TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
Fakulta textilní

Analýza hydrostatické odolnosti tkanin a výpočet odolnosti pomocí teoretické mechaniky

Diplomová práce

Studijní program: N3957 – Průmyslové inženýrství
Studijní obor: 3901T073 – Produktové inženýrství

Autor práce: **Bc. Markéta Šťasná**
Vedoucí práce: Ing. Pavla Těšinová, Ph.D.

Liberec 2018

TECHNICAL UNIVERSITY OF LIBEREC
Faculty of Textile Engineering

Analysis of hydrostatic resistance fabrics and calculation of resistance using theoretical mechanics

Master thesis

Study programme: N3957 – Industrial Engineering
Study branch: 3901T073 – Product Engineering

Author: **Bc. Markéta Šťasná**
Supervisor: Ing. Pavla Těšinová, Ph.D.

Liberec 2018

Technická univerzita v Liberci
Fakulta textilní
Akademický rok: **2015/2016**

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení:	**Bc. Markéta Šťasná**
Osobní číslo:	**T15000056**
Studijní program:	**N3957 Průmyslové inženýrství**
Studijní obor:	**Produktové inženýrství**
Název tématu:	**Analýza hydrostatické odolnosti tkanin a výpočet odolnosti pomocí teoretické mechaniky**
Zadávající katedra:	**Katedra hodnocení textilií**

Zásady pro vypracování:

1) Zpracujte literární rešerši na téma výpočtu tlakových zkoušek a rovnic popisujících spojité zatížení. Zaměřte se na vztahy, které definují vlastnosti srovnatelné s hydrostatickou odolností textilií.
2) Proveďte měření hydrostatické odolnosti na tkaninách.
3) Proveďte výpočet hydrostatické odolnosti podle teoretických vztahů.
4) Porovnejte experiment s výpočtem a zhodnoťte nejvlivnější parametry na výpočet hydrostatické odolnosti.

Rozsah grafických prací:

Rozsah pracovní zprávy: **50 - 60 stran**

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

Seznam odborné literatury:

ČSN EN 20811 (800818) Textilie. Stanovení odolnosti proti pronikání vody. Zkouška tlakem vody. Datum schválení 1. 9. 1994, Datum účinnosti 1. 10. 1994, 8 stran formátu A4.
ŠÁMAL, Oldřich. Technická mechanika: statika. Praha: Informatorium, 2016. ISBN 978-80-7333-122-1.
KVASNICA, Jozef. Mechanika. 2. vyd. Praha: Academia, 2004. ISBN 80-200-1268-0.
CHALUPSKÝ, Jaroslav a Jiří BLAŽEK. Polyamidová vlákna. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1962.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Pavla Těšinová, Ph.D.**
Katedra hodnocení textilií

Datum zadání diplomové práce: **30. března 2016**

Termín odevzdání diplomové práce: **5. května 2017**

Technická univerzita v Liberci Fakulta textilní

L.S.

Ing. Jana Drašarová, Ph.D.
děkanka

doc. Ing. Vladimír Bajzík, Ph.D.
vedoucí katedry

V Liberci dne 12. prosince 2016

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
Fakulta textilní

Žádost o změnu termínu odevzdání závěrečné práce

Jméno a příjmení:	Bc. Markéta Šťasná
Osobní číslo:	T15000056
Studijní program:	N3957 Průmyslové inženýrství
Studijní obor:	Produktové inženýrství
Zadávající katedra:	Katedra hodnocení textilií

Žádám o změnu termínu odevzdání závěrečné práce z 5. května 2017 na 4. května 2018.

Odůvodnění žádosti: Rodinné důvody

V Liberci dne 4.5.2017 Podpis: Šťasná

Vyjádření vedoucího práce:

souhlasím Tišnovou

Vyjádření vedoucího katedry:

souhlasí

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
Fakulta textilní

Žádost o změnu termínu odevzdání závěrečné práce

Jméno a příjmení: Bc. Markéta Šťasná

Osobní číslo: T15000056

Studijní program: N3957 Průmyslové inženýrství

Studijní obor: Produktové inženýrství

Zadávající katedra: Katedra hodnocení textilií

Žádám o změnu termínu odevzdání závěrečné práce z května 2018 na prosinec 2018.

Odůvodnění žádosti: Rodinné důvody

V Liberci dne 4.5.2018 Podpis: Šťasná

Vyjádření vedoucího práce:

Souhlasím Tišnerová

Vyjádření vedoucího katedry: Souhlasím

Prohlášení

Byla jsem seznámena s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědoma povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Diplomovou práci jsem vypracovala samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé diplomové práce a konzultantem.

Současně čestně prohlašuji, že tištěná verze práce se shoduje s elektronickou verzí, vloženou do IS STAG.

Datum: 20. 8. 2018

Podpis:

Poděkování

Ráda bych poděkovala vedoucí mé práce Ing. Pavle Těšinové, Ph.D za její vstřícnost a konzultace, které mi poskytla.

Dále chci poděkovat doc. Ing. Lukášovi Čapkovi, Ph.D za poskytnutí potřebných informací a pomoc při řešení experimentální části.

V neposlední řadě bych chtěla poděkovat mé rodině, partnerovi a blízkým za podporu během mého studia.

Anotace

Cílem této diplomové práce je zjištění, zda lze výpočtem z mechaniky získat stejné výsledky jako experimentálním měřením odolnosti. V teoretické části lze nalézt charakteristiku tkanin, plátnové vazby a jejich úprav. Dále obsahuje informace ohledně tenkých kruhových desek. Praktická část zahrnuje měření hydrostatické odolnosti na vybraných tkaninách. Poté byl vybrán vhodný vzorec z oblasti mechaniky, který se svou podobností bude přibližovat zkoumanému problému a byl aplikován na tkaniny. Také byla změřena tažnost vzorků, aby bylo možné spočítat veškeré potřebné hodnoty nutné pro výpočet průhybu a nakonec bylo vše zhodnoceno.

Klíčová slova: tkaniny, hydrostatická odolnost, polyamidové hedvábí, výpočet, průhyb

Annotation

The aim of this diploma thesis is to find out whether it can be obtained from the mechanics calculation the same results as experimental resistance measurement. In the theoretical part, we can find the characteristics of fabrics, linings and their modifications. It also contains information about thin circular plates. The practical part includes measurement of hydrostatic resistance on selected fabrics. Then, a suitable formula from the field of mechanics was chosen, which with its similarity will approach the problem examined and applied to the fabrics. The elongation of the samples was also measured to calculate all the necessary values necessary for calculating the deflection and eventually everything was evaluated.

Key words: fabrics, hydrostatic resistance, polyamide silk, calculation, deflection

Obsah

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A VELIČIN ... 12
ÚVOD ... 15
TEORETICKÁ ČÁST ... 16
1 Hydrostatický tlak ... 16
1.1 Studie vyhodnocující hydrostatickou odolnost metodou konečných prvků ... 17
2 Hydrostatická odolnost ... 20
2.1 Stanovení hydrostatické odolnosti ... 20
2.1.1 Vodní sloupec ... 20
2.2 Norma měření hydrostatické odolnosti ... 21
2.2.1 Princip zkoušky ... 22
2.2.2 Přístroje pro měření vodního sloupce ... 22
2.3 Testování ... 23
2.4 Tlaková rovnice ... 23
2.5 Studie týkající se měření hydrostatické odolnosti u kompozitů ... 25
3 Tenké kruhové desky ... 28
3.1 Osově souměrný ohyb tenkých desek ... 28
3.2 Průhyb membrány ... 35
3.3 Určení maximálního průhybu ... 36
4 Tkaniny ... 38
4.1 Struktura tkanin ... 38
4.2 Provázání tkaniny ... 38
4.2.1 Plátnová vazba (P) ... 38
4.3 Typy tkanin ... 39
4.3.1 Tkaniny hedvábnického typu ... 39
4.4 Porozita tkaniny ... 40
4.5 Zaplnění tkaniny ... 42
5 Chemická vlákna a jejich dělení ... 43
5.1 Polyamidová vlákna ... 43
5.1.1 Výroba ... 44
5.1.2 Vlastnosti – obecně ... 44
5.1.3 Užitné vlastnosti ... 45

5.1.4 Použití ... 45
6 Finální úpravy textilií ... 46
6.1 Hydrofobní úprava ... 46
6.1.1 Hodnocení hydrofobní úpravy ... 47
EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST ... 49
7 Experiment ... 49
7.1 Charakteristika použitého materiálu ... 51
7.1.1 Plošná hmotnost ... 51
7.1.2 Hustota materiálu ... 55
7.2 Výchozí nastavení přístroje ... 58
7.3 Postup měření hydrostatické odolnosti ... 58
8 Výpočet ... 65
8.1 Modul pružnosti v tahu ... 65
8.2 Ohybová tuhost desky ... 66
8.3 Průhyb vzorku ... 67
8.4 Tlak z naměřené hydrostatické odolnosti ... 70
Diskuze výsledků ... 76
ZÁVĚR ... 77
SEZNAM LITERATURY ... 79
SEZNAM OBRÁZKŮ ... 83
SEZNAM TABULEK ... 85
PŘÍLOHY ... 86

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A VELIČIN

Zkratka	Význam
DCDHF	dual-core dual-hole
ČSN	česká technická norma
EN	evropská norma
QWPUs	samozhášecí zesíťovací vodou ředitelné polyuretanové tkaniny se zátěrem
FTIR	Fourierova transformace infračervenou spektroskopií
TGA	Termogravimetrická analýza
OFRP	vyztužená organická vlákna s epoxidovou matricí
PA	polyamid

Symbol	Jednotka	Název veličiny
p_h	[Pa]	hydrostatický tlak
F	[N]	síla
S	[m^2]	plocha
F_g	[N]	gravitační síla
m	[kg]	hmotnost
g	[m/s^2]	tíhové zrychlení
ρ	[kg/m^3]	hustota
V	[m^3]	objem
h	[m]	hloubka
v	[m/s]	rychlost
p	[Pa]	tlak
E_k	[J]	kinetická energie
E_p	[J]	potenciální energie

q	[N/m]	spojité zatížení
d	[m]	tloušťka textilie
l	[m]	délka
ϕ	[-]	porozita
V_p	[m^3]	objem pórů
V_c	[m^3]	celkový objem
μ	[%]	zaplnění
P_p	[-]	porozita z podílu měrných hmotností
ρ_f	[kg/m^3]	objemová měrná hmotnost vlákenného materiálu
ρ_v	[kg/m^3]	objemová měrná hmotnost tkaniny
S_p	[m^2]	plocha pórů
S_c	[m^2]	celková plocha
Z_c	[%]	celkové zakrytí
d_o	[m]	průměr osnovní nitě
D_o	[-]	dostava osnovy
d_u	[m]	průměr útkové nitě
D_u	[-]	dostava útku
W	[J]	práce
Δl	[m]	absolutní prodloužení
M	[Nm/m]	moment
σ_r	[Pa]	radiální napětí
σ_t	[Pa]	tečný napětí
τ_{rz}	[Pa]	smykový napětí
r	[m]	poloměr
z, dz	[-]	bod střední roviny

M_r	[Nm/m]	ohybový moment radiální
M_t	[Nm/m]	ohybový moment tečný
l	[m]	tloušťka
Q	[N]	příčná síla
P	[-]	součet všech vnějších zatížení
ε_r	[-]	deformace v radiálním směru
ε_t	[-]	deformace v obvodovém směru
ρ_S	[g/m^2]	plošná hmotnost
a	[m]	poloměr
σ	[Pa]	napětí v tahu
ε	[-]	poměrná deformace
l_0	[m]	původní délka
E	[Pa]	modul pružnosti v tahu
μ	[-]	Poissonovo číslo
D	[Nm]	ohybová tuhost desky
W	[m]	průhyb

ÚVOD

Studií, které se zabývají problematikou hydrostatické odolnosti, je mnoho. Nicméně současný stav problematiky není takový, aby kombinoval výpočet a měření. Zatím se všichni věnují každému zvlášť, tedy buď pouze výpočtu anebo jen měření. Hydrostatická odolnost je vlastnost týkající se odolnosti textilie vůči tlaku vody, který působí na vnější stranu textilie.

K experimentu byly použity tkaniny ze syntetických vláken, konkrétně polyamidový multifil. Jednalo se o dva druhy, kdy jedna sada vzorků byla opatřena hydrofobní úpravou a druhá sada vzorků byla bez úpravy.

Diplomová práce pojednává o spojení dvou metod dohromady. Nejprve byla změřena hydrostatická odolnost na tkaninách. Následně byl vybrán vhodný vzorec z oblasti mechaniky, jenž byl zvolen na základě geometrické podobnosti, čímž se přibližuje zkoumanému problému a v rámci práce byl aplikován na tkaniny. Nakonec byly výsledky experimentu a výpočtu porovnány a byly vyhodnoceny parametry, které nejvíce ovlivnily výpočet průhybu odpovídajícího měřené hydrostatické odolnosti. Stanovený cíl se zaměřuje na zjištění, zdali je možné výpočtem z mechaniky získat stejné výsledné hodnoty jako experimentálním měřením odolnosti.

V teoretické části práce jsou zpočátku uvedeny charakteristiky několika pojmů, které souvisejí se zvoleným výpočtem průhybu, jenž nejvíce odpovídá hydrostatické odolnosti, a jsou doplněny o odborné studie, které byly daným směrem vedeny. Dále je zaměřeno na charakteristiku použitého materiálu od výroby přes strukturu až k důležitým vlastnostem. Poté jsou řešeny druhy finálních úprav textilií.

Experimentální část charakterizuje měřený materiál a použitý přístroj. Vzorky jsou měřeny na zařízení Hydrostatic Head Tester M018. Výsledky měření jsou zaznamenány v tabulkách a zaneseny do grafů. V další části jsou řešeny různé výpočty, ať už plošná hmotnost, hustota nebo jiné dílčí výpočty vztahující se k finálnímu výpočtu průhybu materiálu. Každý výpočet je představován vzorcem, tabulkami s výsledky a grafy. Vše je doplněno o výsledky popisné statistiky, které jsou uvedeny v přílohách. Nakonec jsou naměřené hodnoty porovnány s výsledky výpočtu a detailně zhodnoceny.

TEORETICKÁ ČÁST

1 Hydrostatický tlak

Hydrostatický tlak je definován jako tlak v kapalinách zapříčiněný tíhovou silou kapaliny [1]. Obvykle se udává v závislosti na hloubce *h* [2].

Zde je zobrazeno odvození základního vztahu pro hydrostatický tlak [1]:

$$p_h = \frac{F}{S} = \frac{F_G}{S} = \frac{m \cdot g}{S} = \frac{\rho \cdot V \cdot g}{S} = \frac{\rho \cdot S \cdot h \cdot g}{S} = h \cdot \rho \cdot g \qquad (1)$$

Z toho vyplývá základní vztah pro hydrostatický tlak [1, 2]:

$$p_h = h \cdot \rho \cdot g \qquad (2)$$

Kde: p_h ..... hydrostatický tlak [Pa]
F ..... síla [N]
S ..... plocha [m^2]
F_G .... gravitační síla [N]
m ..... hmotnost [kg]
g ..... tíhové zrychlení - g = 9,81 [m/s^2]
ρ ..... hustota kapaliny [kg/m^3]
V ..... objem [m^3]
h ..... hloubka kapaliny pod volným povrchem [m]

S rostoucí hloubkou se zvyšuje hodnota hydrostatického tlaku [1].

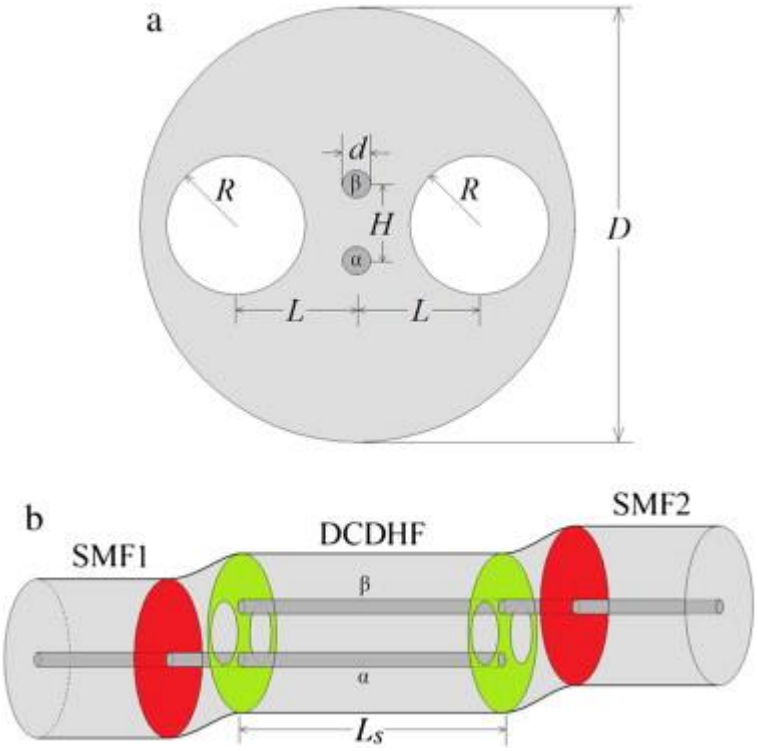
Řada studií se zabývá výpočtem hydrostatické odolnosti a jejím měřením pomocí optických vláken a jiných senzorů nebo prostřednictvím různých metod, ať už v tlakových nádobách nebo na jiných měřících přístrojích. K měření často využívají konstrukční materiály.

1.1 Studie vyhodnocující hydrostatickou odolnost metodou konečných prvků

Xue [3] svou prací představuje účinky hydrostatického tlaku na měření deformací prostřednictvím snímaného distribuovaného systému optických vláken. Laboratorní experimenty na napětí kovové desky a válcového vzorku pískovce byly provedeny za hydrostatického tlaku pomocí systému, jenž měří napětí dle Brillouin a Rayleigh frekvenčních posunů a rozptyl v optickém vláknu spolu s běžnými tenzometry. Kovové plechy byly vystaveny i atmosférickému tlaku. Vzorky byly umístěny do tlakové nádoby, která byla naplněna vodou. Optická vlákna a tenzometry byly připevněny na pískovec a tlak byl zvyšován až do 12 MPa [3].

Výsledky měření deformací plechů za atmosférického tlaku a hydrostatických tlakových poměrů umožnily vznik nové metody pro stanovení Brillouinova a Rayleighova frekvenčního posunu v podobě deformačních koeficientů. Dále ukazují, že dvě různé metody sdílejí stejnou přesnost pro měření napětí. Tyto koeficienty, úspěšně aplikovaná experimentální metoda na měření napětí pískovce pod statickým tlakem a sledování konečné deformace materiálu při rostoucím tlaku vyvolaného tekutinou, silně naznačují užitečnost měření napětí snímaného distribuovaným systémem optického vlákna [3].

Chen [4] se ve své práci věnuje návrhu nového dvou-jádrového dvou-dutinného vlákna (dual-core dual-hole → DCDHF) pro snímání hydrostatického tlaku (obr. 1). Princip činnosti snímače tlaku na bázi DCDHF lze chápat jako snímání vlnové délky a spojku režimu mezi dvěma jádry vláken. Spojovací systém mezi těmito dvěma jádry vláken v DCDHF je citlivý na změny indexu vyvolané tlakem, což poskytuje detekci tlaku DCDHF. Tato vlákna byla vložena do tlakové nádoby. Dále byly prozkoumány DCDHFs s různou strukturou parametrů pro snímání tlaku [4].



Obr. 1 – (a) Průřez navrhovaného DCDHF a (b) Schéma snímače tlaku na bázi DCDHF D: vnější průměr DCDHF; d: průměr ze dvou jader vlákna; H: vzdálenost od středu ke středu mezi oběma jádry vlákna; R: poloměr dvou velkých vzduchových otvorů; L: vzdálenost mezi vzduchovým otvorem a středem DCDHF; L_S: délka DCDHF; SMF: monofilové vlákno; výsledné hodnoty v desítkách μm [4]

Simulace ukázaly, že můžeme dosáhnout snímače tlaku měřením posunu vlnové délky výstupního spektra na jednom jádru vlákna na výstupní straně DCDHF s pevnou délkou, je-li tlak snímán světlem. Tlakové senzory založené na DCDHFs s různými parametry struktury byly zkoumány, což naznačuje, že optimalizovaného snímače tlaku na bázi DSCHF může být dosaženo na základě optimalizovaného designu DCDHF. Odezva materiálu byla vyhodnocena pouze výpočtem [4].

Bock [5] se ve své práci zabývá snímačem optických vláken s lineárním posunem, který je vyvinut pro měření radiální deformace ve volný aktivní element snímače modulu pod vysokým hydrostatickým tlakem. Vlákna byla zatavena tak, aby se to dalo aplikovat do různých systémů, kde se to bude měřit [5].

