0,04	2,75	65,265
4.	4,103	10,252	42,064	2,57	0,04	2,53	60,147
5.	4,106	10,242	42,054	2,62	0,04	2,58	61,350
6.	4,107	10,248	42,089	2,44	0,04	2,40	57,023
7.	4,113	10,261	42,203	2,89	0,04	2,85	67,530
8.	4,126	10,261	42,337	2,96	0,04	2,92	68,971
9.	4,115	10,260	42,220	2,91	0,04	2,87	67,977
10.	4,111	10,252	42,146	2,74	0,04	2,70	64,063

Grilamid

	$h$ [mm]	$b$ [mm]	$S_z$ [mm <sup>2</sup> ]	$E_d$ [J]	$E_z$ [J]	$E_c$ [J]	$a_{cU}$ [kJ/m <sup>2</sup> ]
1.	3,986	10,064	40,115	2,85	0,04	2,81	70,048
2.	3,972	10,055	39,938	2,88	0,04	2,84	71,109
3.	3,968	10,054	39,894	2,49	0,04	2,45	61,412
4.	3,964	10,058	39,870	2,59	0,04	2,55	63,958
5.	3,962	10,056	39,842	2,57	0,04	2,53	63,501
6.	3,974	10,052	39,947	2,52	0,04	2,48	62,083
7.	3,965	10,053	39,860	2,52	0,04	2,48	62,218
8.	3,966	10,053	39,870	2,60	0,04	2,56	64,208
9.	3,963	10,057	39,856	2,78	0,04	2,74	68,748
10.	3,978	10,048	39,971	2,58	0,04	2,54	63,546

**Příloha č. 3: Výsledky zkoušek vrubové houževnatosti**

**a) Hladina 70/0**

Grivory

	$h$ [mm]	$b_N$ [mm]	$S_v$ [mm <sup>2</sup> ]	$E_d$ [J]	$E_z$ [J]	$E_c$ [J]	$a_{cN}$ [kJ/m <sup>2</sup> ]
1.	4,023	8,127	32,695	0,27	0,04	0,23	7,035
2.	4,018	8,122	32,634	0,27	0,04	0,23	7,048
3.	4,029	8,130	32,756	0,28	0,04	0,24	7,327
4.	4,020	8,127	32,671	0,25	0,04	0,21	6,428
5.	4,011	8,114	32,545	0,25	0,04	0,21	6,453
6.	4,029	8,126	32,740	0,26	0,04	0,22	6,720
7.	4,028	8,129	32,744	0,26	0,04	0,22	6,719
8.	4,019	8,113	32,606	0,30	0,04	0,26	7,974
9.	4,031	8,129	32,768	0,26	0,04	0,22	6,714
10.	4,029	8,133	32,768	0,24	0,04	0,20	6,104

Grilamid

	$h$ [mm]	$b_N$ [mm]	$S_v$ [mm <sup>2</sup> ]	$E_d$ [J]	$E_z$ [J]	$E_c$ [J]	$a_{cN}$ [kJ/m <sup>2</sup> ]
1.	3,965	8,017	31,787	0,63	0,04	0,59	18,561
2.	3,937	8,005	31,516	0,63	0,04	0,59	18,721
3.	3,955	8,010	31,680	0,62	0,04	0,58	18,308
4.	3,943	8,015	31,603	0,61	0,04	0,57	18,036
5.	3,932	8,017	31,523	0,60	0,04	0,56	17,765
6.	3,938	8,020	31,583	0,62	0,04	0,58	18,364
7.	3,929	8,022	31,518	0,63	0,04	0,59	18,719
8.	3,938	8,018	31,575	0,62	0,04	0,58	18,369
9.	3,937	8,021	31,579	0,59	0,04	0,55	17,417
10.	3,933	8,024	31,558	0,63	0,04	0,59	18,696

Grilon

	$h$ [mm]	$b_N$ [mm]	$S_v$ [mm <sup>2</sup> ]	$E_d$ [J]	$E_z$ [J]	$E_c$ [J]	$a_{cN}$ [kJ/m <sup>2</sup> ]
1.	3,910	8,002	31,288	1,79	0,04	1,75	55,932
2.	3,893	8,004	31,160	1,73	0,04	1,69	54,237
3.	3,906	8,002	31,256	1,84	0,04	1,80	57,589
4.	3,901	8,013	31,259	1,74	0,04	1,70	54,385
5.	4,008	8,056	32,288	1,72	0,04	1,68	52,031
6.	4,001	8,062	32,256	1,78	0,04	1,74	53,943
7.	3,945	8,024	31,655	1,69	0,04	1,65	52,125
8.	3,899	7,999	31,188	1,86	0,04	1,82	58,356
9.	3,896	7,998	31,160	1,82	0,04	1,78	57,124
10.	3,999	8,059	32,228	1,74	0,04	1,70	52,749

**b) Hladina 70/63**

Grivory

	$h$ [mm]	$b_N$ [mm]	$S_v$ [mm <sup>2</sup> ]	$E_d$ [J]	$E_z$ [J]	$E_c$ [J]	$a_{cN}$ [kJ/m <sup>2</sup> ]
1.	4,056	8,165	33,117	0,29	0,04	0,25	7,549
2.	4,054	8,169	33,117	0,31	0,04	0,27	8,153
3.	4,050	8,171	33,093	0,30	0,04	0,26	7,857
4.	4,063	8,163	33,166	0,33	0,04	0,29	8,744
5.	4,048	8,164	33,048	0,29	0,04	0,25	7,565
6.	4,058	8,174	33,170	0,27	0,04	0,23	6,934
7.	4,062	8,169	33,182	0,31	0,04	0,27	8,137
8.	4,059	8,157	33,109	0,33	0,04	0,29	8,759
9.	4,058	8,167	33,142	0,28	0,04	0,24	7,242
10.	4,046	8,178	33,088	0,29	0,04	0,25	7,556

Grilamid

	$h$ [mm]	$b_N$ [mm]	$S_v$ [mm <sup>2</sup> ]	$E_d$ [J]	$E_z$ [J]	$E_c$ [J]	$a_{cN}$ [kJ/m <sup>2</sup> ]
1.	3,975	8,077	32,109	0,65	0,04	0,61	18,998
2.	3,969	8,068	32,022	0,67	0,04	0,63	19,674
3.	3,977	8,069	32,088	0,65	0,04	0,61	19,010
4.	3,970	8,088	32,112	0,65	0,04	0,61	18,996
5.	3,963	8,083	32,033	0,68	0,04	0,64	19,979
6.	3,958	8,069	31,937	0,63	0,04	0,59	18,474
7.	3,974	8,079	32,106	0,63	0,04	0,59	18,377
8.	3,973	8,066	32,046	0,67	0,04	0,63	19,659
9.	3,964	8,081	32,033	0,68	0,04	0,64	19,979
10.	3,977	8,069	32,090	0,67	0,04	0,63	19,632