Vyvinuli a zkoumali výkonnost diferenciálu snímače optických vláken s lineárním posunem v kombinaci s pružným volným aktivním válcem pro měření vysokých hydrostatických tlaků o velikosti až 100 MPa. Užití tavených mikročoček přijímající vlákna se ukázalo být velmi efektivní pro vstřikování více světla ze svítícího vlákna a zvyšování citlivosti lineárního posunu diferenciálního snímače. Opakovatelností testů byla získána přesnost, která vyšla dost dobrá. Také bylo odhaleno, že odezva senzoru bude prakticky lineární [5].

McCarney [6] ve své práci vysvětluje, že technika modelování dokáže předvídat, jaké bude konstrukční provedení tkaniny za předpokladu, že bude vystavena hydrostatickému tlaku. Základ této techniky spočívá v datové struktuře, která je uzpůsobena k přeformulování mnohotvárných 2D modelů do individuální 3D sestavy. Zároveň je citlivá na orientaci 2D modelu vůči osnově a struktuře útku ve tkanině. V podstatě dochází k využití výpočtu strojírenského charakteru, jenž je už aplikován na textil [6].

Proces modelování se zakládá na hodnocení dvou složek energií – energie hmoty a tlakové energie. Vzhledem k hydrostatické energii došlo ke zjištění, že je potřeba užití minimální energie za předpokladu, že jsou obě složky energie v rovnováze. Mimo to síla, jež účinkuje na každý volný uzel hydrostatickým tlakem, zastavuje konečné síly proudící z přichycených trojúhelníků v důsledku namáhání tkaniny. Lze tedy očekávat, že tuto techniku bude možné využít pro odhad 2D předlohy vycházející z již sestavených oděvních konstrukcí [6].

2 Hydrostatická odolnost

Hydrostatická odolnost je definována jako odolnost textilie vůči tlaku vody působící na vnější stranu textilie. Zmiňovaný tlak je obvykle vyjadřován výškou vodního sloupce v metrech. Pokud půjde o vysoce odolnou textilii, tak by neměla vypovědět jakýkoliv příznak průsaku vody za podmínek, že tlaky se budou pohybovat pod 200 cm výšky vodního sloupce [7].

2.1 Stanovení hydrostatické odolnosti

Co se týká polopropustných textilií, tak jsou pouze do určité míry nepropustné pro kapalnou vlhkost. Oproti tomu u hustě dostavených mikrovlákenných tkanin je možné zaznamenat nepropustnost až do hydrostatického tlaku v rozmezí hodnot 0,5 - 1 m, což není dostatečné pro zadržení vlhkosti pod popruhy batohů či jiných míst, kde dochází ke kooperaci tlaku odvozeného tzv. klínovým efektem. Vysoké tlaky se vytváří též při kompresi vlhké textilie, jako např. během pokleknutí (až 15 m vodního sloupce) [7].

2.1.1 Vodní sloupec

Jedná se o údaj, jehož hodnota nás informuje o možnostech materiálu vzdorovat tlaku vody. Hodnota vodního sloupce je převážně vyjadřována v milimetrech. Odolnost materiálu závisí na velikosti naměřené hodnoty. Čím je číslo vyšší, tím je materiál odolnější a vykazuje vyšší nepromokavost. Měření týkající se této odolnosti se provádí zpravidla v laboratorních podmínkách [8].

2.2 Norma měření hydrostatické odolnosti

- ✓ **ČSN EN 20811 - Textilie. Stanovení odolnosti proti pronikání vody - zkouška tlakem vody**

Tato norma je určena pro vymezení odolnosti textilií proti pronikání vody během vlivu tlaku vody. Postup je stanoven především pro textilie s vyšší dostavou, např. pro lodní plachty, plachty na auta a pro plachty na výrobu stanu [9].

Výška vodního sloupce, jenž textilie zvládne zadržet, formuluje trvanlivost plošné textilie proti pronikání vody. V běžném ovzduší je jedna strana vzorku vystavována stále se zvyšujícímu tlaku vody tak dlouho, dokud se nedospěje na třech místech vzorku k proniknutí vody. Tlak, při němž voda prostoupí plošnou textilií ve třetím místě, se zapisuje. Účinek tlaku vody na vzorek může být zespodu či shora. Výsledek zkoušky rovnou vystihuje odolnost výrobků z plošných textilií proti krátkodobému anebo střednědobému působení tlaku vody [9].

- Důležitá doporučení

Testovací vzorek plošné textilie je potřeba upnout tak, aby [9]:

a) byl vodorovný, a co nejméně se vydouval;
b) na plochu 100 cm^2 působil stále rostoucí tlak vody zespodu nebo shora;
c) u upínacích přírub v průběhu zkoušky neprosakovala voda;
d) neprokluzoval v upínacích přírubách;
e) u sevřeného okraje docházelo k co nejmenšímu průniku vody.

- využívaná voda musí být destilovaná či úplně deionizovaná mající teplotu (20 ±2) °C anebo (27 ±2) °C

- rychlost zvyšování tlaku vody se musí nacházet v rozmezí (10 ±0,5) nebo (60 ±3) cm vodního sloupce za minutu

- manometr by měl poskytovat odečítání tlaku s přesností na 10 mm vodního sloupce

Za samozřejmost lze považovat nutnost klimatizování zkušebních vzorků [9].

2.2.1 Princip zkoušky

Pro jakýkoliv zkušební vzorek, jenž bude podroben zkoušce, se aplikuje nová destilovaná voda. Důležité je odstranit vodu z horních ploch upínacího zařízení. Připravený zkušební vzorek, jenž byl předem klimatizován, se upne na zkušební hlavu takovým způsobem, aby došlo k doteku povrchu vzorku s povrchem vody. Během upínání musí být zabráněno tomu, aby voda prostoupila zkušebním vzorkem. Na takto nachystaný, konkrétně upnutý zkušební vzorek dochází k okamžitému působení zvyšujícího se tlaku vody. Neustálým pozorováním se snažíme vysledovat, kdy započne skrz zkušební vzorek prosakovat voda [9].

V okamžiku proniknutí prvních třech kapek vody přes zkoušený vzorek textilie, při porušení vzorku anebo v případě poklesu tlaku je měření ukončeno a výsledný tlak je zaznamenán v centimetrech vodního sloupce [9].

2.2.2 Přístroje pro měření vodního sloupce

Současný trh nabízí velké množství přístrojů, které vykazují jisté nedostatky. Mezi zařízení, jež se vyskytují na trhu, patří především evropské přístroje naplňující obsah normy ČSN EN 20811. Pokud jde o určitá zařízení, můžeme uvést například přístroj švýcarské společnosti TEXTEST INSTRUMENT zvaný Automatic Hydrostatic Head Tester FX 3000 HYDROTESTER IV, který je vybaven automatickou detekcí kapek. Při jeho použití není potřeba výskyt osoby, kdo měření provádí [10]. Samozřejmě lze na trhu objevit i různé druhy produktů z Číny, například zařízení KJ-3093 Hydrostatic Head Tester od společnosti KEJIAN [11].

V této práci bude pro měření využito přístroje Hydrostatic Head Tester M018 (obr. 2), jehož výrobcem je anglická firma SDL ATLAS [12]. Tento přístroj lze nalézt na Katedře hodnocení textilií TUL.

Obr. 2 – Přístroj Hydrostatic Head Tester M018 [13]

2.3 Testování

Testování závisí na režimu dynamické zkoušky, kdy je vzorek vystaven stále rostoucímu tlaku vody na jedné straně, do okamžiku prosáknutí vody na třech místech. Výsledkem testu je tzv. penetrační tlak. Jedná se o tlak, při němž voda prostoupí vzorkem na třetím místě. Dynamický test je vesměs respektovanou metodou pro stanovení odolnosti textilií proti pronikání vody [12].

2.4 Tlaková rovnice

Tlaková rovnice může být vyjádřena dvěma způsoby, a to prostřednictvím:

- Bernoulliho rovnice
- Tlaková potenciální energie kapaliny

Bernoulliho rovnice vyjadřuje zákon zachování energie pro proudění ideální kapaliny ve vodorovném potrubí [14].

Vztah: $$\frac{1}{2}\,\rho v_1^2 + \,p_1 = \frac{1}{2}\,\rho v_2^2 + \,p_2 \rightarrow \boldsymbol{\frac{1}{2}\,\rho v^2 + p = konst.}} \quad (3)$$

Vychází ze vztahu: $$E_k + \,E_p = konst. \quad (4)$$

Kinetická energie $E_k = \frac{1}{2} mv^2 = \frac{1}{2} \rho V v^2$ (5)

Potenciální energie $E_p = mgh = pV$ (6)

Kde: ρ ..... hustota kapaliny [kg/m^3]

v ..... rychlost [m/s]

p ..... tlak [Pa]

E_k .... kinetická energie [J]

E_p .... potenciální energie [J]

m ..... hmotnost [kg]

V ..... objem [m^3]

g ..... tíhové zrychlení - g = 9,81 [m/s^2]

h ..... hloubka [m]

Velikost **tlakové potenciální energie (síly) kapaliny** zjistíme tak, necháme-li tlakovou sílu *F* působit na píst. Pokud se velikost *F* nemění, pak posuneme-li píst o obsahu *S* vodorovným potrubím o délku *l*, vykoná práci $W = F \cdot l$ [15].

Síla je vyvolána tlakem, proto platí $F = p \cdot S$ (7)

Po dosazení do vzorce $W = p \cdot S \cdot l$ (8)

Objem trubice, o který se píst posunul $V = S \cdot l$ (9)

Z čehož vyplývá $W = p \cdot V$ (10)

Výsledný vztah vyjadřuje tlakovou potenciální energii kapaliny:

$$E_p = p \cdot V \quad (11)$$

Jedná se o výchozí vztahy, které využijeme pro vytvoření zamýšlené finální rovnice, která je cílem této práce [15].

Některé práce se již zabývaly měřením hydrostatické odolnosti textilií a byly aplikovány na různé materiály. Například Lečbychová Jitka [16] se zabývala analýzou standardní metody pro hodnocení hydrostatické odolnosti textilií u polopropustných membrán a povrstvené tkaniny. Dále Drahokoupilová Andrea [17] se ve své práci věnovala hodnocení odolnosti proti pronikání vody u vrchového materiálu tzv. třetí vrstvy. Také Ráslová Marcela [18] se zaměřila na hydrostatickou odolnost textilií, konkrétně používaných pro sport.

Feng [19] se svou prací zaměřil na přípravu řady modifikací samozhášecích zesíťovacích vodou ředitelných polyuretanových tkanin se zátěrem (QWPUs). Byly zkoumány struktury, výkonnostní emulze, filmové a aplikační vlastnosti připravených OWPUs. Nejprve byl OWPUs úspěšně syntetizován a všechny emulze byly dobře stabilizovány podle výsledků Fourierovy transformace infračervenou spektroskopií (FTIR), velikosti částic a Zeta potenciálu. Poté byla studována tepelná stabilita a tepelná degradace OWPUs prostřednictvím Termogravimetrické analýzy (TGA) [19].

Došlo se k závěru, že začlenění samozhášecího ExolitOP550 činí velikosti částic disperzí OWPU větší a výsledkem Zeta potenciálu lze odvodit, že všechny polyuretanové disperze jsou dobře stabilizovány. TGA bylo zjištěno, že ExolitOP550 může katalyzovat tvorbu ochranné vrstvy a uvolnění nového nehořlavého plynu. Nakonec potažené textilie ukázaly vynikající výkon v odolnosti hydrostatického tlaku a samozhášecích vlastnostech ve srovnání s nepotaženými protějšky. I když se hořlavost textilních vzorků OWPU zlepšovala, tak hydrostatická odolnost se s rostoucím podílem ExolitOP550 snižovala. Přesto je to stále poměrně dobrá odolnost [19].

2.5 Studie týkající se měření hydrostatické odolnosti u kompozitů

Zinoviev a Tsvetkov [20] ve své práci zkoumali pevnost a deformační vlastnosti jednosměrně vyztužených organických vláken s epoxidovou matricí (OFRP) pod hydrostatickým tlakem. Použity byly vlákna podobná kevlaru a epoxidová pryskyřice v různých strukturách. Testovány byly trubkové a kruhové vzorky. Trubkové vzorky byly testovány v tahu a tlaku, kdežto kruhové vzorky byly testovány pod napětím se zpola-diskového zařízení [20].

Elektrický odpor tenzometrů byl použit k měření napětí v trubkových a kruhových vzorcích. Šest tenzometrů bylo přilepeno k trubkovému vzorku s epoxidovou pryskyřicí. Dva z nich byly v obvodovém směru, dva byly v axiálním směru a dva zbývající byly pod úhlem 45° do přímky. Každý kruhový vzorek měl čtyři tenzometry, kdy dva z nich byly ve směru výztuže, zatímco ostatní dva byly v příčném směru [20].

Lze vyvodit následující závěry a to, že zatížení a uvolnění následujícího jednosměrného OFRP s hydrostatickým tlakem má za následek zbytkové napětí, které je pozitivní podél vláken a negativní v příčném směru. Příčná pevnost v tahu a pevnosti v tlaku zvýší jednosměrné OFRP s rostoucím tlakem. Podélná pevnost v tahu jednosměrného OFRP klesá se zvyšující se tlakem. Zóna selhání se stává místní pod vysokým tlakem. Příčný modul pružnosti materiálu roste se zvyšujícím se tlakem, naproti tomu podélný modul pružnosti klesá. Výsledky těchto zkoušek poukazují na to, že pevnostní vlastnosti jednosměrných kompozitů a jejich způsoby porušení silně závisí na velikosti hydrostatického tlaku [20].

Pae [21] svou prací dává nový pohled na dřívější práce týkající se experimentálního zkoumání vlivu hydrostatického tlaku na mechanické chování a vlastnosti jednosměrných, laminovaných, grafitových vláken v epoxidové matrice tlustých kompozitů. Směr vláken byl, v daném pořadí, 0°, 45° a 90° pro tlakové zkušební vzorky a 0°, 45° a 90° pro vzorky smyku. Hydrostatický tlak vyvolává velmi významné, často dramatické změny v tlaku a smykovém napětí / chování při napětí kompozitů a následně i v pružnosti, poddajnosti, deformaci a lomových vlastnostech [21].

Vlastnosti ve smyku materiálu matrice, která je sama o sobě ovlivněna podle použitého hydrostatického tlaku, vlivem značně kompozitního chování, byly silně ovlivněny uspořádáním výztuže. Matrice přenáší napětí na výztuže, jež ho mají absorbovat, aby nedošlo k celkovému porušení. Modul pružnosti ve smyku, smykové namáhání při lomu a lomové napětí se vše v matrici zvyšovalo s rostoucím tlakem [21].

Avena a Bunsell [22] se svou prací zaměřili na simulaci ponorných zkoušek za vysokých hydrostatických tlaků při aplikaci skleněných vláken vyztužených epoxidovou pryskyřicí, jež byly ponořeny ve velkých hloubkách vody. Byl studován účinek těchto vysokých tlaků na absorpci vody a odhaleny případné změny ve vlastnostech v důsledku tohoto prostředí [22].

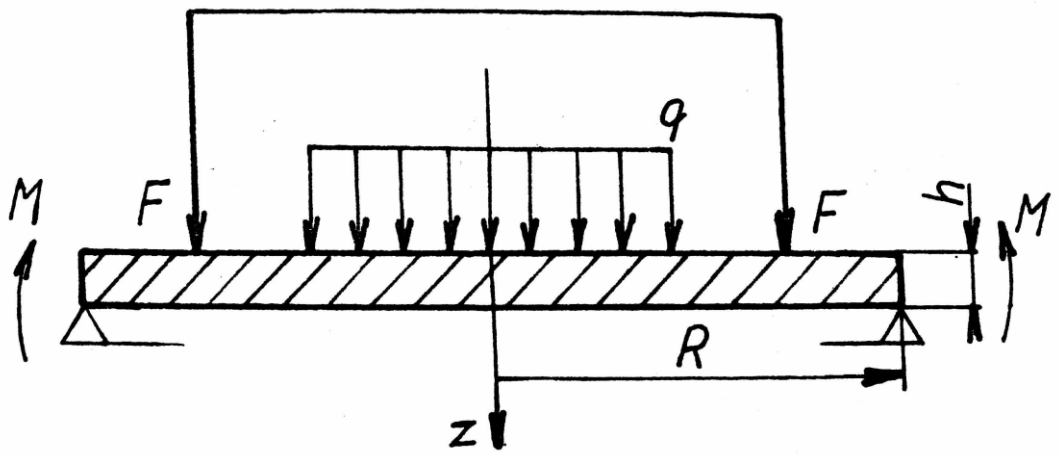
Zkoumány byly dva typy kompozitních materiálů, které se liší pouze v přítomnosti nebo nepřítomnosti ochranné vrstvy (propojené činidlo) na skleněná vlákna. Zjistili, že absence ochranné vrstvy významně zvýšila absorpci vody ve všech tlacích. Koeficient vodivosti nechráněné vrstvy vláknitého kompozitu se snižuje s rostoucím tlakem, zatímco nebyla pozorována žádná změna, když byla ochranná vrstva přítomna. Mírný pokles v příjmu vody byl vypozorován se zvyšujícím se hydrostatickým tlakem, jenž byl indikován v uzavřených prostorech, v nichž může být voda podaná za nízkých tlaků. Změny ve vlastnostech byly spojeny s nasákavostí a vysoký hydrostatický tlak nebyl podstatný [22].

3 Tenké kruhové desky

Vzhledem k tomu, že se technický problém řešený v experimentu nejvíce blíží kruhové desce, která je zatížená vnějším tlakem, tak byla práce orientována na teorii tenkých ohýbaných desek a uvidí se, jestli se bude teorie shodovat s experimentem.

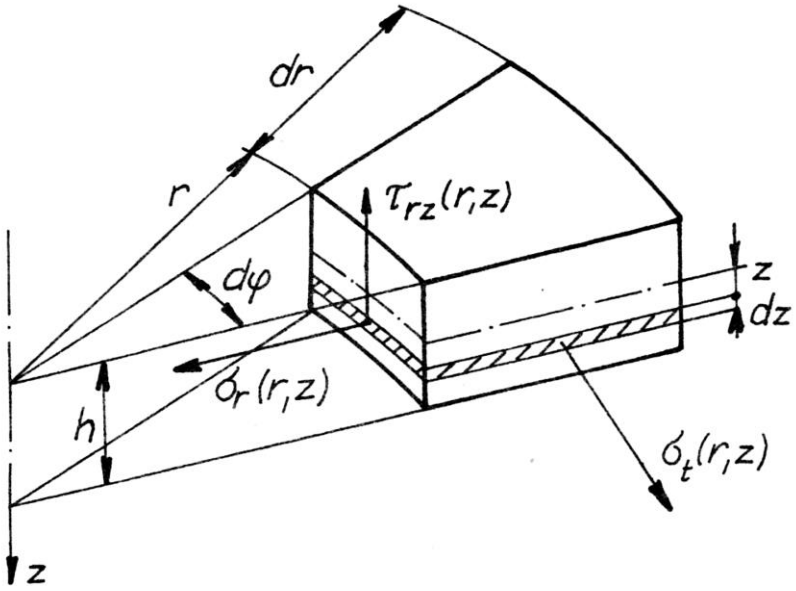
3.1 Osově souměrný ohyb tenkých desek

V praxi jsou mnohé situace, kdy je možné narazit na součásti, které mají tvar tenkých kruhových desek. Jedná se například o plochá dna nádob, víka, clonky apod. Tyto desky jsou zatíženy normálnými silami k ploše desky, jež jsou rozloženy souměrně vzhledem k ose desky. Dále jsou vymezeny případy, při kterých je tloušťka desky *h* malá v porovnání s jejím průměrem *d* a zároveň je průhyb desky *W* malý v komparaci s její tloušťkou. Lze se setkat s třemi druhy zatížení desky – silou *F [N/M]*, momentem *M [Nm/m]* a spojitým zatížením *q* [N/m^2], kde síla a moment jsou rozloženy na jednotku délky kružnice, na niž mají vliv (obr. 3) [23].



Obr. 3 – Možné případy zatížení osově symetrické ohýbané desky [23]

Co se týká stanovení deformace a napětí při ohybu osově souměrných tenkých desek, tak se předpokládá, že při zvoleném druhu zatížení je dosaženo pouze ohybu desky, aniž by došlo k jejímu roztažení. Z toho vyplývá, že v desce při ohybu existuje rovina, v níž nedochází ke zrodu normálných napětí. Tato rovina je pojmenována jako střední rovina desky (podoba s neutrálnou rovinou při ohybu přímých tyčí). Ve vrstvách desky, které jsou rovnoběžné se střední rovinou, je původ rovinné napjatosti ($\sigma_z = 0$) s normálnými napětími σ_r a σ_t, jež je definována jako funkce poloměru r a vzdálenosti z od střední roviny. Ve válcových řezech poté dochází ke vzniku smykového napětí τ_{rz}, jehož hodnota je obvykle v pevnostních výpočtech zanedbávána (obr. 4) [23].



Obr. 4 – Rovnováha myšleného válcového řezu desky [23]

Kde: h ..... tloušťka desky (konstanta)

r ..... v jaké vzdálenosti od osy desky byl proveden řez

dr ..... malý přírůstek pro označení diferenciální rovnice

dφ ..... výseč, aby to bylo jednoznačně definované

σ_r ..... radiální napětí

σ_t ..... tečný napětí

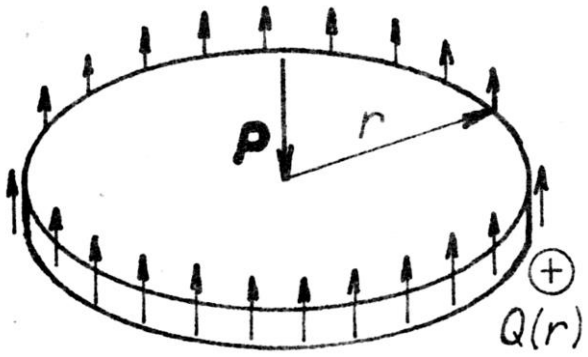
τ_{rz} ..... smykový napětí

z, dz ... bod střední roviny

Je-li napětí po tloušťce desky h integrováno, získáváme vnitřní účinky – ohybové momenty M_r a M_t spolu s příčnou (posouvající) sílou Q, vztaženy na jednotku délky souřadnice [23]:

$$M_r = \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \sigma_r(r,z) z dz \ , \quad M_t = \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \sigma_t(r,z) z dz \ , \quad Q = \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \tau_{rz}(r,z) dz \qquad (12)$$

Příčnou sílu *Q(r)* lze určit z podmínky rovnováhy týkající se části desky, která je oddělena myšleným řezem o poloměru (obr. 5) [23]:

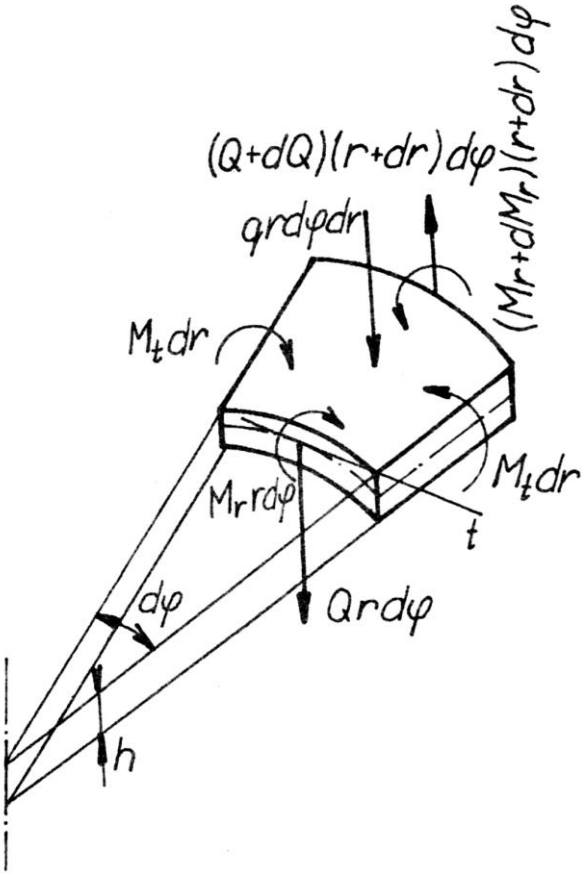


Obr. 5 – Znázornění obvodové síly Q(r) v myšleném řezu [23]

$$2\pi r \cdot Q(r) = P \qquad (13)$$

Kde *P* znamená součet všech vnějších zatížení, která mají vliv na oddělenou část desky. Příčná síla *Q* je považována za kladnou, působí-li na vnitřní oddělenou část desky pouze směrem vzhůru (obr. 5) [23].

Dále je nezbytné vyšetřit rovnováhu elementu desky (obr. 6). Na povrchu desky účinkuje spojité zatížení *q*, kdy je výsledná síla od vnějšího zatížení definována vzorcem $qrd\varphi dr$. Pak také mají na element vliv výsledné vnitřní síly a momenty, což je vyobrazeno na obr. 6 [23].



Obr. 6 – Znázornění radiálních a tečných momentů v myšleném řezu desky [23]

Z předpokladu rovnováhy do svislého směru

$$Qrd\varphi + qrd\varphi dr - (Q + dQ) \cdot (r + dr)d\varphi = 0 \tag{14}$$

je úpravou získáno $$\frac{d}{dr}(Qr) = qr \tag{15}$$

Z momentové podmínky k tečně *t* ke střednici

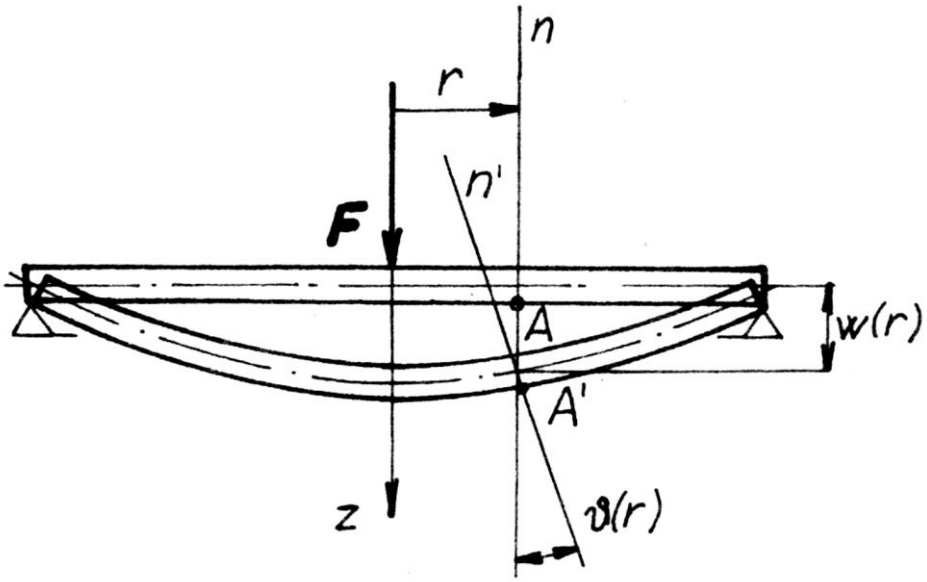
$$(M_r + dM_r) \cdot (r + dr)d\varphi + (Q + dQ) \cdot (r + dr)d\varphi dr -$$
$$-qrd\varphi dr \cdot \frac{dr}{2} - M_t dr d\varphi - M_r r d\varphi = 0 \tag{16}$$

Po úpravě a následném dosazení za q_r z rovnice (16) dostaneme

$$M_r + r \cdot \frac{dM_r}{dr} - M_t = -Qr \tag{17}$$

Nicméně podmínky rovnováhy nejsou k určení vnitřních sil dostačující, a proto jsou ke stanovení napjatosti potřeba ještě deformační podmínky [23].

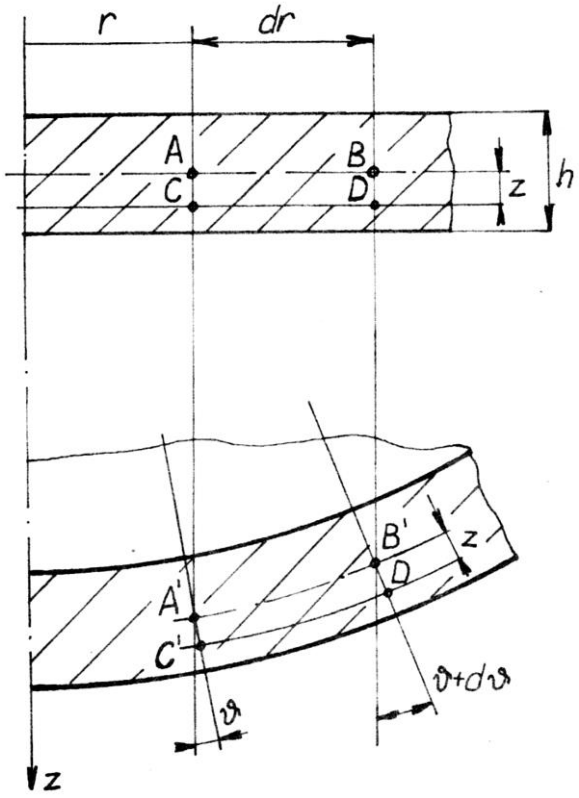
Lze očekávat, že jsou body střední roviny při průhybu desky posouvány pouze ve směru osy z (obr. 7) [23].



Obr. 7 – Vyznačení průhybu desky a sklonu ohybové roviny [23]

Dále se domnívejme, že body desky ležící před deformací na přímce, jež je kolmá ke střední rovině, budou i po deformaci vyskytovat na normále ke střední rovině. Normála ke střední rovině je v libovolném bodě pootáčena o úhel $\vartheta_{(r)}$, setrvává v přímém stavu a vždy kolmá ke střední rovině. Zároveň se z válcových řezů vlivem deformace stávají řezy kuželové. Jedná se o tzv. Kirchhoffovu hypotézu, která je obdobou Bernoulliovy hypotézy týkající se situace při ohybu přímých tyčí [23].

Nyní jsou určovány poměrné deformace ε_t a ε_r v obvodovém a radiálním směru nacházející se v rovině odlehlé o z od střední roviny (obr. 8) [23].



Obr. 8 – Schéma určené pro výpočet radiální a tečné deformace [23]

Poměrné prodloužení v radiálním směru je rovno $\varepsilon_r = \frac{\overline{C'D'}-\overline{CD}}{\overline{CD}} = \frac{(dr+zd\vartheta)-dr}{dr}$,

po úpravě $$\varepsilon_r = z \cdot \frac{d\vartheta}{dr} \tag{18}$$

Poměrné prodloužení v obvodovém směru je určeno ze změny délky kružnice, která prochází bodem *C*:

$$\varepsilon_t = \frac{2\pi(r+z\vartheta)-2\pi r}{2\pi r},$$

po úpravě $$\varepsilon_t = z\frac{\vartheta}{r} \tag{19}$$

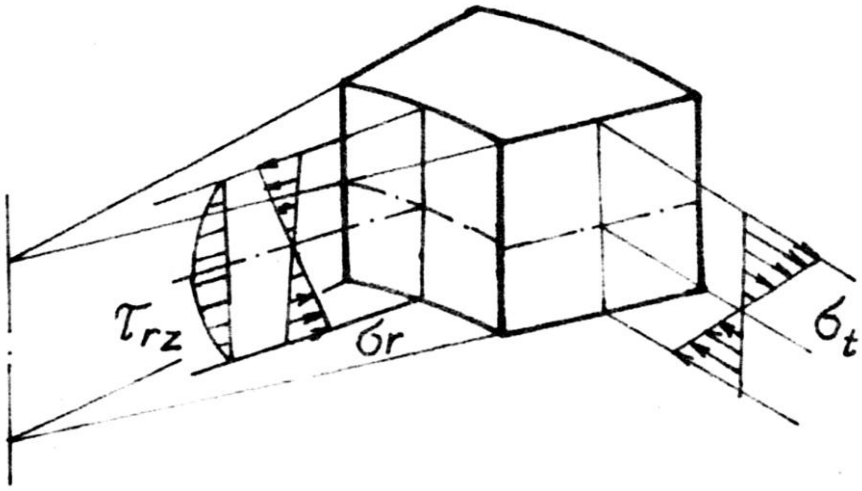
Ze vztahů (18 a 19) je možné formulovat první a druhou křivost desky ve tvaru

$$\frac{1}{r_1} = \frac{d\vartheta}{dr} \quad , \quad \frac{1}{r_2} = \frac{\vartheta}{r} \tag{20}$$

Z Hookova zákona pro dvouosou napjatost lze dostat po dosazení za ε_t a ε_r

$$\sigma_r = \frac{Ez}{1-\mu^2} \cdot \left(\frac{d\vartheta}{dr} + \mu \cdot \frac{\vartheta}{r}\right), \quad \sigma_t = \frac{Ez}{1-\mu^2} \cdot \left(\frac{\vartheta}{r} + \mu \cdot \frac{d\vartheta}{dr}\right) \tag{21}$$

Napětí jsou tedy lineární funkcí souřadnic z a nabývají maximálních hodnot na povrchu desky $\left(z = \pm\frac{h}{2}\right)$ (obr. 9). Tečná napětí τ_{rz} vykazují parabolický průběh a ve srovnání s σ_t a σ_r jsou malá [23].



Obr. 9 – Znázornění napjatosti na myšleném řezu desky [23]

Pakliže je dosazeno ze vztahů pro napětí (21) do rovnice (12), je získána závislost vnitřních sil na úhlu natočení normály [23]:

$$M_r = D \cdot \left(\frac{d\vartheta}{dr} + \mu \cdot \frac{\vartheta}{r}\right), \quad M_t = D \cdot \left(\frac{\vartheta}{r} + \mu \cdot \frac{d\vartheta}{dr}\right) \tag{22}$$

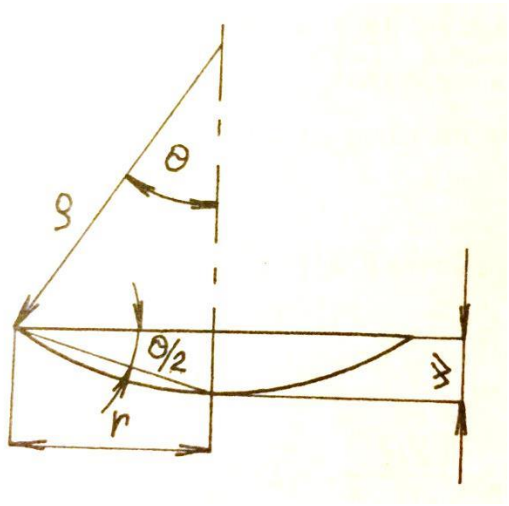
kde $$D = \frac{Eh^3}{12 \cdot (1-\mu^2)} \tag{23}$$

je tzv. **ohybová tuhost desky** [23].

3.2 Průhyb membrány

Membrána je tenká deska mající nulovou ohybovou tuhost, u které jsou napětí rovnoměrně rozčleněna po tloušťce. Pro výpočet maximálního průhybu W kruhové membrány je nezbytné znát její poloměr r a tloušťku h, na kterou je účinkováno rovnoměrným tlakem p. Toto řešení se opírá o předpoklad, že tvar membrány po deformaci vytváří kruhový povrch [24].

Zároveň lze říci, že poměrné prodloužení membrány v obou hlavních směrech (mediánový a obvodový) je totožné (obr. 10) [24].



Obr. 10 – Prohnutá membrána [24]

Pro výpočet maximálního průhybu W membrány zní rovnice takto [24]:

$$W = \frac{3}{16} \cdot (1 - \mu^2) \cdot \frac{p}{E} \cdot \frac{a^4}{h^3} \tag{24}$$

Kde: W .... průhyb [m]

μ ..... Poissonovo číslo [-]

p ..... tlak [Pa]

E ..... modul pružnosti v tahu [Pa]

a ..... poloměr [m]

h ..... tloušťka [m]

3.3 Určení maximálního průhybu

Maximální průhyb lze určit použitím této rovnice, z níž po všech úpravách vznikne finální výpočet potřebný pro zjištění maximálního průhybu tenké kruhové desky, ale v tomto případě se ho následně pokusíme aplikovat na zkoušený materiál, tedy tkaninu plátnové vazby [25].

$$2\pi r \cdot Q - p\pi r^2 = \vartheta\,, \quad Q(r) = \frac{p \cdot r}{2} \tag{25}$$

z toho vyplývá $$\frac{d}{dr} \cdot \left[\frac{1}{r} \cdot \frac{d}{dr} \cdot (r \cdot \vartheta)\right] = -\frac{p \cdot r}{2D} \tag{26}$$

následně $$\frac{1}{r} \cdot \frac{d}{dr} \cdot (r \cdot \vartheta) = -\frac{p}{2D} \cdot \left(\frac{r^2}{2} + c_1\right)$$

$$\frac{d}{dr} \cdot (r \cdot \vartheta) = -\frac{p}{2D} \cdot \left(\frac{r^3}{2} + c_1 \cdot r\right)$$

$$r \cdot \vartheta = -\frac{p}{2D} \cdot \left(\frac{r^4}{8} + c_1 \cdot \frac{r^2}{2} + c_2\right)$$

$$\vartheta = -\frac{p}{2D} \cdot \left(\frac{r^3}{8} + c_1 \cdot \frac{r}{2} + \frac{c_2}{r}\right) \tag{27}$$

z čehož plynou okrajové podmínky [25]:

1) $\vartheta(0) = 0 \rightarrow c_2 = 0$

2) $\vartheta(a) = 0$

dále $$0 = -\frac{p}{2D} \cdot \left(\frac{a^3}{8} + c_1 \cdot \frac{a}{2}\right) \rightarrow c_1 = -\frac{a^2}{4} \tag{28}$$

po zkrácení $\vartheta(r) = -\frac{p}{2D} \cdot (r^3 - a^2 r \ldots.)$

$$w(r) = +\frac{p}{16D} \cdot \left(\frac{r^4}{4} - a^2 \cdot \frac{r^2}{2} + c_3\right) \tag{29}$$

kdy okrajové podmínky jsou [25]: 3) $w(a) = \vartheta \rightarrow c_3 = \frac{a^4}{4}$

následně

$$w(r) = \frac{p}{64D} \cdot (r^4 - 2a^2r^2 + a^2) \tag{30}$$

$$w(\max) = w(0) = \frac{p \cdot a^4}{64D} \tag{31}$$

4 Tkaniny

Přehled základních informací o tkaninách, jelikož se s nimi bude dále pracovat.

4.1 Struktura tkanin

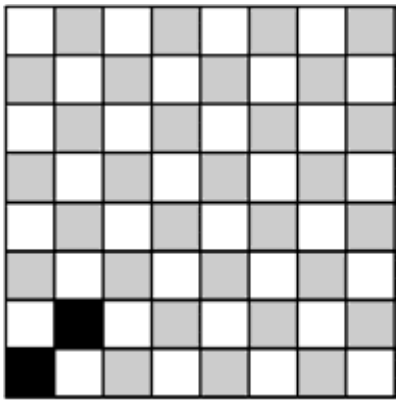
Tkanina je plošný textilní útvar složený ze dvou vzájemně provázaných soustav nití. Ve výjimečných případech se může jednat i o více nitné soustavy např. triaxiální tkanina. Soustavy nití jsou tvořeny osnovou a útkem. Osnova se nachází ve směru podélném neboli ve směru výroby tkaniny a označuje se indexem 'o'. Útková nit je situována ve směru příčném, což je kolmo ke směru výroby tkaniny a značí se indexem 'u'. Obě soustavy jsou na sebe vzájemně kolmé a jsou propojeny v jisté vazbě, čímž vytváří tkaninu (obecně tzv. plošnou textilii) [26].

4.2 Provázání tkaniny

Provázání tkaniny je tvořeno vaznými body, kdy se jedná o místo překřížení osnovní a útkové nitě. Na základě druhu vazného bodu, buď osnovní, nebo útkový vazný bod, lze určit vazbu tkaniny [27]. Vazba tkaniny je podstatná pro samotnou strukturu textilie, kdy se tvoří požadovaný vzor, vzhled i atributy budoucí tkaniny. Vliv vazby je zčásti pozorovatelný u pevnosti, pružnosti, tuhosti, splývavosti i u omaku tkaniny. Působí také na vzhled, prodyšnost, tepelnou izolaci, odolnost proti oděru a další vlastnosti tkanin. Vazba má mnohokrát vliv na konečný vzor tkaniny. Mezi základní vazby tkanin patří plátno, kepr a atlas [28].

4.2.1 Plátnová vazba (P)

Pro plátno je charakteristická nejmenší střída vazby 2/2, tzn. 2 osnovní a 2 útkové nitě (obr. 11). Dále se vyznačuje nejhustším provázáním osnovních a útkových nití. Jedná se o nejjednodušší vazbu. Mnohdy dochází k využití této základní vazby jako výchozí pro sestavení vazeb složených (kombinovaných z několika rozdílných vazeb) a vícenitných (tkaniny víceosnovní a víceútkové) [28].