Grilon

	$h$ [mm]	$b_N$ [mm]	$S_v$ [mm <sup>2</sup> ]	$E_d$ [J]	$E_z$ [J]	$E_c$ [J]	$a_{cN}$ [kJ/m <sup>2</sup> ]
1.	4,019	8,136	32,699	2,29	0,04	2,25	68,810
2.	3,999	8,092	32,361	2,37	0,04	2,33	72,000
3.	3,914	8,051	31,512	2,13	0,04	2,09	66,325
4.	3,935	8,063	31,728	2,17	0,04	2,13	67,133
5.	3,922	8,063	31,623	2,27	0,04	2,23	70,518
6.	4,049	8,129	32,914	2,15	0,04	2,11	64,106
7.	3,945	8,084	31,891	2,27	0,04	2,23	69,925
8.	3,978	8,081	32,146	2,27	0,04	2,23	69,371
9.	4,039	8,123	32,809	2,32	0,04	2,28	69,494
10.	4,039	8,092	32,684	2,37	0,04	2,33	71,290

c) Hladina 50/100

Grivory

	$h$ [mm]	$b_N$ [mm]	$S_v$ [mm <sup>2</sup> ]	$E_d$ [J]	$E_z$ [J]	$E_c$ [J]	$a_{cN}$ [kJ/m <sup>2</sup> ]
1.	4,090	8,233	33,673	0,55	0,04	0,51	15,146
2.	4,116	8,257	33,986	0,47	0,04	0,43	12,652
3.	4,101	8,248	33,825	0,50	0,04	0,46	13,599
4.	4,113	8,259	33,969	0,47	0,04	0,43	12,659
5.	4,096	8,240	33,751	0,52	0,04	0,48	14,222
6.	4,114	8,256	33,965	0,47	0,04	0,43	12,660
7.	4,125	8,256	34,056	0,46	0,04	0,42	12,333
8.	4,118	8,251	33,978	0,48	0,04	0,44	12,950
9.	4,100	8,243	33,796	0,51	0,04	0,47	13,907
10.	4,116	8,244	33,932	0,48	0,04	0,44	12,967

Grilamid

	$h$ [mm]	$b_N$ [mm]	$S_v$ [mm <sup>2</sup> ]	$E_d$ [J]	$E_z$ [J]	$E_c$ [J]	$a_{cN}$ [kJ/m <sup>2</sup> ]
1.	3,934	8,041	31,633	0,64	0,04	0,60	18,967
2.	3,959	8,051	31,874	0,67	0,04	0,63	19,765
3.	3,962	8,032	31,823	0,71	0,04	0,67	21,054
4.	3,946	8,038	31,718	0,70	0,04	0,66	20,808
5.	3,950	8,050	31,798	0,62	0,04	0,58	18,240
6.	3,954	8,050	31,830	0,68	0,04	0,64	20,107
7.	3,984	8,070	32,151	0,44	0,04	0,40	12,441
8.	3,966	8,043	31,899	0,65	0,04	0,61	19,123
9.	3,966	8,049	31,922	0,63	0,04	0,59	18,482
10.	3,961	8,054	31,902	0,68	0,04	0,64	20,062

Grilon

	$h$ [mm]	$b_N$ [mm]	$S_v$ [mm <sup>2</sup> ]	$E_d$ [J]	$E_z$ [J]	$E_c$ [J]	$a_{cN}$ [kJ/m <sup>2</sup> ]
1.	4,079	8,214	33,505	1,94	0,04	1,90	56,708
2.	4,072	8,190	33,350	2,11	0,04	2,07	62,070
3.	4,067	8,169	33,223	2,19	0,04	2,15	64,714
4.	3,958	8,141	32,222	1,94	0,04	1,90	58,966
5.	4,071	8,173	33,272	2,11	0,04	2,07	62,214
6.	4,084	8,169	33,362	2,17	0,04	2,13	63,845
7.	3,952	8,132	32,138	2,18	0,04	2,14	66,589
8.	4,074	8,168	33,276	2,14	0,04	2,10	63,108
9.	4,067	8,157	33,175	2,17	0,04	2,13	64,206
10.	4,078	8,172	33,325	2,02	0,04	1,98	59,414



## Test report

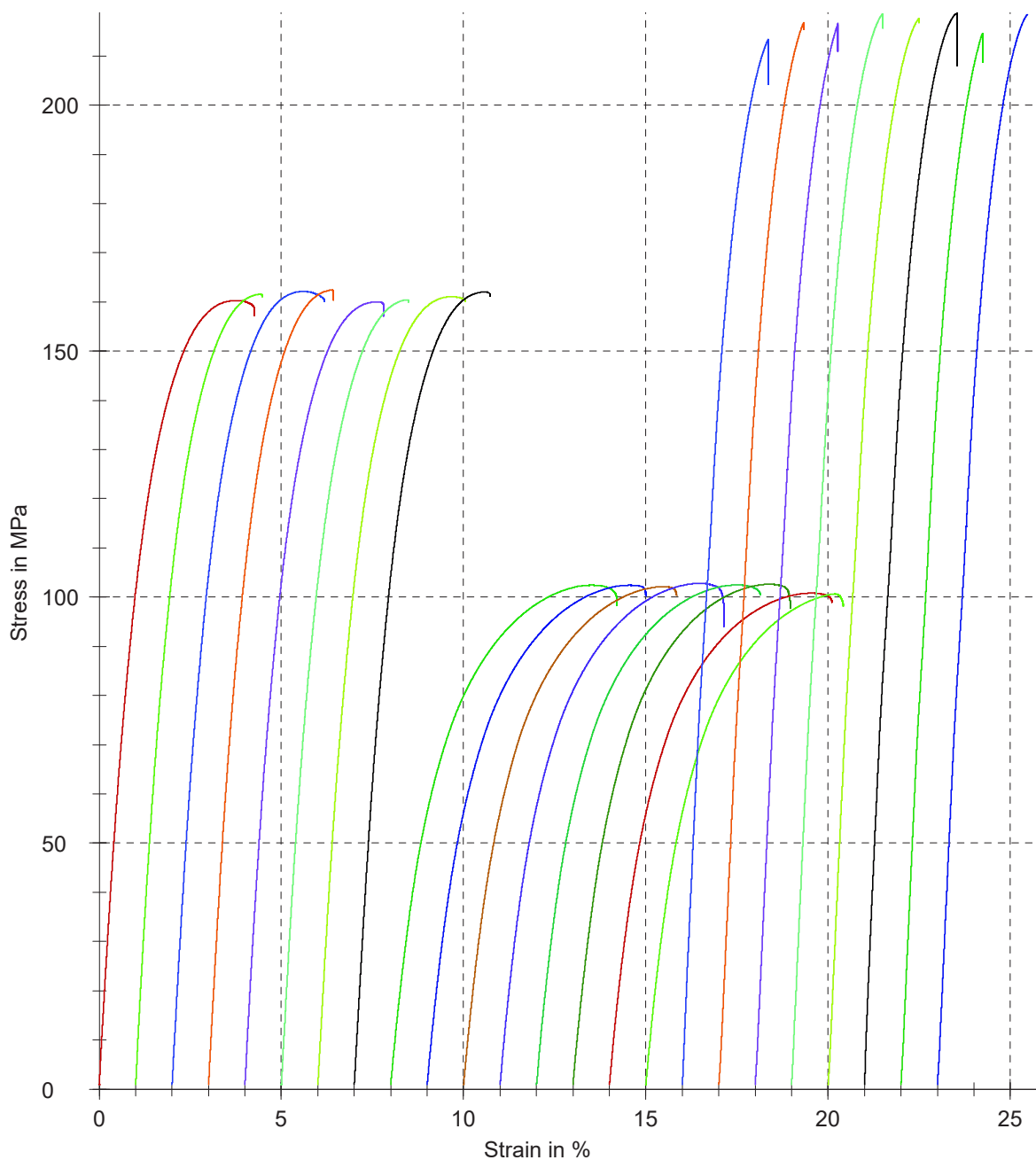
Customer : DP T. Neuzil  
Test standard : ČSN EN ISO 527-1

Specimen type : ČSN EN ISO 527-2, 1A  
Machine data : Zwick Z250, 50kN

Pre-load : 1 MPa  
Speed, tensile modulus : 1 mm/min  
Test speed : 2 mm/min

Grip to grip separation at the start position : 115,10 mm  
Gage length, standard travel : 50 mm