Obr. 11 – Plátnová vazba (střída 2x2) [28]

4.3 Typy tkanin

Tkaniny je možno rozlišit podle použité vlákenné suroviny anebo na ty, které mají svůj název, aniž by bylo rozeznáno primárně použité vlákno. Podle užité vlákenné suroviny jde o tkaniny bavlnářského, lnářského, vlnařského a hedvábnického typu [28].

4.3.1 Tkaniny hedvábnického typu

Hedvábnické tkaniny jsou zhotoveny z přírodního hedvábí či chemických nekonečných vláken. Mnohdy se uplatňuje spojení nekonečného chemického multifilu, který se nalézá v jedné soustavě nití, a střižových přízí v soustavě druhé. Tkaniny vykazují odlišnou strukturu a omak, ale povrch je většinou lesklý. V dnešní době se na trhu objevuje velké množství tkanin ze syntetických materiálů, které se snaží imitovat přírodní hedvábí. Produkce těchto tkanin je založena na použití nekonečných vláken, jež jsou typická pro původní tkaniny z čistého hedvábí [28].

Z tohoto důvodu se často využívá členění hedvábnických tkanin do skupin dle použité vlákenné suroviny [28]:

- z přírodního hedvábí
- z chemických nekonečných vláken
- ze střiží
- kombinace předchozích

4.4 Porozita tkaniny

Porozita, též zvaná jako pórovitost, je důležitá vlastnost, jež má zásadní vliv na propustnost i prodyšnost textilií. Je možné ji definovat jako objem pórů V_p (vzduchu) v celkovém objemu textilie V_c [29]. Jedná se o velikost pórů, které se v tkanině nacházejí. Tato místa se v materiálu vyskytují mezi vlákny a jsou to, jinak řečeno, vzduchové bubliny [30]. Hodnotu porozity lze formulovat buď jako poměrné číslo z intervalu (0; 1), anebo v procentech v intervalu (0; 100) [31].

Objemová definice porozity

Porozita stanovená ze zaplnění

Výpočet porozity úzce souvisí se zaplněním, kdy se porozita vypočítá jako [30]:

$$\varphi = \frac{V_p}{V_c} = \frac{V_c - V}{V_c} = 1 - \frac{V}{V_c} = 1 - \mu \qquad \text{kde } \mu \in \langle 0; 1 \rangle \tag{32}$$

Kde: φ ..... porozita [-]

V_p .... objem pórů = objem vzduchu [m^3]

V_c .... celkový objem vlákenného útvaru [m^3]

V ..... část objemu vlákenného útvaru vyplněná hmotou vláken [m^3]

μ ..... zaplnění [%]

Porozita stanovená z podílu měrných hmotností

Porozita, která je určená z podílu měrných hmotností P_p, se vypočítá podle vztahu [31]:

$$P_p = \frac{\rho_f - \rho_v}{\rho_f} = 1 - \frac{\rho_v}{\rho_f} \tag{33}$$

Kde: P_p .... porozita stanovená z podílu měrných hmotností [-]

ρ_f .... objemová měrná hmotnost vlákenného materiálu [kg/m^3]

ρ_v .... objemová měrná hmotnost tkaniny [kg/m^3]

Plošná definice porozity

Plošná definice porozity směřuje k výpočtu porozity z plošného zakrytí [29]:

$$\varphi = \frac{S_p}{S_c} = 1 - Z_c = 1 - d_o D_o + d_u D_u - d_o D_o d_u D_u \quad (34)$$

Kde: φ .... porozita [-]

S_p ... plocha pórů [m^2]

S_c ... celková plocha všech pórů [m^2]

Z_c ... celkové zakrytí [%]

d_o .... průměr osnovní nitě [mm]

D_o ... dostava osnovy [-]

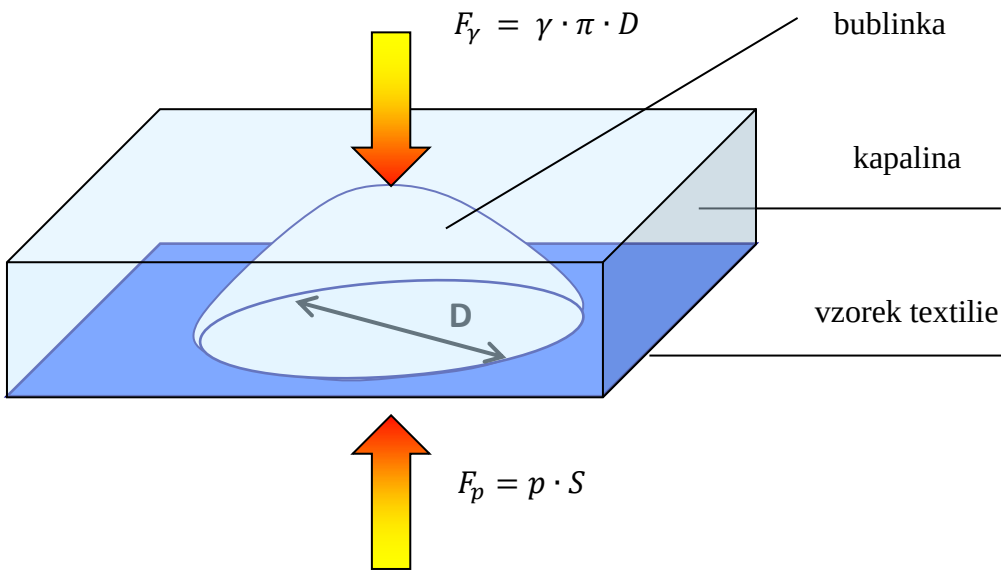
d_u .... průměr útkové nitě [mm]

D_u ... dostava útku [-]

Porozita se dá měřit dvěma způsoby, a to přímo nebo nepřímo. Přímá metoda je realizována prostřednictvím obrazové analýzy. Při nepřímém postupu se využívá povrchového napětí kapaliny, kterou je textilie smočena nebo prosévání definovaných částic přes textilii [32].

Bublinková metoda

Tato metoda, jež se řadí mezi nepřímý postup měření velikosti póru, slouží k určování největšího póru v textilii. Podstatu metody lze vidět na obr. 5. Velikost póru je možné spočítat z rovnováhy síly, kde síla F_γ je daná povrchovým napětím kapaliny mající vliv po obvodu póru $\pi.D$ a síla F_p je daná vnějším tlakem vytlačujícím kapalinu z póru a působícím na ploše póru S. Z praktického hlediska je velmi lehké odhalit velikost největšího póru v textilii, protože jde o místo, kde se při postupném zvyšování tlaku dospěje nejprve k vytlačení kapaliny z póru – ukáže se první bublinka vzduchu [32].



Obr. 12 – Podstata bublinkové metody [32]

4.5 Zaplnění tkaniny

Zaplnění se týká množství vláken uvnitř materiálu, a jak jsou jednotlivá vlákna urovnána. Zda vlákna vyplňují celou plochu materiálu nebo nikoliv.

Výpočet zaplnění je potřebný pro následný výpočet porozity, kdy se zaplnění vypočítá jako [30]:

$$\mu = \frac{V}{V_c} = \frac{S}{S_c} \qquad \text{kdy } \mu \in \langle 0; 1 \rangle \tag{35}$$

Kde: μ ..... zaplnění [%]

V ..... část objemu vlákenného útvaru vyplněná hmotou vláken [m^3]

V_c .... celkový objem vlákenného útvaru [m^3]

S ..... plocha jednoho póru [m^2]

S_c ..... celková plocha všech pórů [m^2]

5 Chemická vlákna a jejich dělení

Chemická vlákna se dělí dle výroby na [33]:

- Vlákna z přírodního polymeru – viskóza, acetátová vlákna, měďnatá
- Vlákna ze syntetického polymeru – polyester, polyamid, polypropylen, polyuretan, polyetylen, polyakrylonitril, skleněná vlákna

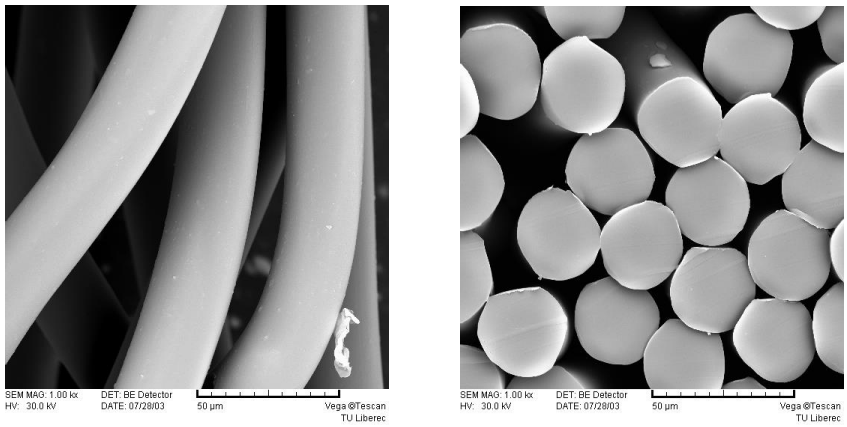
Blíže se podíváme na chemická vlákna, která se vytváří ze syntetického polymeru. Pozornost zaměříme konkrétně na polyamid [33].

Vlákna ze syntetického polymeru

K produkci těchto vláken dochází zvlákňováním z polymerního roztoku nebo taveniny. Tato vlákna se vyrábí v podobě nekonečných vláken, tzv. monofilů (jedno nekonečné vlákno) nebo multifilů (několik nekonečných vláken). Někdy bývá nezbytné, v rámci dalšího zpracování, tato nekonečná vlákna řezat či sekat na tzv. staplovou délku [33].

5.1 Polyamidová vlákna

Polyamid patří mezi syntetická vlákna s obecnou zkratkou PA (obr. 13). Vyskytuje se řada druhů, z nichž dva patří mezi nerozšířenější. Jde o polyamid 6 a polyamid 6.6, mezi kterými je rozdíl v molekulové struktuře a částečně i v některých vlastnostech [34].



Obr. 13 – Vzhled polyamidového vlákna [35]

5.1.1 Výroba

Jak polyamid 6, tak i polyamid 6.6 jsou zvlákňovány z roztaveného polymeru do šachty, proto jsou možné rozdílné profily průřezů vláken, včetně mikrovláken. Následným dloužením se u vlákna docílí finálních, zejména mechanických, vlastností. Největší rozšíření se týká druhu Nylon (polyamid 6.6) s vyšší tepelnou odolností a trvanlivostí. Tuzemská produkce vyrábí typ polyamid 6 - vlákno Silon [34].

5.1.2 Vlastnosti – obecně

Všeobecně je možné vlastnosti polyamidových vláken rozdělit do několika kategorií, kterými jsou vlastnosti geometrické, mechanické, fyzikálně chemické, chemické a fyziologické. Každá kategorie zahrnuje specifické ukazatele [36].

Mezi geometrické vlastnosti se řadí délka vláken, charakter jejich průřezu, objemové vlastnosti a jejich povrch. Polyamidová vlákna mají vždy pravidelný, kruhový průřez a jejich povrch je hladký [36].

Co se týká mechanických vlastností vláken, tak jde v podstatě o hodnocení deformačních procesů. Mezi nejdůležitější ukazatele patří pevnost, tažnost, elastické vlastnosti a tuhost. Pevnost je hodnocena v tahu, ohybu a v oděru. Podstatnou vlastností je elastičnost, jež je zkoumána za tahu, ohybu a tlaku. Souhrnně lze říci, že pro polyamidová vlákna je příznačná velká pevnost v tahu a odolnost v odírání [36].

Fyzikálně chemické vlastnosti se týkají navlhavosti, která je u polyamidových vláken docela malá a je podmíněna chemickou konstrukcí polymeru a hustotou struktury. Další významnou vlastností jsou jejich elektrické a tepelné vlastnosti. Za zvýšených teplot má polyamidové vlákno menší pevnost, avšak je možné ji zvětšit pomocí přídavků nebo úpravami [36].

Pokud jde o chemické vlastnosti, tak jsou polyamidy nepříliš odolné vůči kyselinám. Naproti tomu projevují značnou odolnost vůči alkáliím [36].

Neméně důležité jsou fyziologické vlastnosti, kdy polyamidová vlákna neomezují pokožku v dýchání. Ačkoli pojímají málo vlhkosti, propouštějí vodní páry. Také mají dobrou snášenlivost s živou tkání a nedochází k dráždění pokožky [36].

5.1.3 Užitné vlastnosti

Mezi typické užitné vlastnosti patří relativně jednoduchá údržba a tvarová stabilita. Dále se uplatňuje jako náhrada přírodního hedvábí (dámské punčochy, elastické prádlo, plavky, sportovní oblečení) a směsová komponenta s bavlnou a vlnou [34].

Na světle dochází k degradaci - žloutnutí a vykazuje nižší odolnost vůči kyselinám. Pak se také vyznačuje nevelkou objemností a dobrou barvitelností. Zároveň dosahuje vysoké pružnosti a vysoké odolnosti v oděru [33].

5.1.4 Použití

Ve formě střiže jako tepelněizolační vycpávky oděvních výrobků a přikrývek, pak také do tkanin a směsových přízí pletených produktů. Monofil čirý nebo kouřový se využívá jako monofilní šicí nit. Jak hladký, tak i tvarovaný multifil se aplikuje na punčochové zboží a sportovní oblečení. Tvarovaný kabílek se užívá na zhotovení všívaných koberců a rouna ze střiže se používají jako surovina do netkaných textilií [34].

6 Finální úpravy textilií

Mezi závěrečné úpravy textilních výrobků se řadí finální nebo speciální úpravy. Pomocí chemických, fyzikálních či mechanických postupů se získávají nové žádané užitné vlastnosti textilií, tj. vzhledové (např. zvýšení lesku), omakové (např. docílení měkkosti), potom nové určité vlastnosti (např. nežehlivost, nesráživost) anebo vlastnosti zaručující specifickou ochranu (např. nešpinivost, nehořlavost, nepromokavost) [37].

Na základě dosažené vlastnosti rozdělujeme finální úpravy textilií na [37]:

- vzhledové – česání, postřihování, broušení, mandlování, kalandrování, dekatování (z velké části jde o mechanické úpravy textilií)
- omakové – měkčicí, tužicí, plnicí
- stabilizační – nesráživé, nemačkavé, nežehlivé, neplstivé, protižmolkové, ad.
- ochranné – hydrofobní, oleofobní, nešpinivé, antistatické, nehořlavé, antimikrobiální, ad.

6.1 Hydrofobní úprava

Zásluhou hydrofobní úpravy se utlumuje smáčivost textilie a poskytuje se jí vodoodpudivost. Rozeznáváme úpravu [37]:

- ***méně prodyšnou – vodotěsnou*** – textilie musí vydržet jistý tlak vodního sloupce; tímto způsobem upravené tkaniny vykazují malou prodyšnost, z tohoto důvodu se úprava hodí obzvláště pro technické tkaniny
- ***prodyšnou – odperlující efekt*** – jednotlivá vlákna jsou obmotána jemným hydrofobním filmem, takže do nich nemůže prosáknout voda, ale propustnost pro vzduch mezi vlákny přetrvává

Úpravu lze realizovat dvěma způsoby [37]:

- zaplněním pórů tkaniny nebo pleteniny prostřednictvím filmotvorných látek (nánosování)
- nanesením látek s nízkým povrchovým napětím

Povrch textilie je možné smáčet kapalinou za předpokladu, že textilie vykazuje vyšší povrchové napětí než kapalina. Povrchové napětí destilované vody při 20°C je rovno 72 $mN.m^{-1}$ [37].

Chemické látky, jež jsou nejčastěji využívané při této úpravě [37]:

- parafinové emulze s hlinitými či zirkoničitými solemi
- deriváty vyšších mastných kyselin
- silikony
- perfluoralkany (oleofobní i hydrofobní úprava)

Mezi nejužívanější hydrofobní prostředky patří ty na bázi polysiloxanů (silikonů), jelikož se vyznačují velmi kvalitním vodoodpudivým efektem. Modifikované textilie mají měkký a hladký omak, nesníženou prodyšnost a současně dosahují zlepšení mačkavosti. Jejich nevýhodou je poměrně vysoká cena a senzitivita na předúpravu materiálů [37].

6.1.1 Hodnocení hydrofobní úpravy

Zkouška Spray-test dle ČSN 80 0827

Je nařízena pro zkoušení odolnosti plošných textilií proti povrchovému smáčení. Zkouška se zakládá na tom, že se vzorek textilie situuje do kruhového držáku, který je nakloněn v úhlu 45° lícem nahoru a zkrápí se ustáleným množstvím destilované vody (250 ml vody o teplotě 20 ± 2°C) z konstantní výšky. Voda prochází nálevkou se sprchovým nástavcem, jež obsahuje jistý počet otvorů o konkrétní velikosti [37].

Musí se dbát na to, aby zkrápění bylo neustálé a všechna voda protekla za 25 – 30 s. Po dokončení se okamžitě držák se vzorkem odmontuje, otočí se lícní stranou dolů a intenzivně se dvakrát uhodí rámečkem o pevný předmět, abychom se zbavili kapek ulpělých na vzorku. Při tomto zásahu se vzorek nachází ve vodorovné poloze. Hydrofobnost se stanovuje buď dle etalonu anebo přírůstkem hmotnosti v procentech [37].

Tkaniny použité v experimentu jsou plátnové vazby, z polyamidového hedvábí a některé jsou modifikovány hydrofobní úpravou. Rešerše odpovídá našemu tématu, neboť naše měření je dost podobné.

EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Záměrem experimentální části diplomové práce bylo zabývat se výpočtem odolnosti prostřednictvím existujících teorií. Zkouškou se bylo pokoušeno co nejvíce přiblížit normě, aby bylo možné výpočet co nejlépe definovat. Vybraný výpočet pro tenké kruhové desky byl zvolen na základě podobnosti technického řešení, neboť s ohledem na geometrii se tento případ velice podobá deskám, které jsou vetknuté po obvodu a zároveň zatíženy tlakem.

Bylo provedeno měření hydrostatické odolnosti na tkaninách z polyamidového multifilu, kdy jedna textilie byla opatřena hydrofobní úpravou a druhá nikoliv. Zároveň se tkaniny odlišovaly velikostí dostavy útku. Testováno bylo namáhání plochy v kruhovém tvaru. Získané výsledky byly statisticky vyhodnoceny a poté byly vytvořeny grafy pro přehledné zobrazení zmíněných výsledků.

Veškeré naměřené hodnoty byly dále použity při různých dílčích výpočtech a také při výpočtu hledané odolnosti, konkrétně maximálního průhybu, podle teoretických vzorců. Nakonec byl porovnán experiment s výpočtem a bylo vyhodnoceno, který z parametrů má největší vliv na výpočet maximálního průhybu.

7 Experiment

V rámci experimentu byla měřena hydrostatická odolnost materiálu. Dále byly z naměřených hodnot vypočítány dílčí vlastnosti materiálu jako plošná hmotnost a hustota. Naměřené výsledky včetně dalších vlastností zkoušeného materiálu byly následně uspořádány do přehledných tabulek, vyobrazeny prostřednictvím grafů a poté statisticky vyhodnoceny.

Ze všech získaných výsledků byla vždy spočítána základní popisná statistika, konkrétně aritmetický průměr $\bar{x}$, rozptyl s^2, směrodatná odchylka s a variační koeficient v. Také dolní a horní meze 95% intervalu spolehlivosti.

Aritmetický průměr: $$x = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} x_i \quad (36)$$

Rozptyl: $$s^2 = \frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2 \quad (37)$$

Směrodatná odchylka: $$s = \sqrt{s^2} \quad (38)$$

Variační koeficient: $$v = \frac{s}{\bar{x}} \cdot 100 \quad (39)$$

95% IS:

- Dolní mez $$\bar{x} - \Phi^{-1}\left(1 - \frac{\alpha}{2}\right) \cdot \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (40)$$
- Horní mez $$\bar{x} + \Phi^{-1}\left(1 - \frac{\alpha}{2}\right) \cdot \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (41)$$

Kde: $\alpha = 0{,}05$

7.1 Charakteristika použitého materiálu

Pro experiment byly použity dva druhy tkanin z polyamidového multifilu s těmito parametry (tab. 1 a 2), kdy jedna nit byla tvořena 36 nekonečnými vlákny.

Tab. 1 – PA multifil - parametry

Vazba	plátno
Jemnost [tex]	220
Dostava osnovy [nití/cm]	42
Dostava útku [nití/cm]	12, 14, 16, 18, 20

Tab. 2 – PA multifil s HF - parametry

Vazba	plátno
Jemnost [tex]	220
Dostava osnovy [nití/cm]	42
Dostava útku [nití/cm]	12, 14, 16, 18, 20

Lze shrnout, že parametry obou materiálů jsou stejné, ale materiál samotný je odlišný. V prvním případě (tab. 1) se jedná o polyamidové hedvábí bez jakékoliv úpravy (PA multifil) a v tom druhém (tab. 2) jde opět o polyamidové hedvábí, avšak tentokrát s hydrofobní úpravou (PA multifil s HF). Rozdíl je velice znatelný při samotném měření.