### Series graph:





## Test report

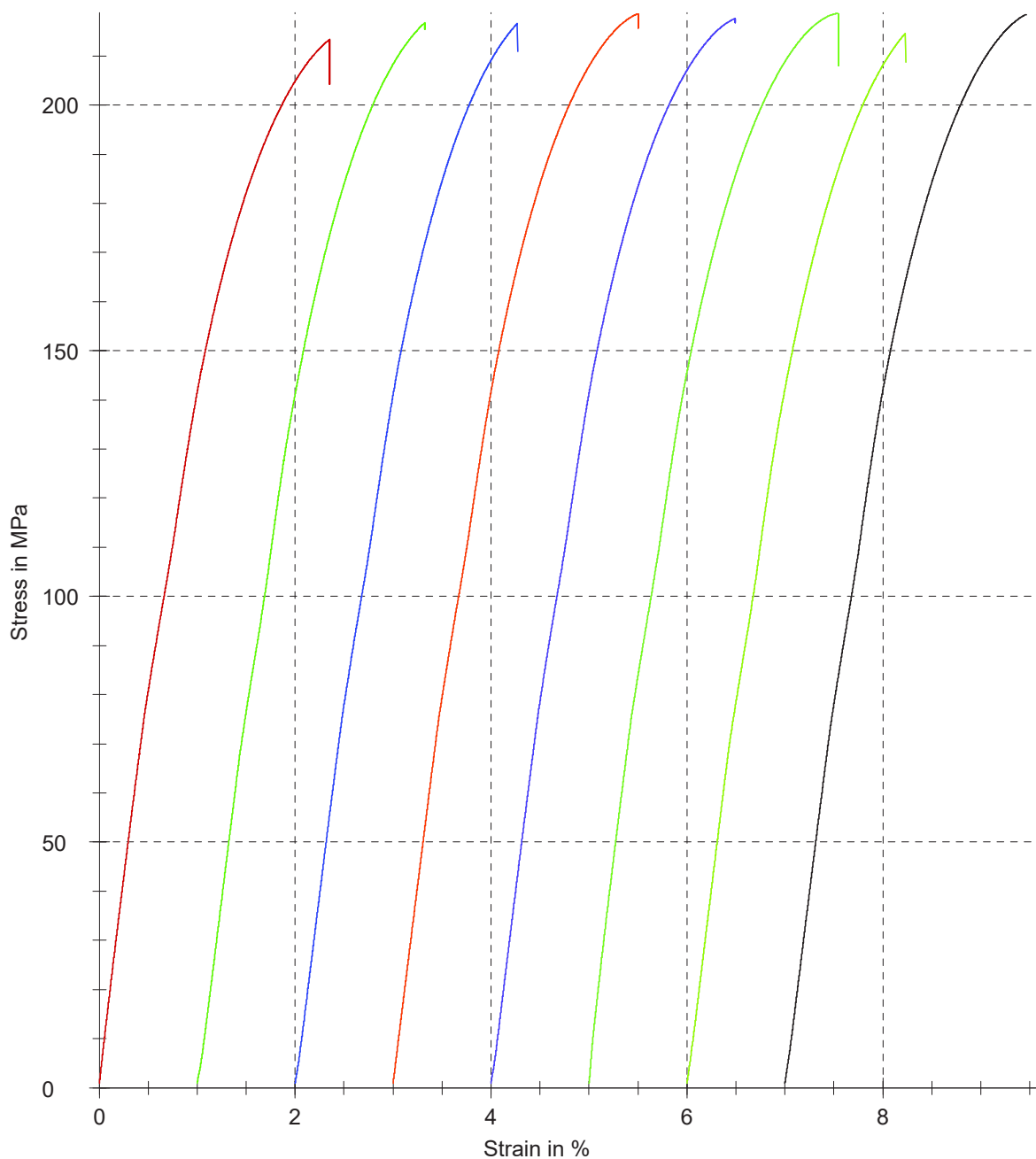
Customer : DP T. Neuzil  
Test standard : ČSN EN ISO 527-1

Specimen type : ČSN EN ISO 527-2, 1A  
Machine data : Zwick Z250, 50kN

Pre-load : 1 MPa  
Speed, tensile modulus : 1 mm/min  
Test speed : 2 mm/min

Grip to grip separation at the start position : 115,10 mm  
Gage length, standard travel : 50 mm

### Series graph:





## Test report

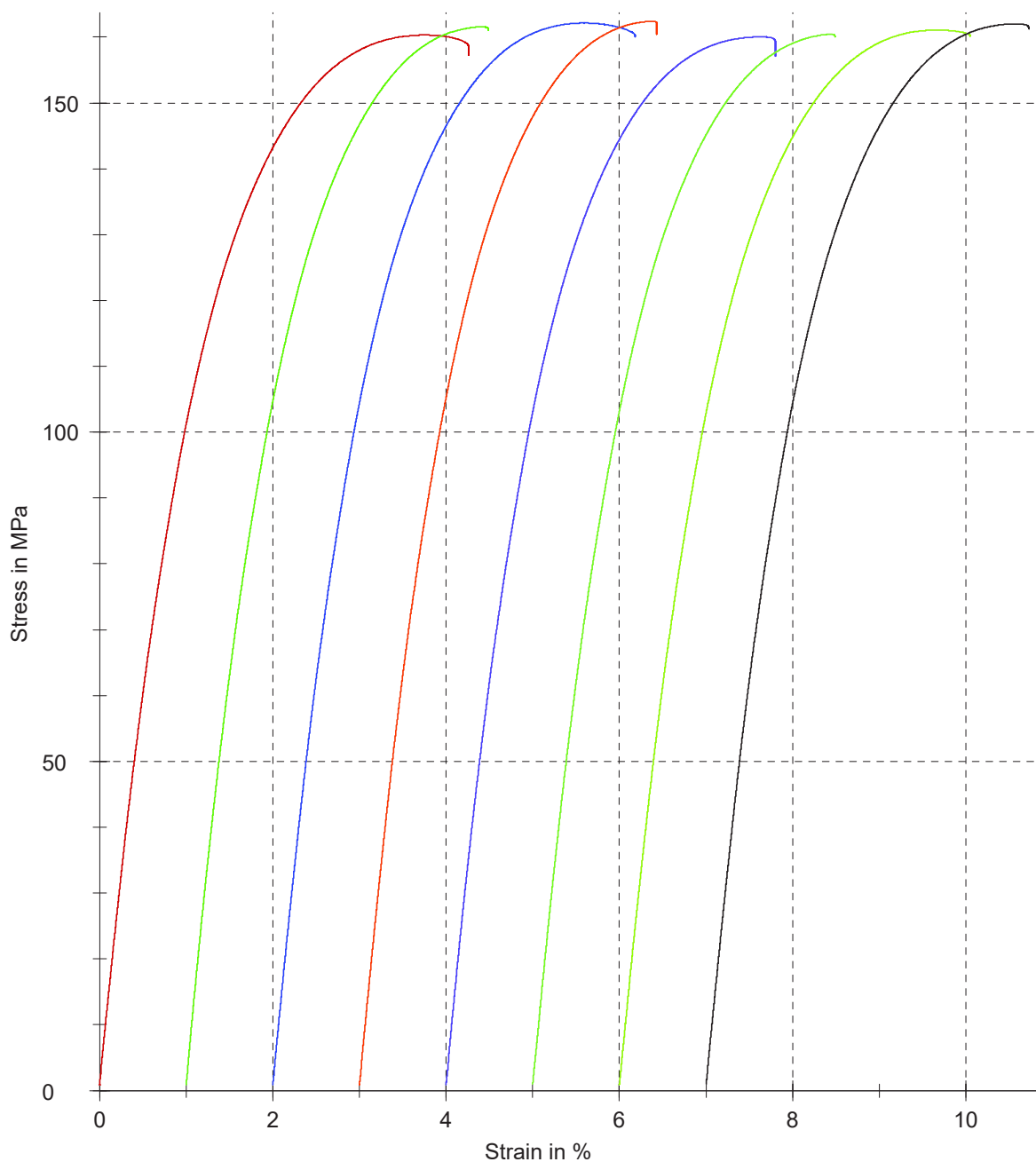
Customer : DP T. Neuzil  
Test standard : ČSN EN ISO 527-1

Specimen type : ČSN EN ISO 527-2, 1A  
Machine data : Zwick Z250, 50kN

Pre-load : 1 MPa  
Speed, tensile modulus : 1 mm/min  
Test speed : 2 mm/min

Grip to grip separation at the start position : 115,10 mm  
Gage length, standard travel : 50 mm

### Series graph:





## Test report

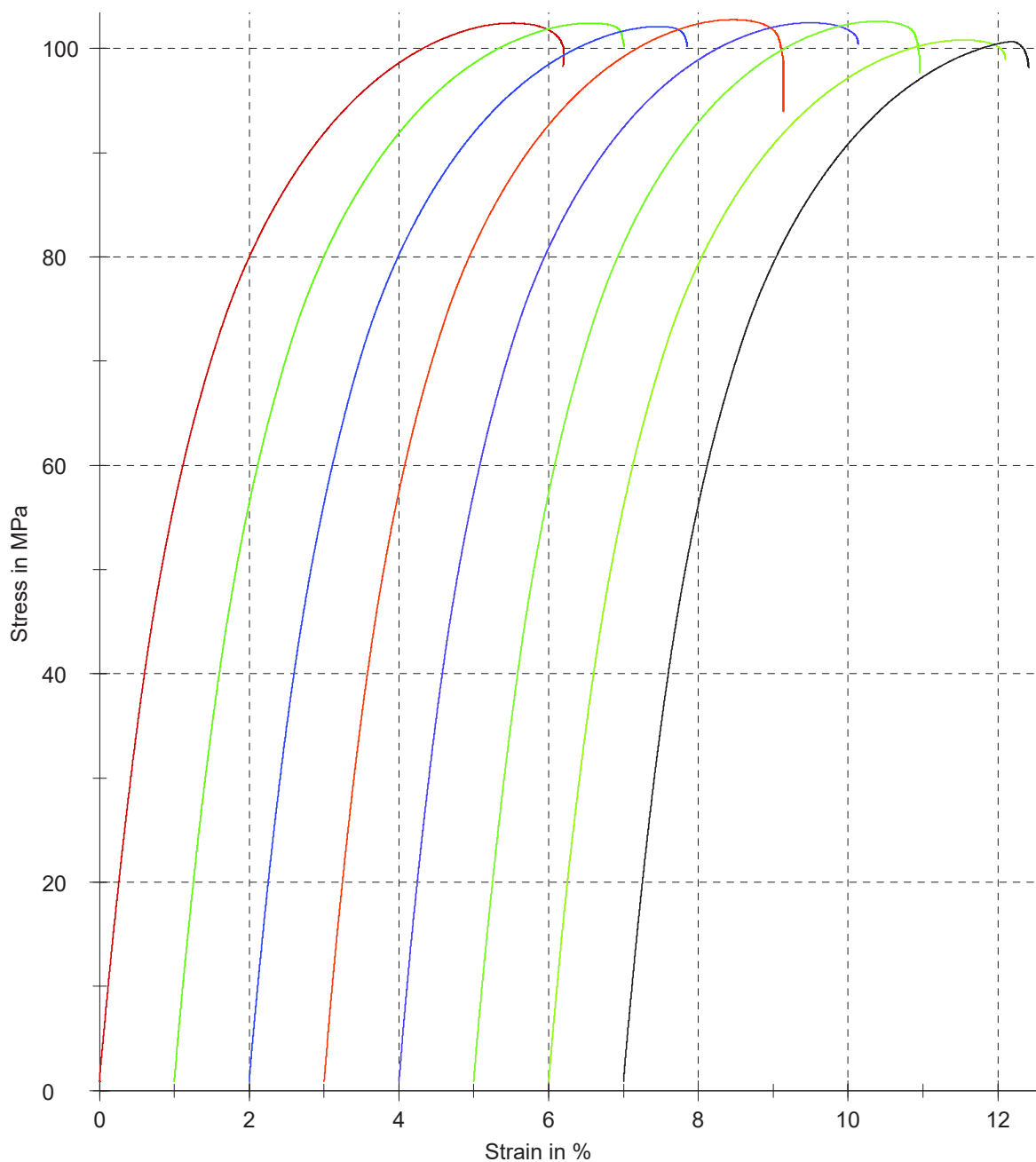
Customer : DP T. Neuzil  
Test standard : ČSN EN ISO 527-1

Specimen type : ČSN EN ISO 527-2, 1A  
Machine data : Zwick Z250, 50kN

Pre-load : 1 MPa  
Speed, tensile modulus : 1 mm/min  
Test speed : 2 mm/min

Grip to grip separation at the start position : 115,10 mm  
Gage length, standard travel : 50 mm

### Series graph:





## Test report

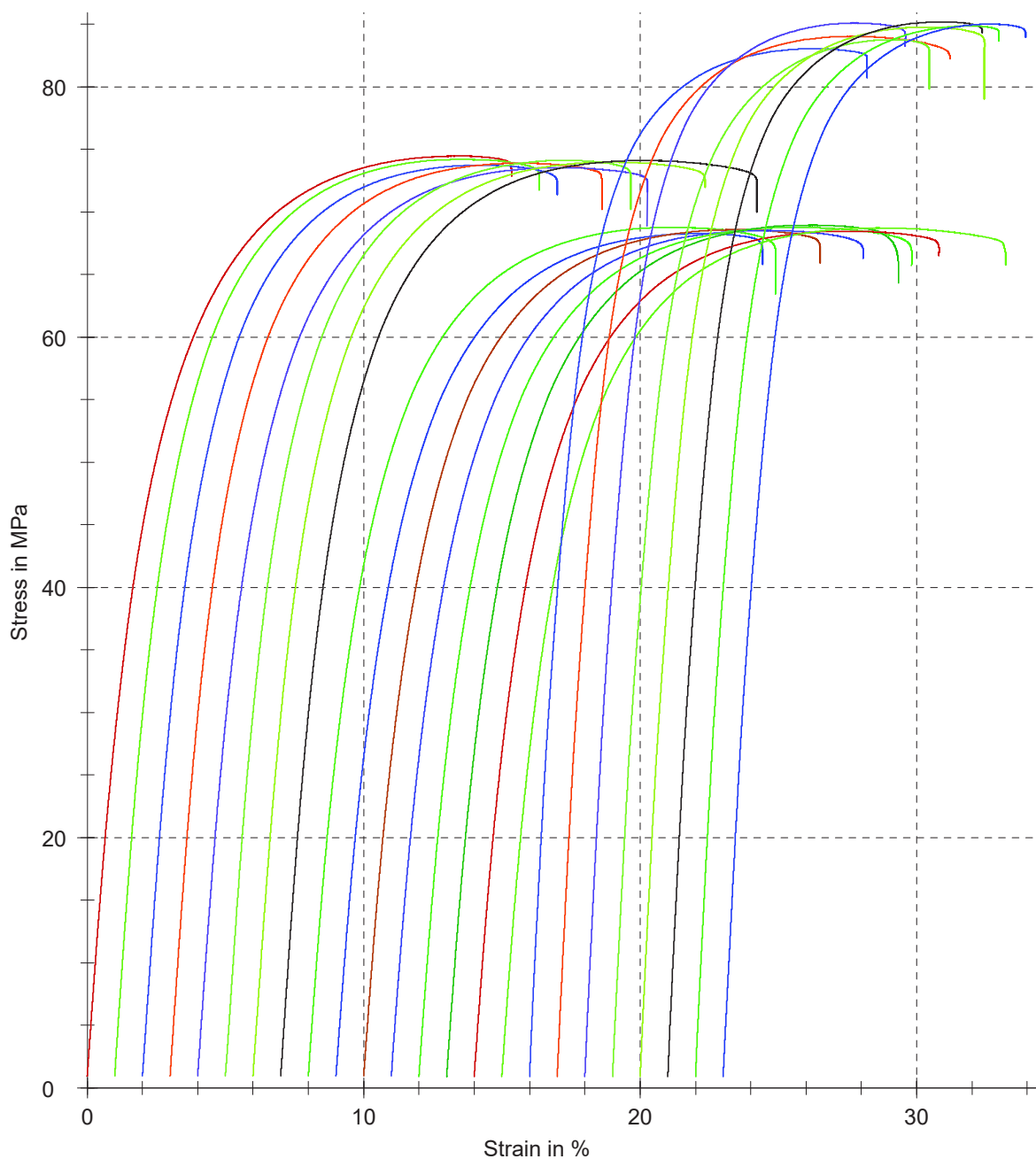
Customer : DP T. Neuzil  
Test standard : ČSN EN ISO 527-1