7.1.1 Plošná hmotnost

Před měřením hydrostatické odolnosti byla experimentálně gravimetrickou metodou zjištěna plošná hmotnost jednotlivých vzorků. Plošná hmotnost ρ_S $[g/m^2]$ byla počítána pomocí rovnice (42). Výsledné hodnoty byly přehledně zaznamenány v tab. 3 a tab. 4.

plošná hmotnost $\rho_S = \frac{m}{S}$ (42)

Kde: ρ_S ... plošná hmotnost [g/m^2]
m ... hmotnost [g]
S .... plocha [m^2]

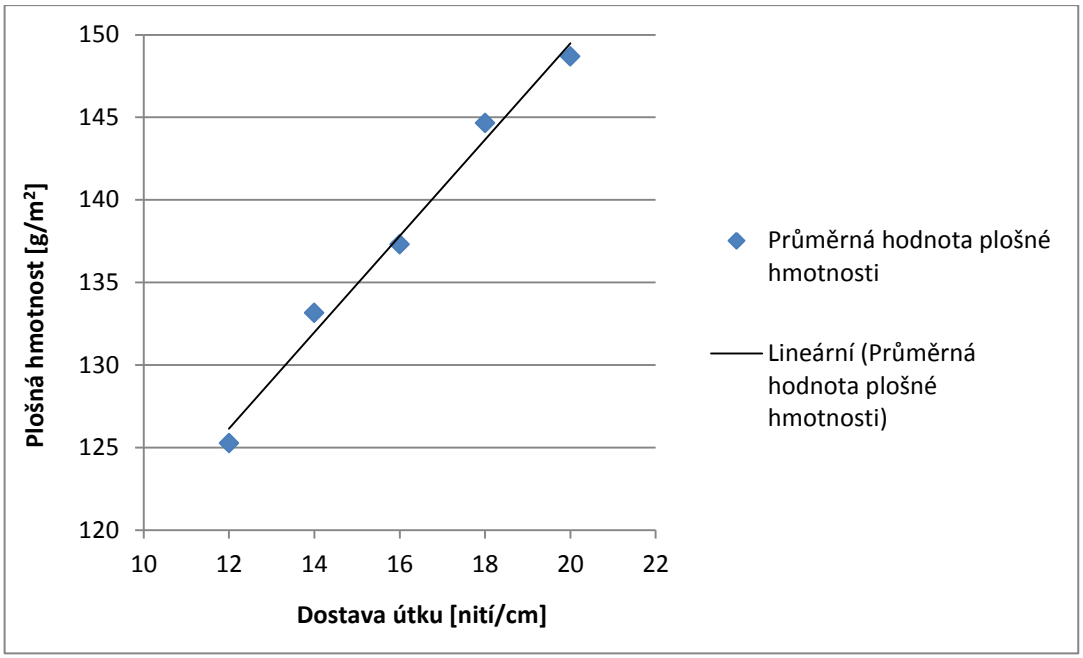
Tab. 3 – Plošná hmotnost PA multifilu

	Dostava útku [nití/cm]	**12**	**14**	**16**	**18**	**20**
Měření 1	**hmotnost [g]**	4,94	5,22	5,41	5,74	5,89
	plošná hmotnost [g/m^2]	123,39	130,56	135,17	143,54	147,17
Měření 2	**hmotnost [g]**	4,92	5,28	5,47	5,68	5,90
	plošná hmotnost [g/m^2]	122,90	131,88	136,74	142,03	147,40
Měření 3	**hmotnost [g]**	4,98	5,34	5,51	5,76	5,96
	plošná hmotnost [g/m^2]	124,61	133,44	137,73	144,05	148,99
Měření 4	**hmotnost [g]**	5,03	5,26	5,50	5,77	5,87
	plošná hmotnost [g/m^2]	125,81	131,43	137,41	144,28	146,76
Měření 5	**hmotnost [g]**	5,00	5,35	5,47	5,90	5,92
	plošná hmotnost [g/m^2]	124,96	133,72	136,63	147,47	148,10
Měření 6	**hmotnost [g]**	4,98	5,32	5,55	5,75	5,96
	plošná hmotnost [g/m^2]	124,59	133,01	138,74	143,68	148,96
Měření 7	**hmotnost [g]**	5,04	5,31	5,46	5,86	5,97
	plošná hmotnost [g/m^2]	125,90	132,70	136,53	146,47	149,36
Měření 8	**hmotnost [g]**	5,05	5,49	5,49	5,71	5,94
	plošná hmotnost [g/m^2]	126,20	137,28	137,21	142,86	148,56
Měření 9	**hmotnost [g]**	5,12	5,34	5,60	5,80	6,08
	plošná hmotnost [g/m^2]	128,03	133,40	139,98	145,08	151,92
Měření 10	**hmotnost [g]**	5,05	5,36	5,48	5,88	5,99
	plošná hmotnost [g/m^2]	126,23	133,99	136,92	147,08	149,70

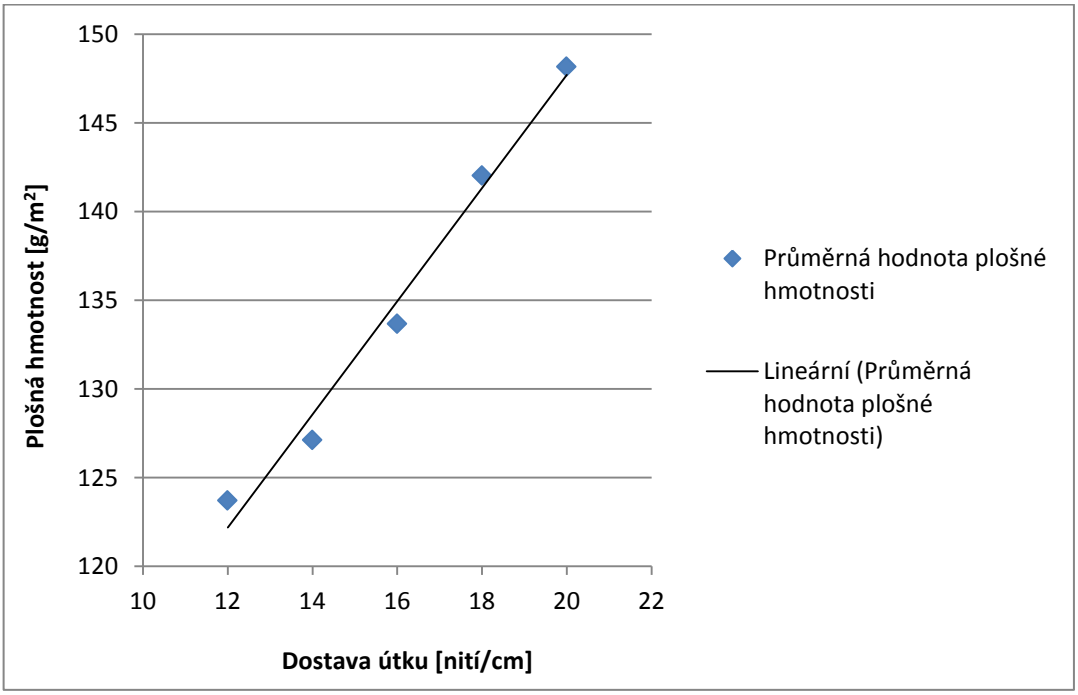
Tab. 4 – Plošná hmotnost PA multifilu s HF

	Dostava útku [nití/cm]	12	14	16	18	20
Měření 1	**hmotnost [g]**	4,95	5,02	5,30	5,63	5,86
	plošná hmotnost [g/m^2]	123,78	125,50	132,38	140,71	146,53
Měření 2	**hmotnost [g]**	4,96	5,05	5,36	5,64	5,83
	plošná hmotnost [g/m^2]	124,09	126,15	134,02	141,04	145,80
Měření 3	**hmotnost [g]**	4,98	5,02	5,33	5,64	5,85
	plošná hmotnost [g/m^2]	124,45	125,47	133,32	140,90	146,17
Měření 4	**hmotnost [g]**	5,03	5,26	5,50	5,77	5,87
	plošná hmotnost [g/m^2]	123,78	126,79	133,77	140,65	148,58
Měření 5	**hmotnost [g]**	4,88	5,09	5,37	5,72	5,90
	plošná hmotnost [g/m^2]	121,97	127,24	134,36	142,92	147,39
Měření 6	**hmotnost [g]**	4,96	5,11	5,34	5,70	5,92
	plošná hmotnost [g/m^2]	124,08	127,73	133,57	142,51	147,93
Měření 7	**hmotnost [g]**	4,98	5,10	5,26	5,68	5,96
	plošná hmotnost [g/m^2]	124,49	127,51	131,51	141,98	148,90
Měření 8	**hmotnost [g]**	4,85	5,16	5,39	5,71	6,03
	plošná hmotnost [g/m^2]	121,31	128,97	134,79	142,76	150,69
Měření 9	**hmotnost [g]**	4,89	5,10	5,37	5,74	6,00
	plošná hmotnost [g/m^2]	122,26	127,44	134,25	143,54	150,09
Měření 10	**hmotnost [g]**	5,08	5,14	5,39	5,73	5,98
	plošná hmotnost [g/m^2]	126,94	128,51	134,83	143,34	149,61

Hodnoty plošné hmotnosti byly dále vyobrazeny pomocí grafů (obr. 14 a 15) a dále statisticky vyhodnoceny (viz příloha č. 1).



Obr. 14 – Plošná hmotnost PA multifilu



Obr. 15 – Plošná hmotnost PA multifilu s HF

Nepatrné odchylky jsou způsobeny nepřesností měření velikosti vzorků.

7.1.2 Hustota materiálu

Vzhledem k množství dat, která o zkoušených materiálech známe, byla vypočítána i hustota materiálu s ohledem na jednotlivé hmotnosti vzorků, k čemuž bylo využito následující rovnice (43). Výsledné hodnoty jsou opět uspořádány do přehledných tabulek (tab. 5 a 6). Zároveň byly také statisticky vyhodnoceny (viz příloha č. 2).

$$\rho = \frac{m}{V} = \left(\frac{m}{(S \cdot l)}\right) \div 1000 \qquad (43)$$

Kde: m ... hmotnost [g]
V ... objem [m^3]
S .... obsah [m^2]
l .... tloušťka [m]

Tab. 5 – Hustota PA multifilu

	Dostava útku [nití/cm]	12	14	16	18	20
Měření 1	**hmotnost [g]**	4,94	5,22	5,41	5,74	5,89
	tloušťka [m]	0,00023	0,00023	0,00023	0,00024	0,00024
	hustota [kg/m^3]	536,49	567,65	587,70	598,08	613,20
Měření 2	**hmotnost [g]**	4,92	5,28	5,47	5,68	5,90
	tloušťka [m]	0,00023	0,00023	0,00023	0,00023	0,00024
	hustota [kg/m^3]	534,36	573,40	594,50	617,51	614,17
Měření 3	**hmotnost [g]**	4,98	5,34	5,51	5,76	5,96
	tloušťka [m]	0,00022	0,00023	0,00023	0,00024	0,00024
	hustota [kg/m^3]	566,41	580,16	598,80	600,22	620,77
Měření 4	**hmotnost [g]**	5,03	5,26	5,50	5,77	5,87
	tloušťka [m]	0,00023	0,00023	0,00023	0,00023	0,00023
	hustota [kg/m^3]	547,00	571,45	597,45	627,32	638,09
Měření 5	**hmotnost [g]**	5,00	5,35	5,47	5,90	5,92
	tloušťka [m]	0,00023	0,00023	0,00023	0,00023	0,00024
	hustota [kg/m^3]	543,32	581,38	594,04	641,17	617,07
Měření 6	**hmotnost [g]**	4,98	5,32	5,55	5,75	5,96
	tloušťka [m]	0,00022	0,00023	0,00023	0,00023	0,00024
	hustota [kg/m^3]	566,31	578,30	603,23	624,68	620,68
Měření 7	**hmotnost [g]**	5,04	5,31	5,46	5,86	5,97
	tloušťka [m]	0,00023	0,00023	0,00023	0,00023	0,00024
	hustota [kg/m^3]	547,38	576,96	593,60	636,83	622,31
Měření 8	**hmotnost [g]**	5,05	5,49	5,49	5,71	5,94
	tloušťka [m]	0,00022	0,00023	0,00023	0,00023	0,00024
	hustota [kg/m^3]	573,61	596,88	596,54	621,14	619,01
Měření 9	**hmotnost [g]**	5,12	5,34	5,60	5,80	6,08
	tloušťka [m]	0,00023	0,00023	0,00023	0,00023	0,00024
	hustota [kg/m^3]	556,63	579,99	608,60	630,78	633,00
Měření 10	**hmotnost [g]**	5,05	5,36	5,48	5,88	5,99
	tloušťka [m]	0,00023	0,00023	0,00023	0,00024	0,00024
	hustota [kg/m^3]	548,80	582,57	595,32	612,81	623,73

Tab. 6 – Hustota PA multifilu s HF

	Dostava útku [nití/cm]	12	14	16	18	20
Měření 1	**hmotnost [g]**	4,95	5,02	5,30	5,63	5,86
	tloušťka [m]	0,00023	0,00023	0,00023	0,00023	0,00024
	hustota [kg/m^3]	538,16	545,66	575,54	611,79	610,54
Měření 2	**hmotnost [g]**	4,96	5,05	5,36	5,64	5,83
	tloušťka [m]	0,00023	0,00024	0,00023	0,00024	0,00024
	hustota [kg/m^3]	539,53	525,64	582,67	587,65	607,51
Měření 3	**hmotnost [g]**	4,98	5,02	5,33	5,64	5,85
	tloušťka [m]	0,00023	0,00024	0,00023	0,00024	0,00024
	hustota [kg/m^3]	541,07	522,78	579,65	587,09	609,05
Měření 4	**hmotnost [g]**	4,95	5,07	5,35	5,63	5,94
	tloušťka [m]	0,00022	0,00023	0,00023	0,00023	0,00024
	hustota [kg/m^3]	562,61	551,25	581,62	611,52	619,07
Měření 5	**hmotnost [g]**	4,88	5,09	5,37	5,72	5,90
	tloušťka [m]	0,00022	0,00024	0,00023	0,00024	0,00024
	hustota [kg/m^3]	554,42	530,16	584,18	595,50	614,11
Měření 6	**hmotnost [g]**	4,96	5,11	5,34	5,70	5,92
	tloušťka [m]	0,00022	0,00023	0,00023	0,00024	0,00024
	hustota [kg/m^3]	563,99	555,36	580,74	593,79	616,35
Měření 7	**hmotnost [g]**	4,98	5,10	5,26	5,68	5,96
	tloušťka [m]	0,00022	0,00023	0,00023	0,00023	0,00024
	hustota [kg/m^3]	565,86	554,37	571,76	617,30	620,42
Měření 8	**hmotnost [g]**	4,85	5,16	5,39	5,71	6,03
	tloušťka [m]	0,00022	0,00023	0,00023	0,00024	0,00024
	hustota [kg/m^3]	551,39	560,74	586,04	594,82	627,88
Měření 9	**hmotnost [g]**	4,89	5,10	5,37	5,74	6,00
	tloušťka [m]	0,00023	0,00023	0,00023	0,00023	0,00024
	hustota [kg/m^3]	531,57	554,09	583,67	624,08	625,38
Měření 10	**hmotnost [g]**	5,08	5,14	5,39	5,73	5,98
	tloušťka [m]	0,00023	0,00023	0,00023	0,00023	0,00024
	hustota [kg/m^3]	551,89	558,73	586,20	623,22	623,35

7.2 Výchozí nastavení přístroje

Před zahájením měření bylo nutné nastavit potřebné parametry přístroje. Konkrétně se to týkalo jednotky vodního sloupce, kde se dle potřeby rozhoduje mezi jednotkami mBar nebo cm. Pro experiment byly použity cmH_2O. Dále bylo nezbytné vybrat přírůstek tlaku podle norem buď 10, nebo 60 cmH_2O/min. Zde byl zvolen přírůstek tlaku 10 cmH_2O/min, neboť ho norma připouští. Dalším důvodem této volby bylo to, že při 60 cmH_2O/min by bylo měření strašně rychlé. Proto, aby bylo vůbec možné zaznamenat, kdy došlo k proniknutí vody, byl vhodnější nižší přírůstek tlaku, protože kdyby byl přírůstek moc rychlý, tak by měření nebylo přesné. Zároveň by v takové situaci došlo k průniku více kapek, čímž by bylo měření ještě více nepřesné. Nakonec bylo důležité zvolit maximální tlak, kterého přístroj dosáhne. V tomto případě byla zvolena hodnota 3000 cmH_2O, aby bylo zabráněno předčasnému zastavení testu v případě nastavení nízké hodnoty. Veškeré nastavení přístroje bylo shrnuto do přehledné tabulky (tab. 7).

Tab. 7 – Základní nastavení přístroje

Jednotky vodního sloupce	cmH_2O
Přírůstek tlaku	10 cmH_2O/min
Maximální tlak	3000 cmH_2O

7.3 Postup měření hydrostatické odolnosti

Pro měření byl využit přístroj Hydrostatic Head Tester M018, na kterém dochází k rychlému a přesnému stanovení hydrostatické odolnosti. Měření bylo realizováno v laboratoři KHT za těchto klimatických podmínek:

Teplota: 23,2 °C

Vlhkost: 29 %

Měření bylo podrobeno přibližně 150 vzorků. Všechny testované vzorky měly rozměry 20 x 20 cm a byly předem klimatizovány. Přístroj funguje na principu působení tlaku na upnutou textilii pomocí stlačeného vzduchu a vody obsažené v hlavici zásobníku. Pro každý testovaný vzorek, který byl vystaven experimentu, byla použita nová destilovaná voda. Dále bylo nutností vždy odstranit vodu z horních ploch upínacího zařízení včetně osušení dalších částí, které byly při měření upotřebeny.

Vzorky byly do přístroje umístěny bez jakýchkoliv záhybů a mechanického poškození. Na kruhovou oblast o průměru 16 cm byl vložen vzorek textilie lícní stranou vzhůru tak, aby po upevnění a přitlačení hlavice přesahovaly okraje textilie a zároveň došlo k doteku povrchu testovaného vzorku s povrchem vody. Při procesu měření vzorků bez hydrofobní úpravy bylo potřeba využít gumové kruhové výztuže, aby se zabránilo prostoupení vody zkušebními vzorky. Vzorek byl tedy jednou výztuží podložen a zároveň, pro lepší napnutí, byla další gumová výztuž umístěna i na vzorek.

V důsledku jemnosti materiálu docházelo v některých případech, již po utažení, k rozjetí vazby v oblasti kruhu. Taková měření byla pochopitelně vyloučena. Ostatní měření probíhala velice podobně.

Na vzorek bylo zespoda působeno tlakem vody. Voda byla vytlačována stlačeným vzduchem a účinkovala tlakem na plochu textilie. Tento tlak byl automaticky regulován dle nastavené rychlosti růstu. V době, kdy došlo na povrchu textilie k průniku tří kapek vody, bylo měření zastaveno, posléze zaznamenán čas a dosažená výška vodního sloupce. Při rychlém prosáknutí materiálu vodou bylo možné zpozorovat, že u nižší dostavy útku začalo prosakování vody uprostřed vzorku, avšak s rostoucí dostavou započalo prosakování vody v místě stlačení hlavice. Nicméně při většině měření nakonec nastalo úplné zaplavení povrchu vzorku.

Získané hodnoty byly následně, pro další výpočty, převedeny z původních jednotek cmH_2O/min na mmH_2O/s. Měření trvala ve všech případech kolem 60 sekund a nejvýše bylo dosaženo hodnoty něco málo přes 100 mmH_2O.