Specimen type : ČSN EN ISO 527-2, 1A  
Machine data : Zwick Z250, 50kN

Pre-load : 1 MPa  
Speed, tensile modulus : 1 mm/min  
Test speed : 5 mm/min

Grip to grip separation at the start position : 115,10 mm  
Gage length, standard travel : 50 mm

### Series graph:





## Test report

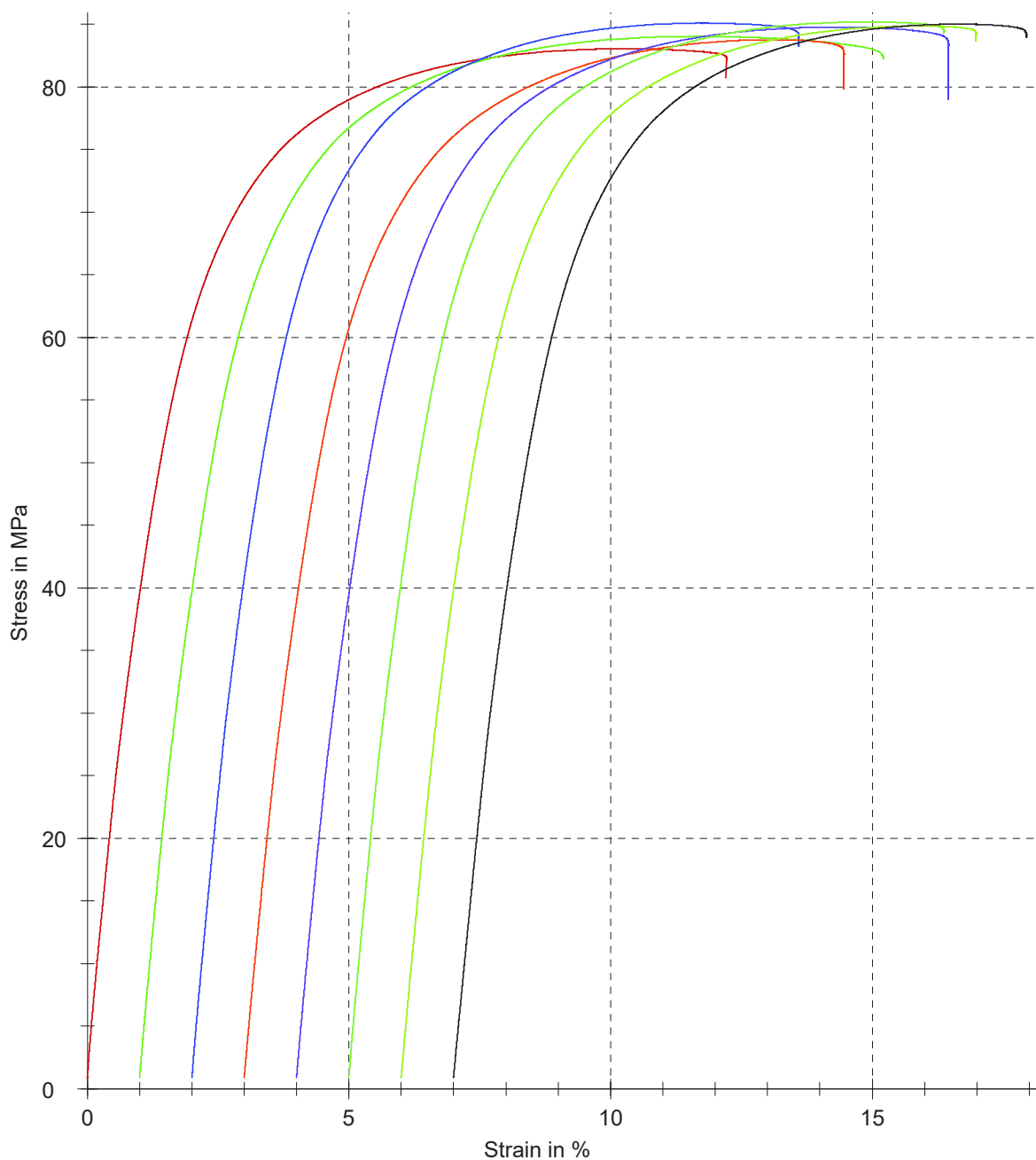
Customer : DP T. Neuzil  
Test standard : ČSN EN ISO 527-1

Specimen type : ČSN EN ISO 527-2, 1A  
Machine data : Zwick Z250, 50kN

Pre-load : 1 MPa  
Speed, tensile modulus : 1 mm/min  
Test speed : 5 mm/min

Grip to grip separation at the start position : 115,10 mm  
Gage length, standard travel : 50 mm

### Series graph:





## Test report

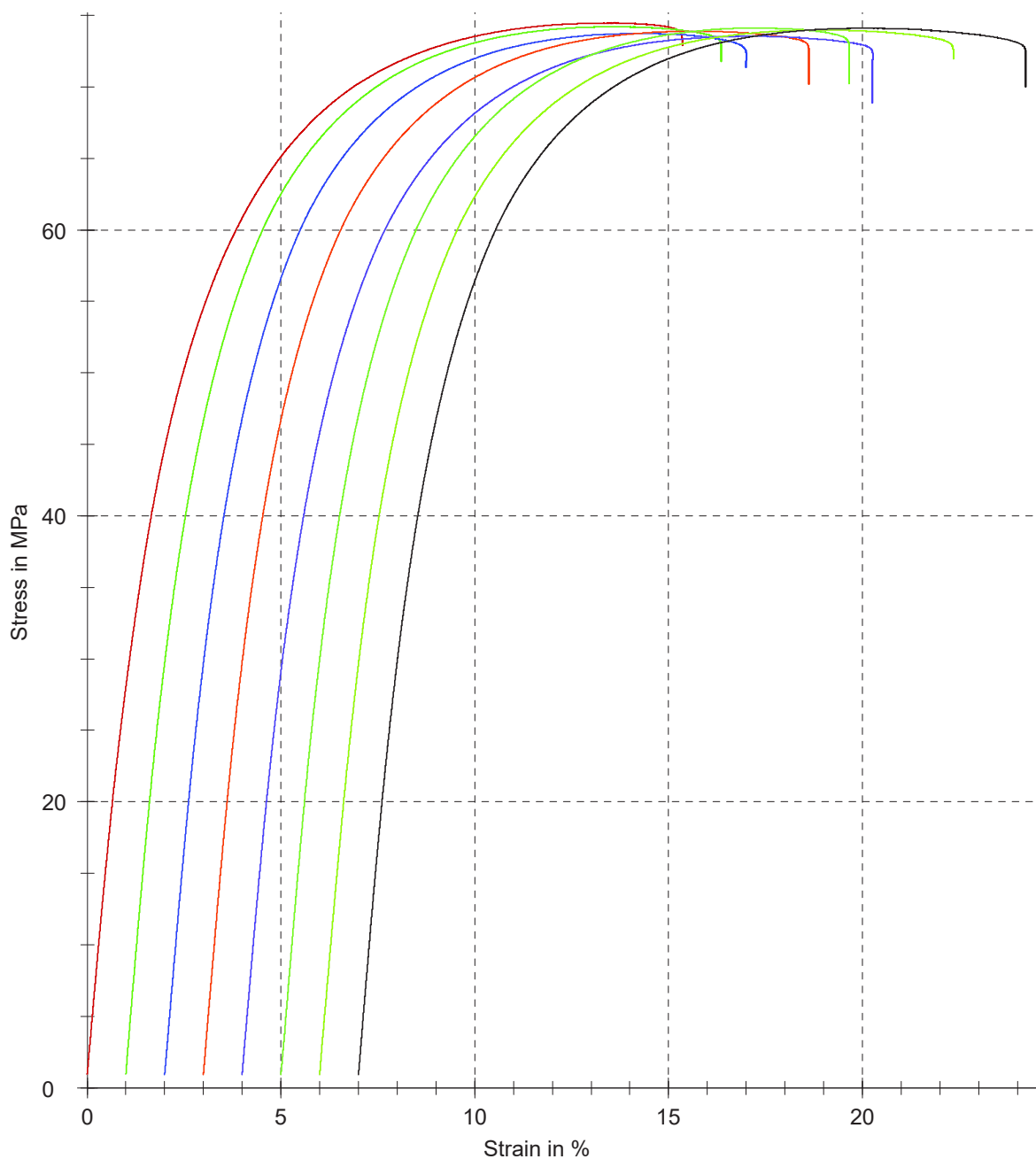
Customer : DP T. Neuzil  
Test standard : ČSN EN ISO 527-1

Specimen type : ČSN EN ISO 527-2, 1A  
Machine data : Zwick Z250, 50kN

Pre-load : 1 MPa  
Speed, tensile modulus : 1 mm/min  
Test speed : 5 mm/min

Grip to grip separation at the start position : 115,10 mm  
Gage length, standard travel : 50 mm

### Series graph:





## Test report

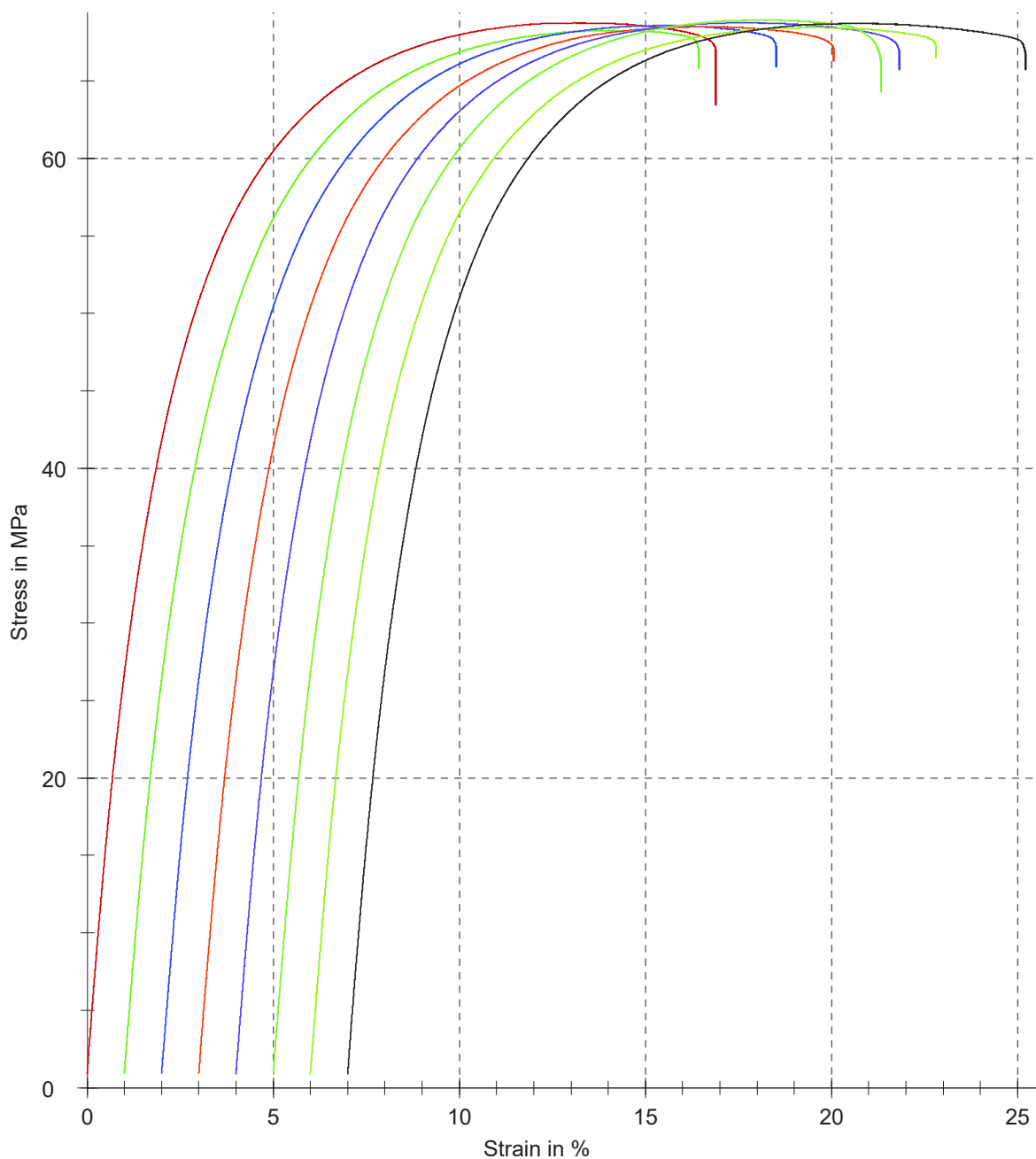
Customer : DP T. Neuzil  
Test standard : ČSN EN ISO 527-1

Specimen type : ČSN EN ISO 527-2, 1A  
Machine data : Zwick Z250, 50kN

Pre-load : 1 MPa  
Speed, tensile modulus : 1 mm/min  
Test speed : 5 mm/min

Grip to grip separation at the start position : 115,10 mm  
Gage length, standard travel : 50 mm