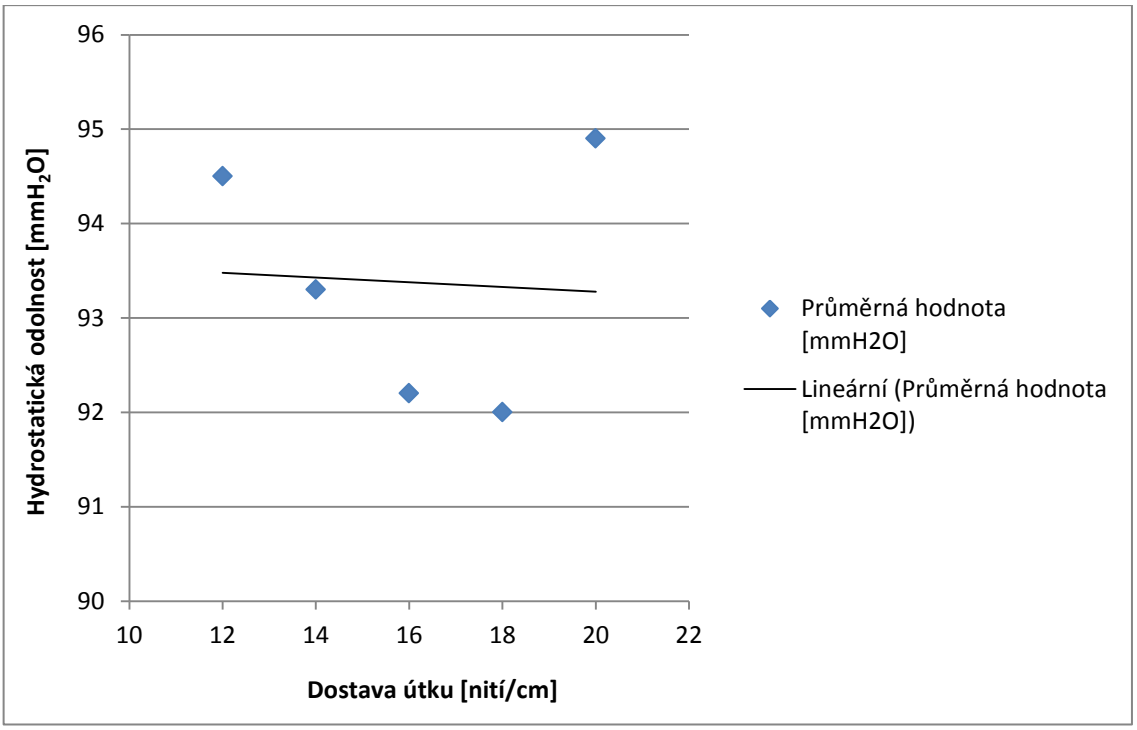
Naměřené hodnoty hydrostatické odolnosti jsou zaznamenány v tabulkách (tab. 8 a 9) a poté i v grafech (obr. 16 a 17). Dále byly statisticky vyhodnoceny (viz příloha č. 3).

Tab. 8 – Hydrostatická odolnost PA multifilu

	Dostava útku [nití/cm]	12	14	16	18	20
Měření 1	**mmH_2O**	114	103	111	99	108
	doba měření [s]	66,6	61,2	63,6	61,2	65,7
Měření 2	**mmH_2O**	109	107	95	98	105
	doba měření [s]	64,2	61,2	61,8	61,2	62,4
Měření 3	**mmH_2O**	103	97	102	104	110
	doba měření [s]	63,0	64,2	60,0	65,2	67,3
Měření 4	**mmH_2O**	122	104	100	102	113
	doba měření [s]	31,2	34,8	33,6	65,3	67,8
Měření 5	**mmH_2O**	73	86	84	85	83
	doba měření [s]	29,4	30,0	28,8	31,2	28,8
Měření 6	**mmH_2O**	84	102	80	100	83
	doba měření [s]	30,6	33,6	30,6	31,8	31,2
Měření 7	**mmH_2O**	83	78	84	80	87
	doba měření [s]	30,6	32,4	32,4	30,0	29,4
Měření 8	**mmH_2O**	105	90	102	83	91
	doba měření [s]	34,2	29,4	34,2	31,8	33,6
Měření 9	**mmH_2O**	86	90	82	83	84
	doba měření [s]	30,0	33,6	30,6	30,6	29,4
Měření 10	**mmH_2O**	66	76	82	86	85
	doba měření [s]	25,2	24,6	33,0	30,6	31,8

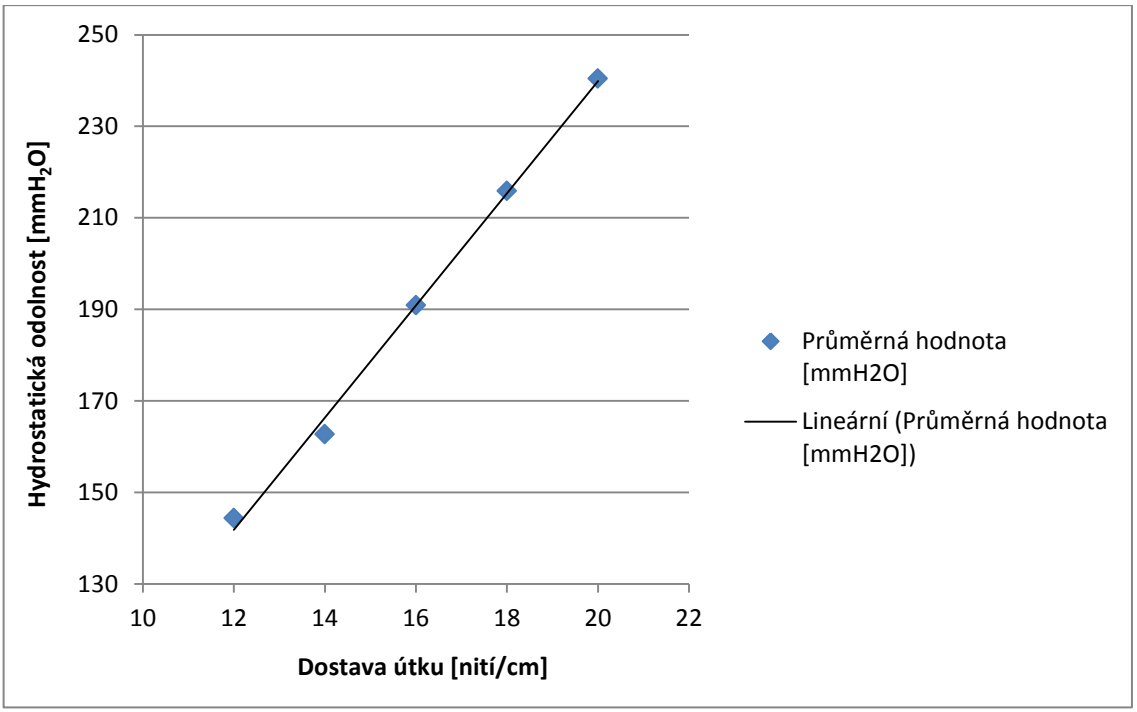
Tab. 9 – Hydrostatická odolnost PA multifilu s HF

	Dostava útku [nití/cm]	12	14	16	18	20
Měření 1	**mmH_2O**	129	156	198	260	278
	doba měření [s]	72,6	76,2	129,0	138,6	147,6
Měření 2	**mmH_2O**	145	173	186	233	262
	doba měření [s]	84,6	85,8	124,2	131,4	144,6
Měření 3	**mmH_2O**	153	186	192	230	253
	doba měření [s]	94,8	115,2	127,8	130,8	132,6
Měření 4	**mmH_2O**	144	167	193	207	209
	doba měření [s]	75,0	82,8	120,6	93,0	94,8
Měření 5	**mmH_2O**	120	158	188	194	258
	doba měření [s]	67,8	78,0	125,4	93,0	137,4
Měření 6	**mmH_2O**	151	159	174	191	224
	doba měření [s]	81,0	78,0	84,0	90,6	127,8
Měření 7	**mmH_2O**	147	152	190	213	251
	doba měření [s]	77,4	74,4	94,8	124,8	136,8
Měření 8	**mmH_2O**	154	150	199	214	246
	doba měření [s]	75,0	70,2	93,0	124,8	132,6
Měření 9	**mmH_2O**	149	158	201	204	203
	doba měření [s]	90,6	79,8	92,4	121,2	80,4
Měření 10	**mmH_2O**	152	168	188	213	220
	doba měření [s]	88,2	84,0	89,4	122,4	126,6



Obr. 16 – Hydrostatická odolnost PA multifilu

U grafu hydrostatické odolnosti polyamidového hedvábí bez hydrofobní úpravy (obr. 16) je znatelné, že hodnoty jsou prakticky konstantní, z čehož vyplývá, že naměřené hodnoty jsou nezávislé na dostavě útku. Zároveň byla spočítána korelace, která vyšla -0,0603 a tím je i statisticky potvrzeno, že v tomto případě není žádná závislost na dostavě útku.

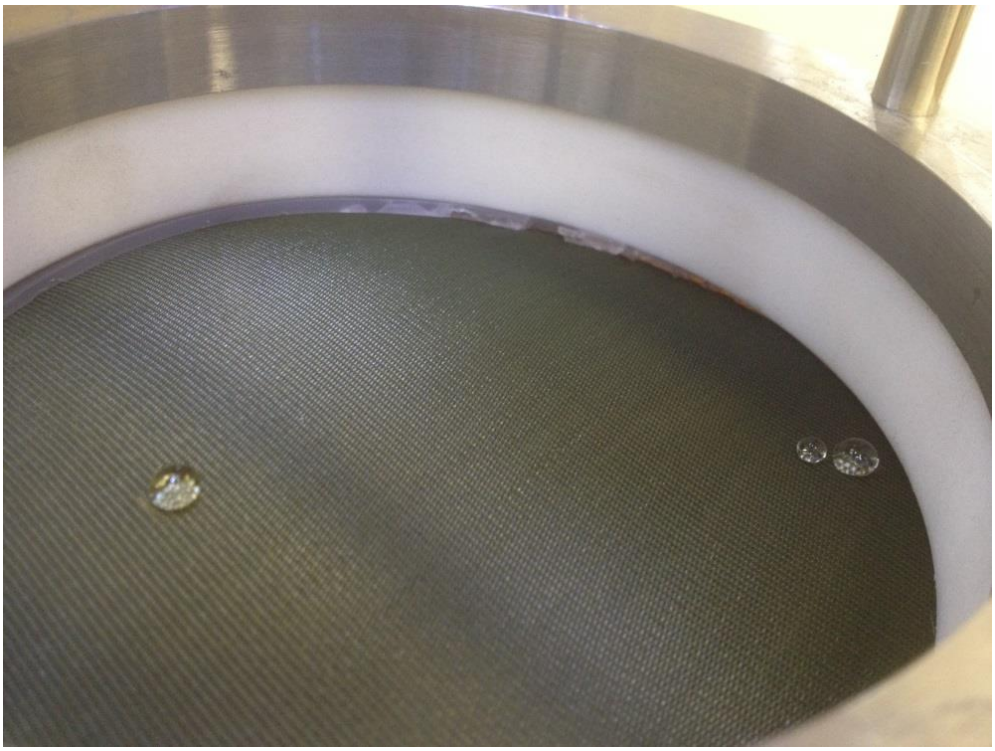


Obr. 17 – Hydrostatická odolnost PA multifilu s HF

Z grafu hydrostatické odolnosti polyamidového hedvábí s hydrofobní úpravou (obr. 17) vyplývá, že hodnoty mají rostoucí tendenci, tudíž jsou závislé na dostavě útku. Zároveň byla spočítána korelace, která vyšla 0,9983 a tím je i statisticky potvrzeno, že v tomto případě se jedná o silnou a přímou závislost na dostavě útku.

Při procesu měření vzorků s hydrofobní úpravou nebylo potřeba spodní gumové výztuže, neboť byl materiál pevnější a tudíž nedocházelo k okamžitému prostoupení vody zkušebními vzorky. Naproti tomu bylo i zde výhodné umístit gumovou výztuž na vzorek pro lepší napnutí. Zřídkakdy u tohoto materiálu docházelo po utažení vzorku čelistmi k rozjetí vazby v oblasti kruhu. Pokud taková situace nastala, tak byla tato měření opět pochopitelně vyloučena. Průběh ostatních měření se vyvíjel prakticky stejně. Vždy došlo k proniknutí kapek materiálem, kdy po průniku prvních třech kapek přes tkaninu (obr. 18) bylo měření ukončeno. Kapky se objevovaly na různých místech, ať už na prostředku vzorku nebo u krajů.

Pokud jde o dobu měření, tak u vzorků s nižší dostavou útku byla doba měření kratší a v důsledku vyšší dostavy útku doba měření narůstala. S rostoucí dostavou útku zároveň docházelo k nárůstu hodnot milimetrů vodního sloupce. Měření trvala v rozmezí od 70 sekund až do 140 sekund a nejvýše bylo dosaženo hodnoty něco málo přes 270 mmH_2O.



Obr. 18 – Průnik třech kapek přes PA multifil s HF

Souhrnně lze říci, že pro dosažení optimálních výsledků bylo provedeno velké množství měření. Pokud nastala nějaká chyba při měření, jednalo se ve všech případech o porušení materiálu v čelistech následkem upnutí vzorku. V tom případě nešlo o jakési zničení, ale šlo o změnu na měřeném materiálu. Chybná měření se vyskytovala v jedné třetině z celkových měření a všechna byla vyloučena ze statistického vyhodnocení.

8 Výpočet

Z důvodu dosažení výsledných hodnot maximálního průhybu bylo nutné získat i některé dílčí hodnoty, kterých bylo dosaženo prostřednictvím jednotlivých výpočtů. Nejdříve byla naměřena tažnost jednotlivých vzorků, aby mohl být následně vypočítán modul pružnosti, neboť se vyskytuje v důležitém výpočtu, který byl klíčovou hodnotou pro finální výsledek. Poté byla spočítána ohybová tuhost desky, aby bylo možné vypočítat hodnotu, která byla cílem práce. Pro samotný finální výsledek, tedy maximální průhyb tkaniny, bylo nutné stanovit dva parametry, a to Poissonovo číslo a tlak.

8.1 Modul pružnosti v tahu

Pro dosažení hodnot modulu pružnosti bylo potřeba naměřit tažnost každého vzorku, neboli schopnost materiálu deformovat se během namáhání v tahu, k čemuž byl využit přístroj na měření tažnosti, konkrétně Testometric M-350 5CT v souladu s normou ČSN EN ISO 13934-1 (800812). V této normě je uveden postup pro určení maximální síly a tažnosti při maximální síle prostřednictvím metody Strip, kdy byla šířka měřeného vzorku 50 mm a délka 200 mm. Pro výpočet byly hodnoty převedeny na metry, tedy šířka vzorku 0,05 m a délka vzorku 0,2 m.

Měřením byla získána data, která byla využita pro výpočet modulu pružnosti. Pro výpočet modulu pružnosti v tahu neboli Youngova modulu bylo potřeba znát prodloužení a sílu, z kterých byla následně vypočítána hodnota poměrné deformace ε a napětí v tahu σ dle vztahu:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \tag{44}$$

Kde: E ... modul pružnosti v tahu [Pa]

σ ... napětí v tahu [Pa]

ε ... poměrná deformace (tzv. podélná)

Napětí v tahu bylo dopočítáno dle vzorce:

$$\sigma = \frac{F}{S} \tag{45}$$

Kde: σ ... napětí v tahu [Pa]

F ... síla [N]

S ... obsah [m]

Hodnota poměrné deformace byla získána rovnicí:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} \tag{46}$$

Kde: ε ... poměrná deformace (tzv. podélná)

l .... délka [m]

l_0 ... původní délka [m]

Δl ... absolutní prodloužení $\Delta l = l - l_0$

8.2 Ohybová tuhost desky

Dalším důležitým výpočtem byla ohybová tuhost desky, jíž docílíme prostřednictvím vzorce:

$$D = \frac{E \cdot h^3}{12 \cdot (1 - \mu^2)} \tag{47}$$

Kde: D ... ohybová tuhost desky [Nm]

E ... modul pružnosti v tahu [Pa]

h ... tloušťka vzorku [m]

μ ... Poissonovo číslo [-]

8.3 Průhyb vzorku

Jedná se o malou deformaci, která vzniká při měření hydrostatické odolnosti. Aby bylo možné porovnat naměřené hodnoty z experimentu, bylo nutné vypočítat maximální průhyb zkoušeného materiálu pomocí vzorce (48), kde byl poloměr vzorku roven 0,08 m:

$$W_{max} = \frac{pa^4}{64D} \tag{48}$$

Kde: W_{max} ... maximální průhyb [m]
p ..... tlak [Pa]
a ..... poloměr [m]
D ..... ohybová tuhost desky [Nm]

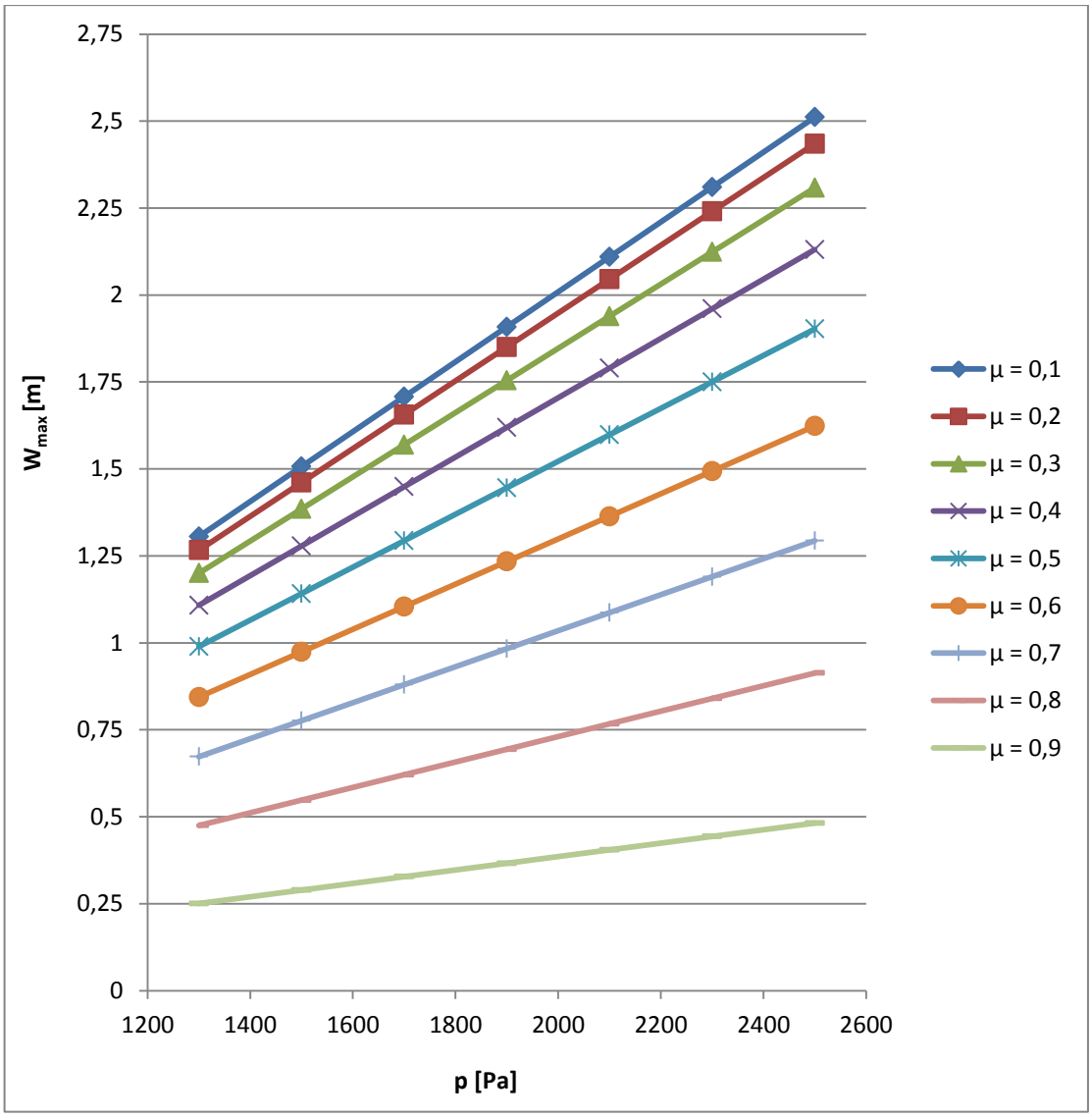
Výsledné hodnoty jsou přehledně uspořádány v tabulkách 10 a 11. Aby byly výsledky výpočtů viditelné, bylo nutné tabulku rozdělit na dvě části. V tabulkách je také vidět, že hodnoty Poissonova čísla byly zvoleny od 0,1 do 0,9 a parametr tlaku byl určen od 1300 Pa do 2500 Pa. Pro lepší přehlednost byly hodnoty průhybu v závislosti na tlaku vyneseny do grafu (obr. 19).