### Series graph:





## Test report

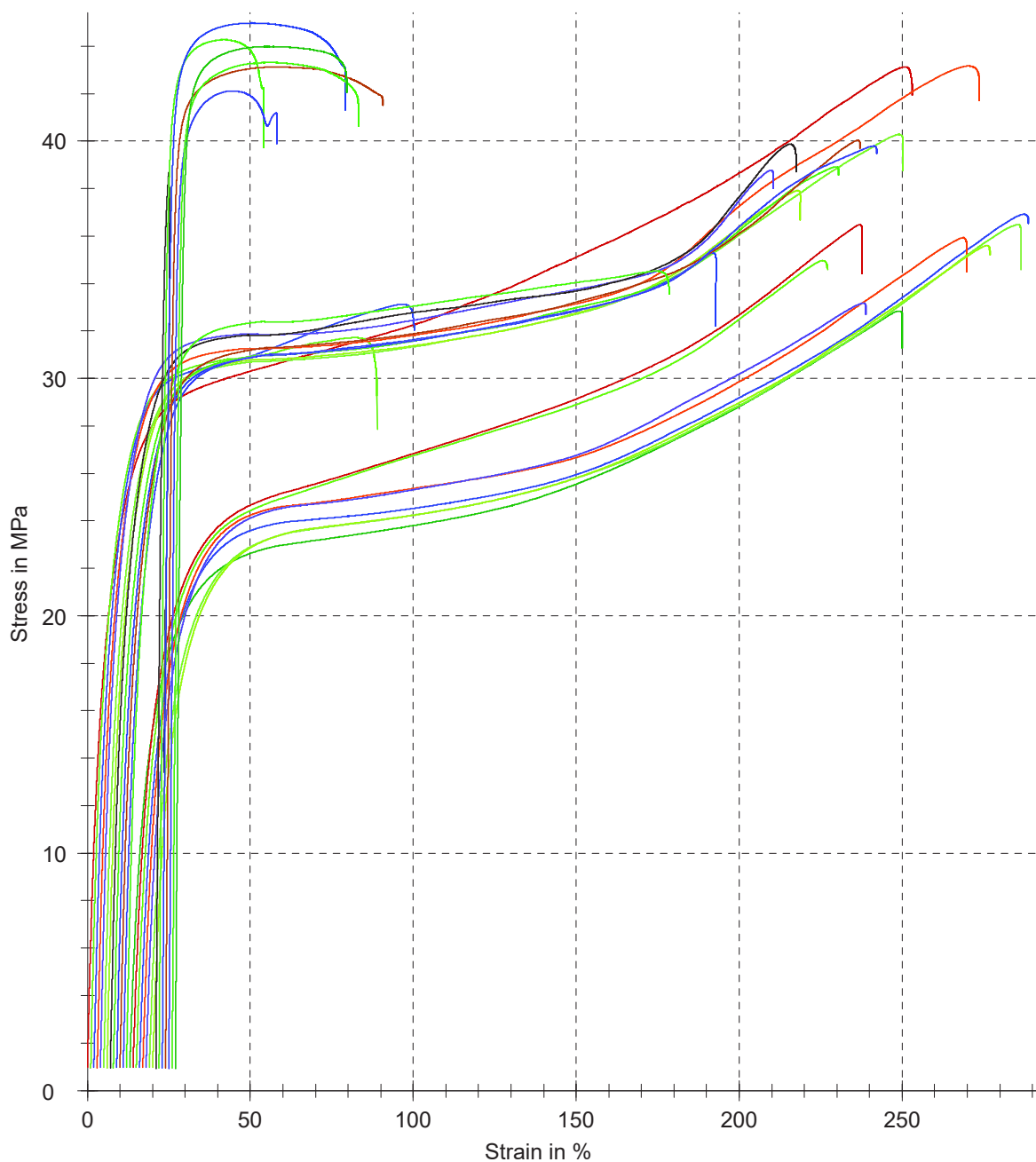
Customer : DP T. Neuzil  
Test standard : ČSN EN ISO 527-1

Specimen type : ČSN EN ISO 527-2, 1A  
Machine data : Zwick Z250, 50kN

Pre-load : 1 MPa  
Speed, tensile modulus : 1 mm/min  
Test speed : 50 mm/min

Grip to grip separation at the start position : 115,10 mm  
Gage length, standard travel : 50 mm

### Series graph:





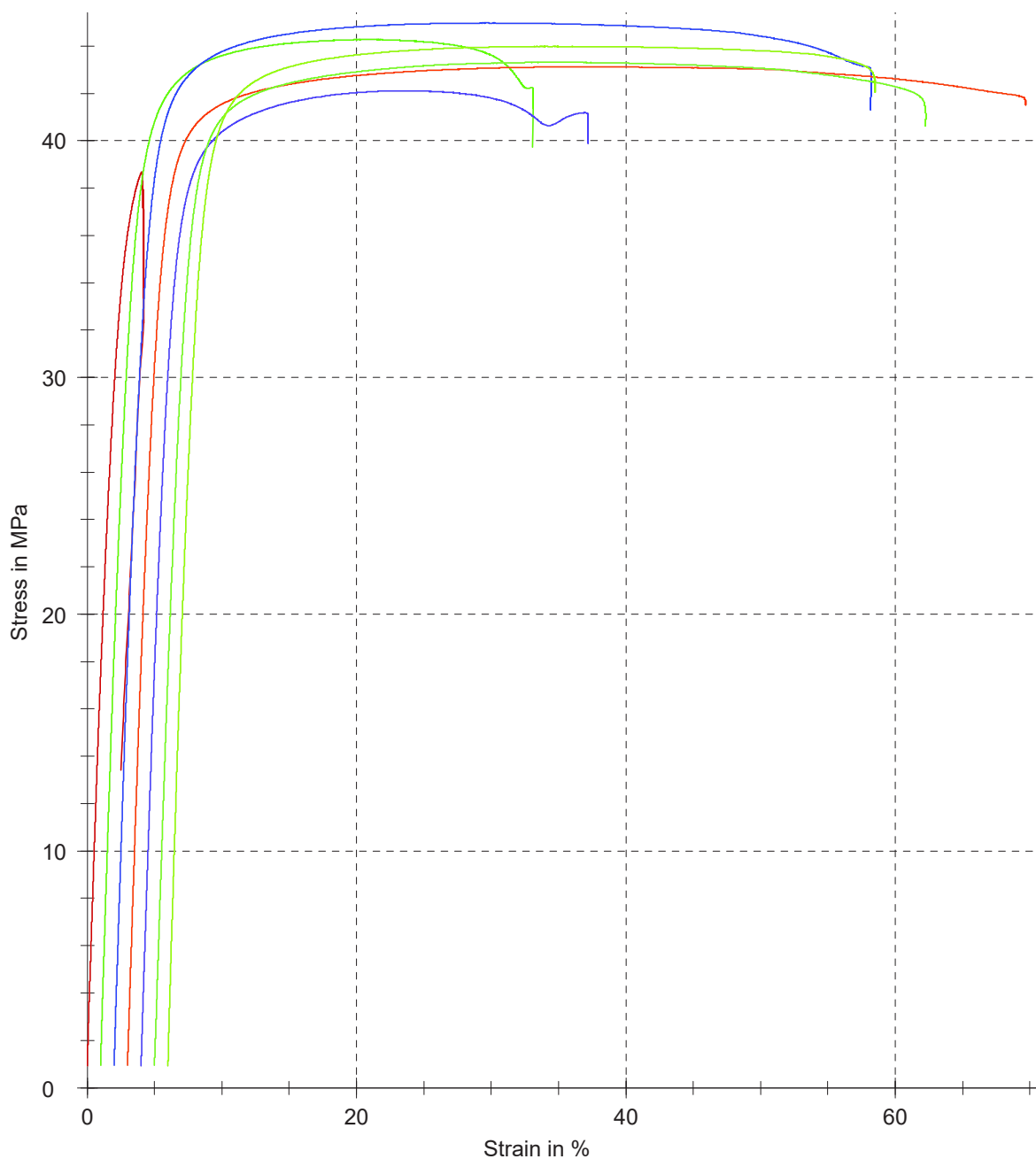
## Test report

Customer : DP T. Neuzil  
Test standard : ČSN EN ISO 527-1

Specimen type : ČSN EN ISO 527-2, 1A  
Machine data : Zwick Z250, 50kN

Pre-load : 1 MPa      Grip to grip separation at the start position : 115,10 mm  
Speed, tensile modulus : 1 mm/min      Gage length, standard travel : 50 mm  
Test speed : 50 mm/min