Tab. 10 – Výpočet maximálního průhybu PA multifilu s HF (1. část)

μ [-]	**0,1**	**0,2**	**0,3**	**0,4**	**0,5**
E [Pa]	597 371 697	597 371 697	597 371 697	597 371 697	597 371 697
h [m]	0,000234	0,000234	0,000234	0,000234	0,000234
D [Nm]	0,0006404	0,0006604	0,0006967	0,0007547	0,0008453
p [Pa]	1300	1300	1300	1300	1300
Wmax [m]	1,3058086	1,2662387	1,2002887	1,1079588	0,989249
p [Pa]	1500	1500	1500	1500	1500
Wmax [m]	1,5067023	1,4610446	1,3849485	1,278414	1,1414411
p [Pa]	1700	1700	1700	1700	1700
Wmax [m]	1,7075959	1,6558506	1,5696083	1,4488692	1,2936333
p [Pa]	1900	1900	1900	1900	1900
Wmax [m]	1,9084895	1,8506565	1,7542681	1,6193244	1,4458254
p [Pa]	2100	2100	2100	2100	2100
Wmax [m]	2,1093832	2,0454625	1,938928	1,7897797	1,5980175
p [Pa]	2300	2300	2300	2300	2300
Wmax [m]	2,3102768	2,2402684	2,1235878	1,9602349	1,7502097
p [Pa]	2500	2500	2500	2500	2500
Wmax [m]	2,5111704	2,4350744	2,3082476	2,1306901	1,9024018

Tab. 11 – Výpočet maximálního průhybu PA multifilu s HF (2. část)

μ [-]	**0,6**	**0,7**	**0,8**	**0,9**
E [Pa]	597 371 697	597 371 697	597 371 697	597 371 697
h [m]	0,000234	0,000234	0,000234	0,000234
D [Nm]	0,0009906	0,0012431	0,0017610	0,0033366
p [Pa]	1300	1300	1300	1300
Wmax [m]	0,8441591	0,6726893	0,4748395	0,2506097
p [Pa]	1500	1500	1500	1500
Wmax [m]	0,9740297	0,776180	0,5478917	0,2891651
p [Pa]	1700	1700	1700	1700
Wmax [m]	1,1039004	0,8796706	0,6209440	0,3277204
p [Pa]	1900	1900	1900	1900
Wmax [m]	1,2337710	0,9831613	0,9639962	0,3662758
p [Pa]	2100	2100	2100	2100
Wmax [m]	1,3636416	1,0866519	0,7670484	0,4048311
p [Pa]	2300	2300	2300	2300
Wmax [m]	1,4935123	1,1901426	0,8401007	0,4433865
p [Pa]	2500	2500	2500	2500
Wmax [m]	1,6233829	1,2936333	0,9131529	0,4819418



Obr. 19 – Výsledné hodnoty průhybu získané výpočtem

Takto bylo dosaženo hodnot výpočtem, které byly následně porovnány s hodnotami získanými měřením hydrostatické odolnosti. Aby došlo ke srovnání odpovídajících veličin, bylo nutné naměřené hodnoty přepočítat na hodnoty tlaku.

8.4 Tlak z naměřené hydrostatické odolnosti

Hydrostatická odolnost textilií je vyjadřována výškou vodního sloupce, jež je popisována jako tlak vody působící na textilii zvnějšku. Pro další výpočty bylo potřeba odvodit přepočet z Pascalova vztahu (2).

$$p = h \cdot \rho \cdot g \qquad (2)$$

Ze zmíněné rovnice bylo vyvozeno, že výška 1 mmH_2O je přibližně rovna tlaku 9,807 pascalů a konstanta pro přepočet hodnot činí 0,102 mmH_2O.

Výsledné hodnoty naměřeného tlaku převedeného na jednotky Pascalu jsou zaznamenány v tab. 12 a 13.

Tab. 12 – Vypočítané hodnoty tlaku PA multifilu

Hydrostatická odolnost [mmH_2O]	Tlak [Pa]
94,5	926,8
93,3	915,0
92,2	904,2
92,0	902,2
94,9	930,7

Tab. 13 – Vypočítané hodnoty tlaku PA multifilu s HF

Hydrostatická odolnost [mmH_2O]	Tlak [Pa]
144,4	1416,1
162,7	1595,6
190,9	1872,2
215,9	2117,3
240,4	2357,6

Jelikož je hydrostatická odolnost údajem o napětí, tak byl ve výpočtu řešen zejména průhyb tkaniny. Nejdříve byl tento průhyb měřen u obou testovaných materiálů s přesností na milimetry, ale již v průběhu zkoušky byl materiál bez hydrofobní úpravy vyřazen z tohoto experimentu, neboť zde nedocházelo prakticky k žádnému prohnutí tkaniny. Z tohoto důvodu byl dále řešen pouze materiál s hydrofobní úpravou.

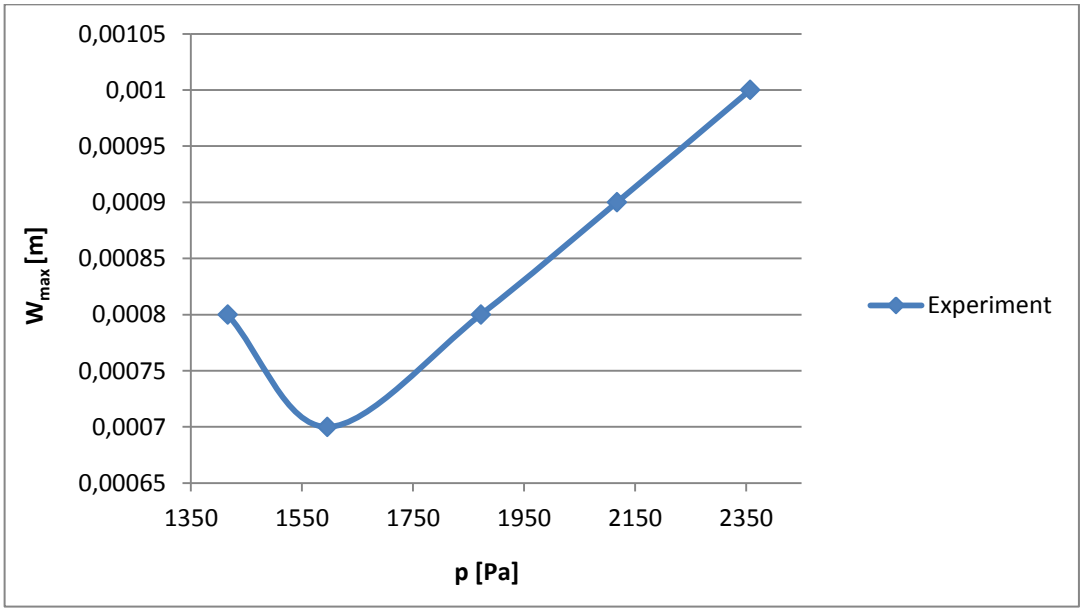
Pro přehlednost jsou naměřené hodnoty průhybu uspořádány v tabulce 14.

Tab. 14 – Naměřený průhyb PA multifilu s HF

Dostava útku [nití/cm]	Naměřený průhyb [m]
12	0,0008
14	0,0007
16	0,0008
18	0,0009
20	0,001

Z tabulky je jasně vidět, že s vyšší dostavou útku naměřená hodnota průhybu postupně roste, ale současně je i patrná statistická chyba při měření.

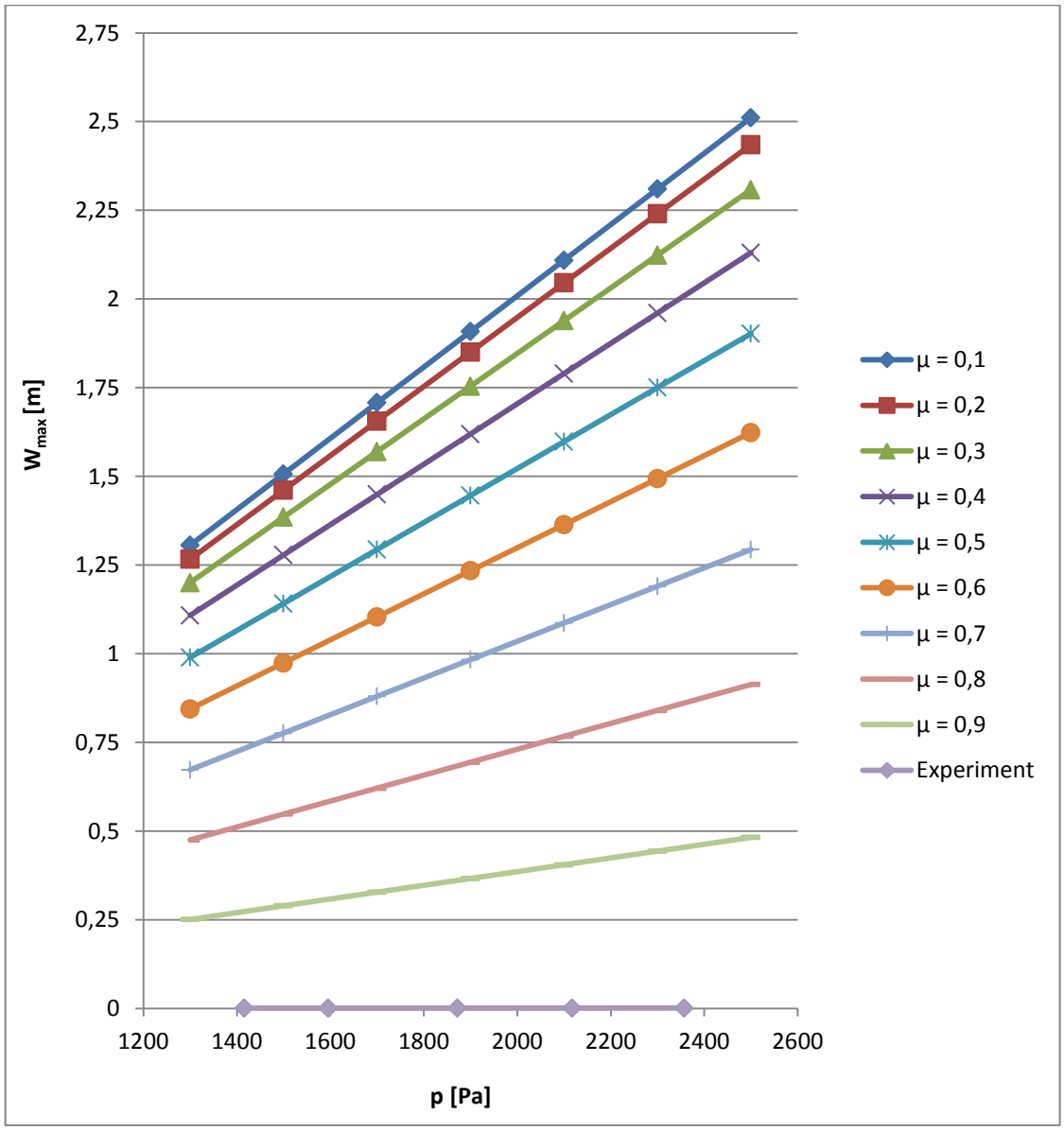
Pro lepší představu byl vytvořen i graf (obr. 20), který tento trend potvrzuje.



Obr. 20 – Výsledné hodnoty průhybu získané měřením

Každý materiál reagoval jinak z hlediska vazby, což ale nebylo předmětem práce. Pro účel použití bylo rozhodnuto, že to je dostačující. Jsem si však vědoma toho, že pokles je sporný a není to úplně očekávaný průběh, neboť tam můžou být různé aspekty, ať už jiná pružnost, provázání nebo pevnost.

Vzhledem k tomu, že byly získány všechny potřebné hodnoty, aby mohl být porovnán experiment s výpočtem, tak byl z výsledných hodnot vytvořen graf, který zřetelně vyhodnocuje maximální průhyb testovaného materiálu (obr. 21).

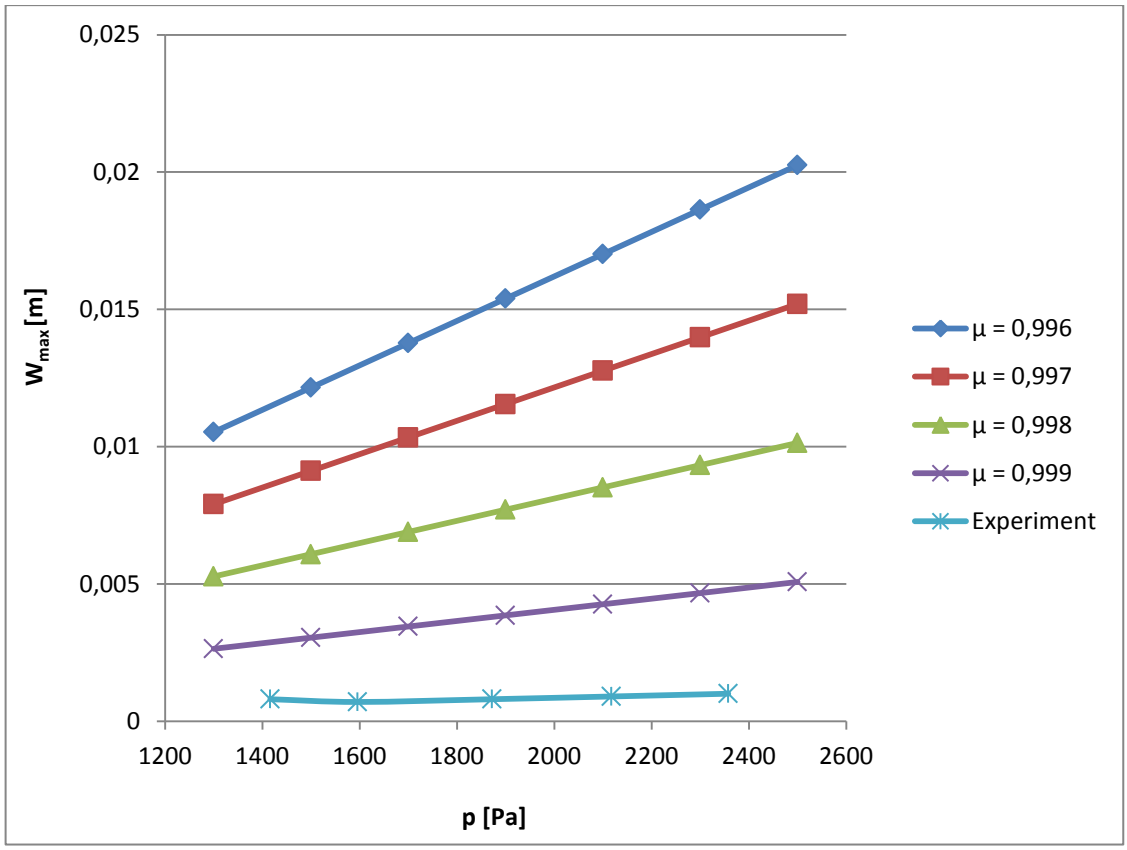


Obr. 21 – Porovnání hodnot průhybu z experimentu a výpočtu

Z výsledného grafu vyplývá, že velikost Poissonova čísla má velký vliv na konečnou hodnotu maximálního průhybu. Čím vyšší Poissonovo číslo, tím nižší je hodnota maximálního průhybu, ale zároveň se tak více přibližuje k naměřeným hodnotám. Aby parametr Poissonova čísla byl více zpřesněn, byl proveden ještě doplňkový výpočet, kde se velikost Poissonova čísla pohybovala od 0,996 do 0,999. Výsledné hodnoty byly uspořádány do tabulky (tab. 15) a následně zobrazeny pomocí grafu (obr. 22), kde byly opět srovnány s hodnotami vycházejícími z experimentu.

Tab. 15 – Vypočítaný průhyb na základě přesnějšího Poissonova čísla

μ [-]	**0,996**	**0,997**	**0,998**	**0,999**
E [Pa]	597 371 697	597 371 697	597 371 697	597 371 697
h [m]	0,000234	0,000234	0,000234	0,000234
D [Nm]	0,0794039	0,1058189	0,1586488	0,3171390
p [Pa]	1300	1300	1300	1300
W_{max} [m]	0,0105309	0,0079021	0,0052707	0,0026367
p [Pa]	1500	1500	1500	1500
W_{max} [m]	0,0121510	0,0091178	0,0060816	0,0030423
p [Pa]	1700	1700	1700	1700
W_{max} [m]	0,0137712	0,0103335	0,0068925	0,0034480
p [Pa]	1900	1900	1900	1900
W_{max} [m]	0,0153913	0,0115493	0,0077034	0,0038536
p [Pa]	2100	2100	2100	2100
W_{max} [m]	0,0170114	0,0127650	0,0085142	0,0042592
p [Pa]	2300	2300	2300	2300
W_{max} [m]	0,0186316	0,0139807	0,0093251	0,0046649
p [Pa]	2500	2500	2500	2500
W_{max} [m]	0,0202517	0,0151964	0,0101360	0,0050705



Obr. 22 – Porovnání průhybu z experimentu a výpočtu za předpokladu přesnějšího Poissonova čísla

Z grafu jasně vyplývá, že testováním dalších možných hodnot Poissonova čísla bylo dosaženo velice podobných výsledků, které byly získány měřením. Řádově se to liší opravdu jen o nějaké setiny, což není tak markantní rozdíl. Pochopitelně stále nelze přesně říci, jakou hodnotu má Poissonovo číslo, pokud jde o tkaniny, ale je ho možné odhadnout s větší přesností než tomu bylo na začátku této práce. Samozřejmě je nutné brát ohledy na to, že i tlak byl v tomto případě pouze parametr, který byl zvolen na základě výsledných hodnot z experimentu a jednalo se tak o kvalifikovaný odhad.

Nejdůležitější je ale průhyb jakožto jeden z nejvlivnějších parametrů pro hydrostatickou odolnost, který byl výslednou hodnotou celé práce a z grafu lze skvěle vyčíst jeho vývoj, ať už v souvislosti s naměřenými hodnotami, kdy byl průhyb prakticky konstantní nebo u vypočítaných hodnot, kdy naopak lineárně rostl v závislosti na velikosti Poissonova čísla. Čím vyšší bylo Poissonovo číslo, tím nižší byla hodnota výsledného průhybu, ale hodnota tlaku stále rostla.

Diskuze výsledků

Vzhledem k výsledným hodnotám, kterých bylo docíleno měřením a výpočty, jsme dospěli k závěru, že hodnoty z experimentu se úplně neshodují s výpočtem, tudíž použitý výpočet funguje jen částečně. Hodnoty se ale přibližují v závislosti na velikosti Poissonova čísla, což byl jeden z parametrů, který jsem si určila.

Pokud se podíváme na vzorec pro výpočet průhybu, tak s jistotou můžeme říci, že chyba určitě nebyla způsobena modulem pružnosti, průměrem ani tloušťkou, tudíž se s největší pravděpodobností jedná o chybu Poissonova čísla, které bylo určeno na základě hodnot pro jiné materiály. Abychom získali co nejpřesnější hodnotu tohoto parametru, bylo by potřeba mnoha dalších zpřesňujících měření, která by byla velice náročná. Avšak už z těchto výsledků lze přibližně odhadnout hodnotu Poissonova čísla.

Jisté také je, že průhyb roste se zvyšující se hodnotou tlaku, což je patrné z výpočtu, ale u naměřených hodnot je tento trend minimální a průhyb je prakticky konstantní.

ZÁVĚR

Cílem této diplomové práce bylo zjistit, zda lze výpočtem z mechaniky získat stejné výsledky jako experimentálním měřením odolnosti. Dále provést měření hydrostatické odolnosti na tkaninách při přírůstku tlaku 10 cmH_2O/min podle ČSN EN 20811 (80 0818), popsat průběh a rozdíly jednotlivých měření a nakonec použít vzorec aplikovatelný na zkoušené materiály pro výpočet průhybu, jenž je nejvlivnějším parametrem na hydrostatickou odolnost.

Pro praktickou část byla využita tkanina plátnové vazby. Jednalo se o dva druhy polyamidového hedvábí, kdy jedno bylo s hydrofobní úpravou a druhé bez úpravy.

Výsledky měření ukazují, že PA multifil s HF vykazuje rostoucí trend hydrostatické odolnosti v závislosti na dostavě útku. Naopak PA multifil je naprosto nezávislý na hodnotě dostavy útku a je konstantní.

Pokud jde o průhyb vzorku během měření, tak pouze u PA multifilu s HF bylo možné tuto hodnotu zjistit, neboť díky úpravě je u tohoto materiálu průhyb naprosto znatelný. Avšak u PA multifilu je průhyb při měření tak nepatrný, že by byl změřitelný pouze za využití nějaké snímací metody. Z hlediska vazby reagoval každý materiál jinak, což ale nebylo předmětem práce. Proto bylo rozhodnuto, že pro účel použití je to dostačující. Pochopitelně se nejednalo o úplně očekávaný průběh naměřeného průhybu, čímž se nabízí možnost pokračovat tímto směrem a zkusit jiný způsob měření.

Následně byl využit vztah pro tenké kruhové desky definující průhyb materiálu, jelikož se z hlediska geometrie nejvíce podobá desce, která je vetnutá po obvodu a zatížená tlakem. Zároveň se průhyb vyšetřuje pro tlak, který odpovídá hydrostatické odolnosti. Aby bylo možné tento vztah použít, bylo ještě nutné změřit tažnost zkoušeného materiálu. Nakonec, za pomoci zjištěných i určených parametrů, byl vypočítán průhyb pro zkoušené materiály.

Při konečném srovnání průhybů získaných měřením a výpočtem byla patrné, že použitý vzorec s hodnotami Poissonova čísla od 0,1 do 0,9 není úplně stoprocentní, jelikož se výsledné hodnoty úplně nepřiblížili. Avšak byl tam velký náznak toho, že jsme se od skutečné hodnoty Poissonova čísla tolik nelišili, neboť při testování dalších možných hodnot zmíněného parametru došlo k velkému přiblížení naměřené hodnotě.

Vzniklé nedostatky je možné vysvětlit nepřesností parametru Poissonova čísla, který lze jen obtížně určit pro použité materiály. Bylo by potřeba mnoho dalších zpřesňujících měření, která jsou svou složitostí velice náročná.

Nelze však jasně říci, že vzorec pro výpočet průhybu tenkých kruhových desek je v tomto případě špatně zvolen, neboť se vypočítané hodnoty částečně přiblížily hodnotám, které byly naměřené, a zároveň je průhyb nejvlivnějším parametrem na hydrostatickou odolnost. Bylo by potřeba zpřesnit výpočet průhybu.

Pochopitelně by bylo velice zajímavé tímto směrem pokračovat a pokusit se také o specifikaci Poissonova čísla, aby se dalo jednoznačně říci, zda je použití této rovnice možné pro textilní materiály.

SEZNAM LITERATURY

[1] Mechanika. *Fyzika 007*. [online]. 20.5.2016 [cit. 2016-05-20]. Dostupné z: *http://www.fyzika007.cz/mechanika/tlak-v-kapalinach-vyvolany-tihovou-silou-kapaliny—hydrostaticky-tlak*

[2] KVASNICA, Jozef. *Mechanika*. 2. vyd. Praha: Academia, 2004. ISBN 80-200-1268-0.

[3] Effects of hydrostatic pressure on strain measurement with distributed optical fiber sensing system. *ScienceDirect*. [online]. 28.12.2016 [cit. 2016-12-28]. Dostupné z: *http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610214022450*

[4] Design of a dual-core dual-hole fiber for hydrostatic pressure sensing. *ScienceDirect*. [online]. 28.12.2016 [cit. 2016-12-28]. Dostupné z: *http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0030401812001150*

[5] A differential fiber-optic transducer for hydrostatic pressure measurement. *ScienceDirect*. [online]. 28.12.2016 [cit. 2016-12-28]. Dostupné z: *http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924424798001460*

[6] Modelling woven fabric constructions under hydrostatic pressure. *ScienceDirect.* [online]. 21.5.2016 [cit. 2016-05-21]. Dostupné z: *http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168874X05001435*

[7] HES, L., SLUKA, P.: *Úvod do komfortu textilií*. Vyd. 1. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2005. 109 s. ISBN 80-7083-926-0.

[8] Co to je vodní sloupec a nepromokavost. *Cesty do přírody.* [online]. 20.5.2016 [cit. 2016-05-20]. Dostupné z: *http://www.cestydoprirody.cz/clanky/13-co-to-je-vodni-sloupec-a-nepromokavost*

[9] ČSN EN 20 811 (80 0818*). Textilie: Stanovení odolnosti proti pronikání vody – Zkouška tlakem vody.* Praha: Český normalizační institut, 1994.

[10] Automatic Hydrostatic Head Tester FX 3000 HYDROTESTER IV. *TEXTEST INSTRUMENT*. [online]. 19.5.2016 [cit. 2016-05-19]. Dostupné z: *http://www.textest.ch/en/FX3000-Hydrotester.html*

[11] KJ-3093 Hydrostatic Head Tester. *Dongguan Kejian Instrument Co.*. [online]. 19.5.2016 [cit. 2016-05-19]. Dostupné z: *http://kejian-tech.company.weiku.com/item/KJ-3093-Hydrostatic-Head-Tester-13009895.html*

[12] Hydrostatic Head Tester. Instruction manual. 19.5.2016 [cit. 2016-05-19]. Dostupné z: *http://www.sdlatlas.com*

[13] HydroPro Hydrostatic Head Tester. *SDL ATLAS*. [online]. 16.5.2016 [cit. 2016-05-16]. Dostupné z: *http://www.sdlatlas.com/product/55/HydroPro-Hydrostatic-Head-Tester#*

[14] ŠÁMAL, Oldřich. *Technická mechanika: statika*. Praha: Informatorium, 2016. ISBN 978-80-7333-122-1.

[15] Hydrodynamika. *Radek Jandora*. [online]. 21.5.2016 [cit. 2016-05-21]. Dostupné z: *http://radek.jandora.sweb.cz/f06.htm*

[16] LEČBYCHOVÁ, Jitka. *Analýza standardní metody pro hodnocení hydrostatické odolnosti textilií*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2011. Bakalářská práce

[17] DRAHOKOUPILOVÁ, Andrea. *Hodnocení odolnosti proti pronikání vody u vrchového materiálu tzv. třetí vrstvy*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2015. Bakalářská práce

[18] RÁSLOVÁ, Marcela. *Hydrostatická odolnost textilií používaných pro sport.* Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2012. Diplomová práce

[19] Flame retardant modification of waterborne polyurethane fabric coating agent with high hydrostatic pressure resistance. *ScienceDirect*. [online]. 28.12.2016 [cit. 2016-12-28]. Dostupné z: *http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0300944015302964*

[20] Mechanical properties of unidirectional organic-fiber-reinforced plastics under hydrostatic pressure. *ScienceDirect*. [online]. 28.12.2016 [cit. 2016-12-28]. Dostupné z: *http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0266353897000791*

[21] Influence of hydrostatic pressure on the mechanical behavior and properties of unidirectional, laminated, graphite-fiber/epoxy-matrix thick composites. *ScienceDirect*. [online]. 28.12.2016 [cit. 2016-12-28]. Dostupné z: *http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/1359836895000410*

[22] Effect of hydrostatic pressure on the water absorption of glass fibre-reinforced epoxy resin. *ScienceDirect*. [online]. 28.12.2016 [cit. 2016-12-28]. Dostupné z: *http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/001043618890122X*

[23] STŘÍŽ, Bohuslav. *Pružnost a pevnost. sv. 2*. Liberec: Vysoká škola strojní a textilní v Liberci, 1980.

[24] STŘÍŽ, Bohuslav. *Pružnost a pevnost. sv. 1*. 2. vyd. Liberec: Vysoká škola strojní a textilní v Liberci, 1983.

[25] ČAPEK, Lukáš. *Vlastní poznámky.* Technická univerzita v Liberci.

[26] NECKÁŘ, Bohuslav. *Morfologie a strukturní mechanika obecných vlákenných útvarů*. V Liberci: Technická univerzita, 1998. ISBN 80-7083-318-1.

[27] HÖSCHL, Cyril. *Pružnost a pevnost. sv. 2*. Liberec: Vysoká škola strojní a textilní v Liberci, 1992. ISBN 80-7083-104-9.

[28] PAŘILOVÁ, Hana. *Typologie tkanin - textilní zbožíznalství.* Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2011. ISBN 978-80-7372-674-4.

[29] DRAŠAROVA, J. a J. NOVAČKOVA. Projektovaní vlastnosti přízí a plošných textilii Novaspin: Hodnocení struktury a vlastností tkanin vyrobených z přízí prstencových, rotorových a experimentálních. [online]. [cit. 2017-01-08]. Dostupné z: *http://centrum.tul.cz/centrum/centrum/1Projektovani/1.1_zaverecne_zpravy/ [1.1.11].pdf.* Technická univerzita v Liberci.

[30] DRAŠAROVÁ, Jana. Délkové a plošné textilie se speciální funkcí. *Katedra materiálového inženýrství.* [online]. 24.5.2016 [cit. 2016-05-24]. Dostupné z: *http://www.kmi.tul.cz/studijni_materialy/data/2014-01-13/10-07-25.pdf*

[31] ČAPKOVÁ, Lucie. *Hodnocení prodyšnosti bavlnářských tkanin s plátnovou vazbou.* Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2010. Diplomová práce.

[32] Hrůza, Jakub. Textilie pro průmyslové aplikace – filtrace. *Jakub Hrůza – osobní stránky.* [online]. 10.1.2017 [cit. 2017-01-10]. Dostupné z: *http://files.jakub-hruza.webnode.cz/200000007-c8f1ccae47/tpa2%20porozita.doc*

[33] Textilní zbožíznalství 1. *Turbo.* [online]. 24.11.2016 [cit. 2016-11-24]. Dostupné z: *https://turbo.cdv.tul.cz/mod/book/view.php?id=2363&chapterid=3441*

[34] Textilní výkladový slovník. *TEXSITE.info*. [online]. 24.11.2016 [cit. 2016-11-24]. Dostupné z: *http://cz.texsite.info/Polyamidov%C3%A9_vl%C3%A1kno_(PAD)%3B_nylon*

[35] CHALUPSKÝ, Jaroslav a Jiří BLAŽEK. *Polyamidová vlákna.* Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1962.

[36] DEMBICKÝ, Josef, Jiří KRYŠTŮFEK, Dagmar MACHAŇOVÁ, Jaroslav ODVÁRKA, Miroslav PRÁŠIL a Jakub WIENER. *Zušlechťování textilií*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2008. ISBN 978-80-7372-321-7.

[37] OCHERETNA, Larysa. *Textilní zboží ze syntetických vláken.* Technická univerzita v Liberci. Textilní zbožíznalství 1 – přednáška.

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1: (a) Průřez navrhovaného DCDHF a (b) Schéma snímače tlaku na bázi DCDHF D: vnější průměr DCDHF; d: průměr ze dvou jader vlákna; H: vzdálenost od středu ke středu mezi oběma jádry vlákna; R: poloměr dvou velkých vzduchových otvorů; L: vzdálenost mezi vzduchovým otvorem a středem DCDHF; L_S: délka DCDHF; SMF: monofilové vlákno; výsledné hodnoty v desítkách μm [4]

Obr. 2: Přístroj Hydrostatic Head Tester M018 [13]

Obr. 3: Možné případy zatížení osově symetrické ohýbané desky [23]

Obr. 4: Rovnováha myšleného válcového řezu desky [23]

Obr. 5: Znázornění obvodové síly Q(r) v myšleném řezu [23]

Obr. 6: Znázornění radiálních a tečných momentů v myšleném řezu desky [23]

Obr. 7: Vyznačení průhybu desky a sklonu ohybové roviny [23]

Obr. 8: Schéma určené pro výpočet radiální a tečné deformace [23]

Obr. 9: Znázornění napjatosti na myšleném řezu desky [23]

Obr. 10: Prohnutá membrána [24]

Obr. 11: Plátnová vazba (střída 2x2) [28]

Obr. 12: Podstata bublinkové metody [32]

Obr. 13: Vzhled polyamidového vlákna [35]

Obr. 14: Plošná hmotnost PA multifilu

Obr. 15: Plošná hmotnost PA multifilu s HF

Obr. 16: Hydrostatická odolnost PA multifilu

Obr. 17: Hydrostatická odolnost PA multifilu s HF

Obr. 18: Průnik třech kapek přes PA multifil s HF

Obr. 19: Výsledné hodnoty průhybu získané výpočtem

Obr. 20: Výsledné hodnoty průhybu získané měřením

Obr. 21: Porovnání hodnot průhybu z experimentu a výpočtu

Obr. 22: Porovnání průhybu z experimentu a výpočtu za předpokladu přesnějšího Poissonova čísla

SEZNAM TABULEK

Tab. 1: PA multifil - parametry

Tab. 2: PA multifil s HF - parametry

Tab. 3: Plošná hmotnost PA multifilu

Tab. 4: Plošná hmotnost PA multifilu s HF

Tab. 5: Hustota PA multifilu

Tab. 6: Hustota PA multifilu s HF

Tab. 7: Základní nastavení přístroje

Tab. 8: Hydrostatická odolnost PA multifilu

Tab. 9: Hydrostatická odolnost PA multifilu s HF

Tab. 10: Výpočet maximálního průhybu PA multifilu s HF (1. část)

Tab. 11: Výpočet maximálního průhybu PA multifilu s HF (2. část)

Tab. 12: Vypočítané hodnoty tlaku PA multifilu

Tab. 13: Vypočítané hodnoty tlaku PA multifilu s HF

Tab. 14: Naměřený průhyb PA multifilu s HF

Tab. 15: Vypočítaný průhyb na základě přesnějšího Poissonova čísla

PŘÍLOHY

Příloha č. 1:

Tab. 1 – Analýza hmotnosti PA multifilu

Dostava útku [nití/cm]	Průměr hmot. [g]	Sm. odch.	Rozptyl	Var. koef. [%]	Konf. [-]	Dolní mez 95% IS	Horní mez 95% IS
12	5,01	0,0599	0,0036	1,1951	0,0371	4,97	5,05
14	5,33	0,0727	0,0053	1,3652	0,0451	5,28	5,37
16	5,49	0,0525	0,0028	0,9557	0,0325	5,46	5,52
18	5,79	0,0731	0,0053	1,2637	0,0453	5,74	5,83
20	5,95	0,0598	0,0036	1,0056	0,0371	5,91	5,98

Tab. 2 – Analýza hmotnosti PA multifilu s HF

Dostava útku [nití/cm]	Průměr hmot. [g]	Sm. odch.	Rozptyl	Var. koef. [%]	Konf. [-]	Dolní mez 95% IS	Horní mez 95% IS
12	4,95	0,0636	0,0040	1,2850	0,0394	4,91	4,99
14	5,09	0,0469	0,0022	0,9225	0,0291	5,06	5,11
16	5,35	0,0422	0,0018	0,7895	0,0262	5,32	5,37
18	5,68	0,0451	0,0020	0,7939	0,0280	5,65	5,71
20	5,93	0,0677	0,0046	1,1416	0,0419	5,88	5,97

Tab. 3 – Analýza plošné hmotnosti PA multifilu

Dostava útku [nití/cm]	Průměr plošné hmot. [g/m^2]	Sm. odch. [m]	Rozptyl [m^2]	Var. koef. [%]	Konf. [-]	Dolní mez 95% IS [m]	Horní mez 95% IS [m]
12	125,26	1,497	2,241	1,195	0,928	124,33	126,19
14	133,14	1,818	3,304	1,365	1,127	132,01	134,27
16	137,30	1,312	1,722	0,956	0,813	136,49	138,12
18	144,65	1,828	3,341	1,264	1,133	143,52	145,79
20	148,69	1,495	2,236	1,006	0,927	147,76	149,62

Tab. 4 – Analýza plošné hmotnosti PA multifilu s HF

Dostava útku [nití/cm]	Průměr plošné hmot. [g/m^2]	Sm. odch. [m]	Rozptyl [m^2]	Var. koef. [%]	Konf. [-]	Dolní mez 95% IS [m]	Horní mez 95% IS [m]
12	123,71	1,590	2,527	1,285	0,985	122,73	124,70
14	127,13	1,173	1,376	0,923	0,727	126,40	127,86
16	133,68	1,055	1,114	0,789	0,654	133,02	134,33
18	142,03	1,128	1,272	0,794	0,699	141,34	142,73
20	148,17	1,692	2,861	1,142	1,048	147,12	149,22

Příloha č. 2:

Tab. 5 – Analýza tloušťky PA multifilu

Dostava útku [nití/cm]	Průměr tloušť. [mm]	Sm. odch. [mm]	Rozptyl [mm^2]	Var. koef. [%]	Konf. [-]	Dolní mez 95% IS [mm]	Horní mez 95% IS [mm]
12	0,23	0,004830	0,000023	2,127955	0,002994	0,22	0,23
14	0,23	2,93E-17	8,56E-34	1,27E-14	1,813E-17	0,23	0,23
16	0,23	2,93E-17	8,56E-34	1,27E-14	1,813E-17	0,23	0,23
18	0,23	0,004830	0,000023	2,073158	0,002994	0,23	0,24
20	0,24	0,003162	0,000010	1,323129	0,001960	0,24	0,24

Tab. 6 – Analýza tloušťky PA multifilu s HF

Dostava útku [nití/cm]	Průměr tloušť. [mm]	Sm. odch. [mm]	Rozptyl [mm^2]	Var. koef. [%]	Konf. [-]	Dolní mez 95% IS [mm]	Horní mez 95% IS [mm]
12	0,23	0,005270	0,000028	2,342428	0,003267	0,22	0,23
14	0,23	0,004830	0,000023	2,073158	0,002994	0,23	0,24
16	0,23	2,93E-17	8,56E-34	1,27E-14	1,813E-17	0,23	0,23
18	0,24	0,005270	0,000028	2,242750	0,003267	0,23	0,24
20	0,24	5,85E-17	3,42E-33	2,44E-14	3,627E-17	0,24	0,24

Tab. 7 – Analýza hustoty PA multifilu

Dostava útku [nití/cm]	Průměr hustoty [kg/m^3]	Sm. odch.	Rozptyl	Var. koef. [%]	Konf. [-]	Dolní mez 95% IS	Horní mez 95% IS
12	552,03	13,27	176,07	2,40	8,22	543,81	560,26
14	578,87	7,90	62,46	1,37	4,90	573,98	583,77
16	596,98	5,71	32,55	0,96	3,54	593,44	600,51
18	621,05	14,31	204,76	2,30	8,87	612,19	629,92
20	622,20	7,87	61,98	1,27	4,88	617,32	627,08

Tab. 8 – Analýza hustoty PA multifilu s HF

Dostava útku [nití/cm]	Průměr hustoty [kg/m^3]	Sm. odch.	Rozptyl	Var. koef. [%]	Konf. [-]	Dolní mez 95% IS	Horní mez 95% IS
12	550,05	12,02	144,53	2,19	7,45	542,60	557,50
14	545,88	14,28	203,85	2,62	8,85	537,03	554,73
16	581,21	4,59	21,05	0,79	2,84	578,36	584,05
18	604,68	14,44	208,45	2,39	8,95	595,73	613,63
20	617,37	7,05	49,68	1,14	4,37	613,00	621,74

Příloha č. 3:

Tab. 9 – Analýza hydrostatické odolnosti PA multifilu

Dostava útku [nití/cm]	Průměr mmH_2O	Sm. odch.	Rozptyl	Var. koef. [%]	Konf. [-]	Dolní mez 95% IS	Horní mez 95% IS
12	94,5	18,61	346,50	19,70	11,54	82,96	106,04
14	93,3	11,03	121,57	11,82	6,83	86,47	100,13
16	92,2	11,08	122,84	12,02	6,87	85,33	99,07
18	92,0	9,33	87,11	10,14	5,78	86,22	97,78
20	94,9	12,50	156,32	13,17	7,75	87,15	102,65

Tab. 10 – Analýza hydrostatické odolnosti PA multifilu s HF

Dostava útku [nití/cm]	Průměr mmH_2O	Sm. odch.	Rozptyl	Var. koef. [%]	Konf. [-]	Dolní mez 95% IS	Horní mez 95% IS
12	144,4	11,20	125,38	7,75	6,94	137,46	151,34
14	162,7	10,92	119,34	6,71	6,77	155,93	169,47
16	190,9	7,82	61,21	4,10	4,85	186,05	195,75
18	215,9	20,49	419,66	9,49	12,70	203,20	228,60
20	240,4	24,86	618,04	10,34	15,41	224,99	255,81

Tab. 11 – Analýza doby měření PA multifilu

Dostava útku [nití/cm]	Průměr doby měření [s]	Sm. odch. [s]	Rozptyl [s^2]	Var. koef. [%]	Konf. [-]	Dolní mez 95% IS [s]	Horní mez 95% IS [s]
12	40,50	16,80	282,10	41,47	10,41	30,09	50,91
14	40,50	15,27	233,14	37,70	9,46	31,04	49,96
16	40,86	14,56	212,04	35,64	9,03	31,83	49,89
18	43,89	16,70	279,04	38,06	10,35	33,54	54,24
20	44,74	18,23	332,39	40,75	11,30	33,44	56,04

Tab. 12 – Analýza doby měření PA multifilu s HF

Dostava útku [nití/cm]	Průměr doby měření [s]	Sm. odch. [s]	Rozptyl [s^2]	Var. koef. [%]	Konf. [-]	Dolní mez 95% IS [s]	Horní mez 95% IS [s]
12	80,70	8,67	75,14	10,74	5,37	75,33	86,07
14	82,44	12,41	154,10	15,06	7,69	74,75	90,13
16	108,06	18,62	346,84	17,23	11,54	96,52	119,60
18	117,06	17,89	320,20	15,29	11,09	105,97	128,15
20	126,12	21,61	466,94	17,13	13,39	112,73	139,51