### Series graph:

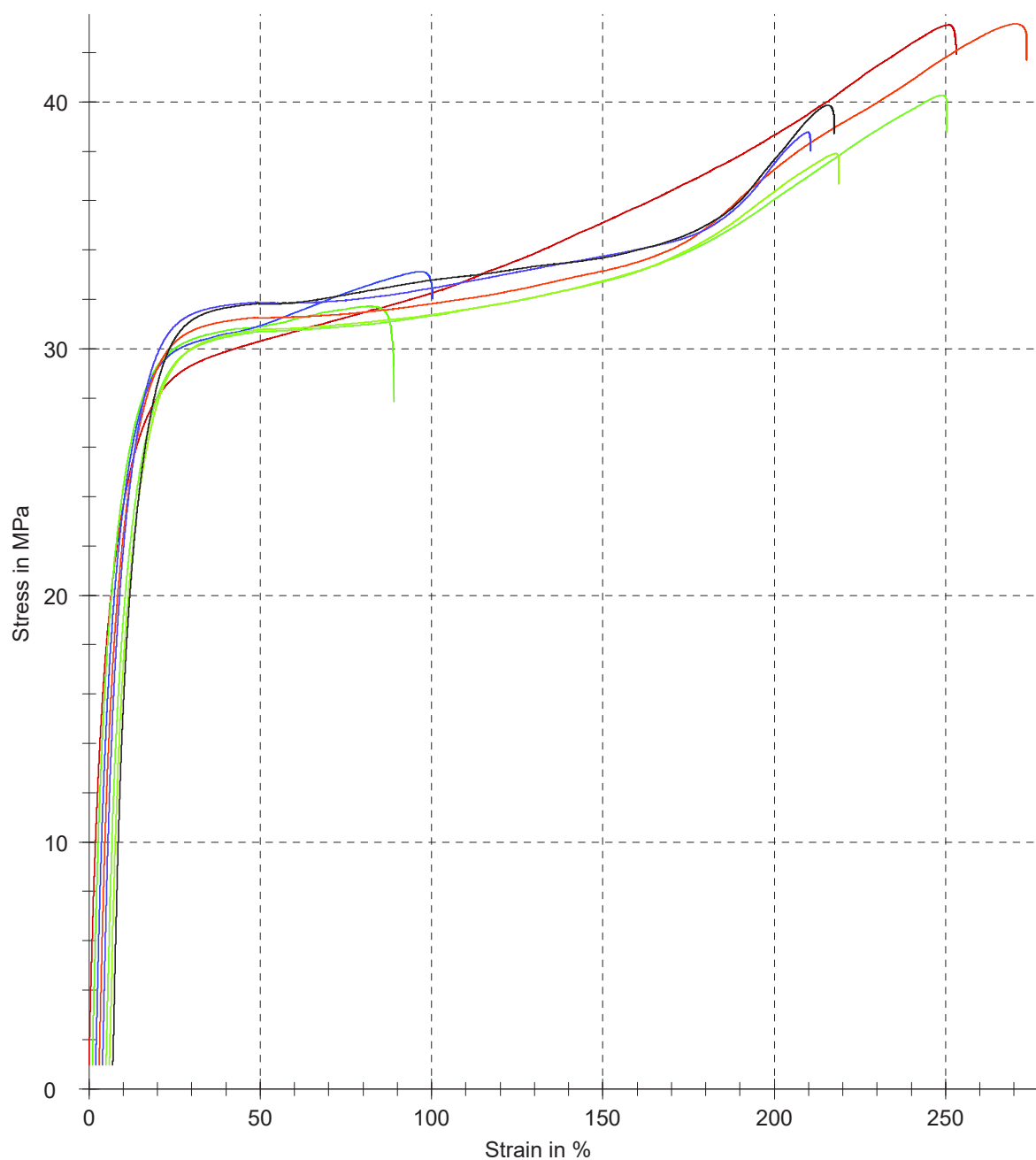




## Test report

Customer	: DP T. Neuzil	Specimen type	: ČSN EN ISO 527-2, 1A
Test standard	: ČSN EN ISO 527-1	Machine data	: Zwick Z250, 50kN
Pre-load	: 1 MPa	Grip to grip separation at the start position	: 115,10 mm
Speed, tensile modulus	: 1 mm/min	Gage length, standard travel	: 50 mm
Test speed	: 50 mm/min		

### Series graph:





## Test report

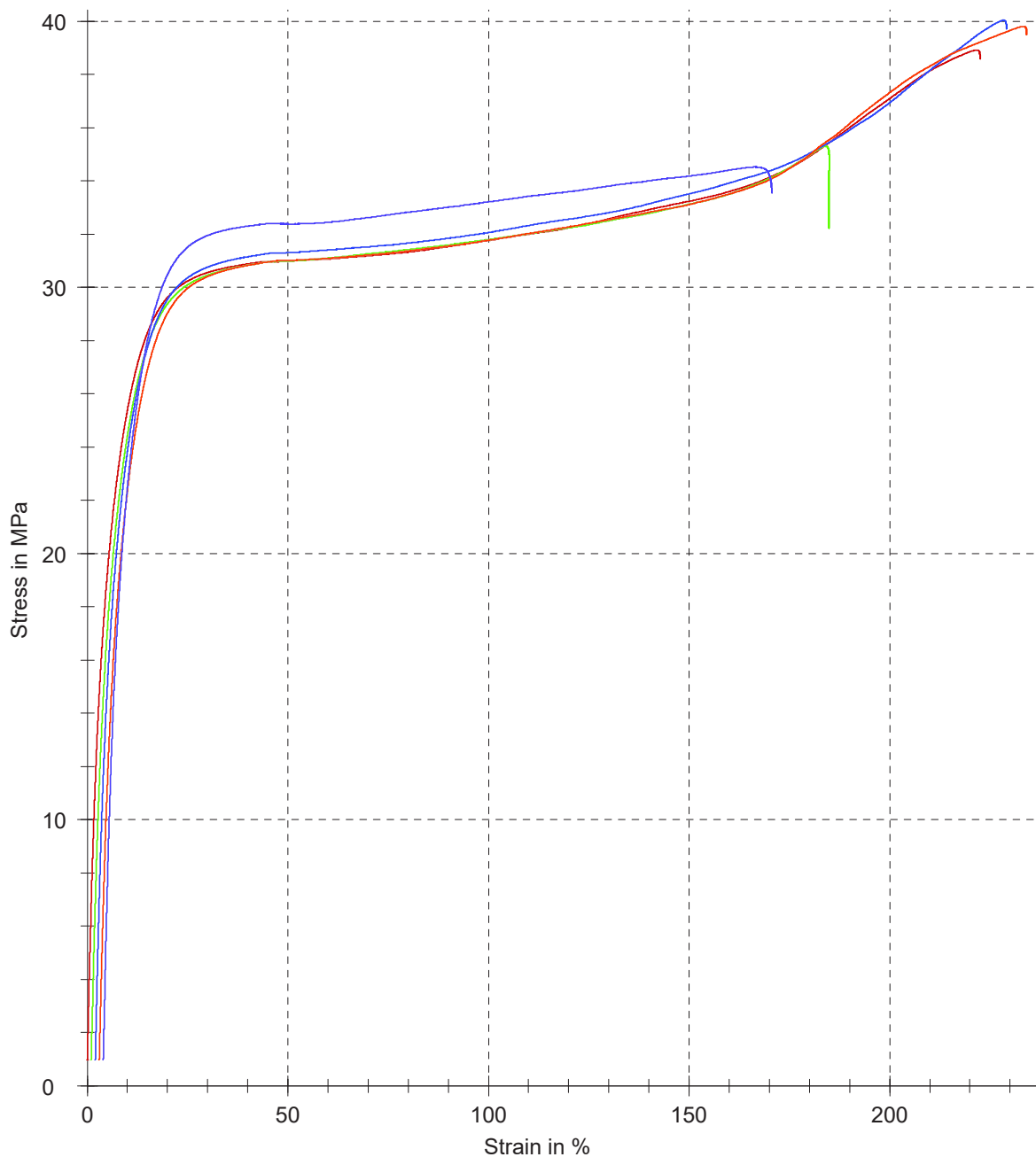
Customer : DP T. Neuzil  
Test standard : ČSN EN ISO 527-1

Specimen type : ČSN EN ISO 527-2, 1A  
Machine data : Zwick Z250, 50kN

Pre-load : 1 MPa  
Speed, tensile modulus : 1 mm/min  
Test speed : 50 mm/min

Grip to grip separation at the start position : 115,10 mm  
Gage length, standard travel : 50 mm

### Series graph:





## Test report

Customer : DP T. Neuzil  
Test standard : ČSN EN ISO 527-1

Specimen type : ČSN EN ISO 527-2, 1A  
Machine data : Zwick Z250, 50kN

Pre-load : 1 MPa  
Speed, tensile modulus : 1 mm/min  
Test speed : 50 mm/min

Grip to grip separation at the start position : 115,10 mm  
Gage length, standard travel : 50 mm

### Series graph:

