



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta strojní

Ústav mechaniky tekutin a termodynamiky

Měření polár profilů pro lodní oplachtění

Measurement of sail airfoil polars

Bakalářská práce

Vedoucí práce: Ing. Vít Štorch

Studijní program: Teoretický základ strojního inženýrství

Studijní obor: bez oboru

Jan Mixa

Praha 2017

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem práci „Měření polár profilů pro lodní oplachtění“ vypracoval samostatně pod vedením Ing. Víta Štorcha, s použitím literatury uvedené v seznamu použité literatury.

V Praze dne 28.7.2017

.....

Poděkování:

Za pomoc a vstřícné jednání děkuji všem laboratorním technikům a zaměstnancům Ústavu mechaniky tekutin a termodynamiky. Především ale děkuji svému vedoucímu práce Ing. Vítu Štorchovi za jeho nedocenitelnou pomoc, trpělivost a nadstandardní množství času jež věnoval této práci.

Anotace:

Jméno autora:	Jan Mixa
Název bakalářské práce:	Měření polár profilů pro lodní oplachtění
Anglický název:	Measurement of sail airfoil polars
Rok:	2017
Studijní obor:	Teoretický základ strojního inženýrství
Obor studia:	Bez oboru
Ústav:	Ústav mechaniky tekutin a termodynamiky
Vedoucí bakalářské práce:	Ing. Vít Štorch
Bibliografické údaje:	počet stran: 52 počet obrázků: 56 počet příloh: 2
Klíčová slova:	Lodní oplachtění, Aerodynamické váhy, polára profilu, profil NACA 0012, profil NACA 4415
Keywords:	Yacht sails, Wind-tunnel balances, polar diagram, NACA 0012 profile, NACA4415 profile
Anotace:	Tato práce se zabývá problematikou lodního oplachtění, popisem fyzikálního modelu plachetnice a návrhem alternativního oplachtění. Dále se práce zabývá návrhem a stavbou aerodynamických vah určených k měření polár profilů. V poslední části se práce zabývá měřeními leteckých profilů, lodní plachty a křídlové plachty.
Abstrakt:	This work is focused on the problem of yacht sails, the description of physical model of a sailboat and alternative yacht sail designs. Additionally, the work deals with the design and construction of wind tunnel balances designed to polar diagram measurement. In the last part, the work covers measurement of wing profile and wing sail.

Obsah

Použité veličiny a jejich jednotky	7
1. Úvod.....	8
2. Aerodynamika leteckých profilů, polára profilu	9
3. Fyzikální model plachetnice	11
3.1. Síly působící na plachtu	11
3.2. Síly laterálu, silová rovnováha plachetnice.....	12
3.3. Aerodynamika plachty, její charakteristiky	14
3.3.1. Základní pojmy	14
3.3.2. Zjednodušený fyzikální model plachty	14
3.3.3. Polára plachty, Sail polar diagram	17
3.3.4. Alternativní lodní oplachtění.....	18
4. Aerodynamické váhy	20
4.1. Možné konstrukce aerodynamických vah	20
4.2. Aerodynamické váhy pro měření oplachtění	21
5. Návrh a realizace vah	22
5.1. Rozbor sil měřených na vahách	22
5.2. Mechanismus přenosu sil z modelu na tenzometrické členy	23
5.3. Rám	26
5.4. Volba Tenzometrů.....	27
5.4.1. Návrhové výpočty pro vztlakové a odporové tenzometry.....	27
5.4.2. Výběr konkrétních vztlakových a odporových tenzometrů	28
5.4.3. Návrhový výpočet pro tenzometry měřící klopný moment.....	29
5.4.4. Výběr konkrétních tenzometrů pro měření klopného momentu	30
6. Návrh korekcí vah	31
7. Návrh a realizace modelů pro měření	32
7.1. Návrh profilů.....	32
7.2. Výroba modelů.....	34

7.2.1.	Samotné model s uzavřenými profily.....	34
7.2.2.	Mechanismus pro upevnění modelu k vahám.....	34
7.3.	Model měkké plachty.....	35
8.	Výsledky měření.....	36
8.1.	Model s profilem NACA 0012.....	36
8.2.	Model s profilem NACA 4415.....	38
8.3.	Model s profilem NACA 4415 – Oboustranný profil.....	40
8.4.	Model Plachty.....	43
8.5.	Model s profilem ETNZ.....	45
9.	Srovnání naměřených výsledků.....	47
10.	Závěr.....	51
	Použité zdroje.....	52

Použité veličiny a jejich jednotky

znak	jednotka	název
F	[N]	obecná aerodynamická síla
F_L	[N]	vztlaková složka aerodynamické síly
F_D	[N]	odporová složka aerodynamické síly
C_l	[-]	součinitel vztlaku
C_d	[-]	součinitel odporu
α	[°]	úhel náběhu
A	[m ²]	plocha
ρ	[kg/m ³]	hustota vzduchu
v_∞	[m/s]	rychlost nerušeného proudění
Re	[-]	Reynoldsovo číslo
ν	[Ns/m ²]	kinematická viskozita vzduchu
b	[m]	charakteristický rozměr
M	[Nm]	silový moment
F_h	[N]	hnací síla
F_b	[N]	boční síla
β	[°]	úhel driftu
F_{vzl}	[N]	vztlaková složka síly laterálu
F_{ol}	[N]	odporová složka síly laterálu
F_l	[N]	síla laterálu
c	[m]	tětiva
f	[m]	hloubka profilu
m	[m]	poloha břicha
C_Z	[-]	součinitel zaplnění tunelu
A_B	[m ²]	plocha průřezu zabraná měřeným tělesem
A_P	[m ²]	plocha průřezu tunelu

1. Úvod

Jelikož objem námořní přepravy se neustále zvyšuje a ceny paliv rostou, stále více renomovaných firem se ve svých vizích vrací k základům námořní přepravy, k plachtění. Nejedná se přitom o lodě poháněné výhradně větrem, ale o systém úspory paliva v řádech malých desítek procent.

Pro dnešní komerční plavidla ale už nejsou klasické plachty po vzoru historických lodí vhodné, zejména pro svou komplikovanost a náročnou obsluhu. Je zapotřebí nových systémů s vysokým výkonem, jež navíc budou řízeny zcela automaticky. Obdobně jako u motorismu, i v plachtění jsou na vrcholu vývoje závodní stroje. Ty dnes využívají kromě klasických plachet i pevná křídla vztyčená místo stěžně. A právě tomuto tématu bude věnována tato práce.

První část bude věnována základům aerodynamiky obtékaných těles, bude sestaven základní fyzikální model plachetnice a popsána aerodynamika plachty. Také se budeme krátce věnovat moderním alternativám ke klasickému oplachtění.

Tato práce si dala za cíl porovnat několik profilů, použitelných jako alternativu ke klasické lodní plachtě. K tomu bude zapotřebí navrhnout a sestrojít měřicí zařízení, pomocí kterého budeme moci jednotlivé profily, případně plachty, měřit a porovnávat. A právě tomuto tématu se budeme věnovat v druhé části práce. Podrobně si popíšeme návrh a konstrukci aerodynamických vah a následně i modelů, které v rámci této práce změříme a porovnáme.

V poslední části práce se potom budeme věnovat výsledkům, které naměříme a jejich vzájemnému srovnání. Měření budou modely s klasickými leteckými profily z rodiny „NACA“, klasická měkká plachta, model křídlové plachty, jež odpovídá moderním závodním plachetnicím kategorie AC72 a model, jež vznikl na základě leteckého profilu NACA 4415 jako „konkurenční“ k této křídlové plachtě. Tyto profily mají specifickou schopnost měnit smysl úhlu náběhu, tedy umožňují lodi plout jak na vítr z pravoboku, tak z levoboku. Těmto profilům, a jejich srovnání s klasickou plachtou bude věnována největší pozornost.

Výstupem práce potom budou výsledky měření především ve formě grafů popisujících chování profilů při různých rychlostech obtékání a pod různými úhly náběhu, z nichž se pokusíme určit nejvhodnější profil pro pohon lodi, a funkční aerodynamické váhy na měření 2D profilů v laboratoři mechaniky tekutin.

2. Aerodynamika leteckých profilů, polára profilu

Na těleso obtékající proudem tekutiny působí tato tekutina silami. Na tělesa symetrická vůči vektoru rychlosti obtékající tekutiny působí pouze síla odporová:

$$F_D = C_d \cdot A \cdot \rho \cdot \frac{v_\infty^2}{2} \quad (1)$$

kde F_D je síla ve směru proudění tekutiny, A charakteristická plocha profilu (v případě křídla jeho půdorys), ρ hustota tekutiny, v_∞ rychlost nenarušeného proudění a C_d součinitel odporu vzduchu. [1]

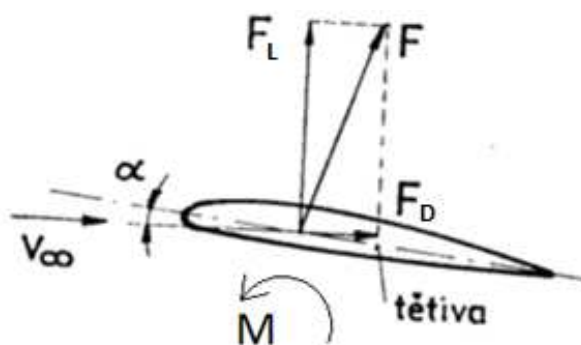
Pro těleso nesymetrické dle vektoru rychlosti obtékající tekutiny platí dále vztah pro sílu vztakovou [1]:

$$F_L = C_l \cdot A \cdot \rho \cdot \frac{v_\infty^2}{2} \quad (2)$$

kde F_L je síla kolmá na směr obtékající tekutiny a C_l je součinitel vztlaku. Z obr. 1 je patrné, že výsledná síla, kterou působí obtékající tekutina na profil je:

$$F = \sqrt{F_D^2 + F_L^2} \quad (3)$$

Na obr. 1 je také patrné, že dané síly platí pouze pro daný úhel náběhu α . Pokud budeme



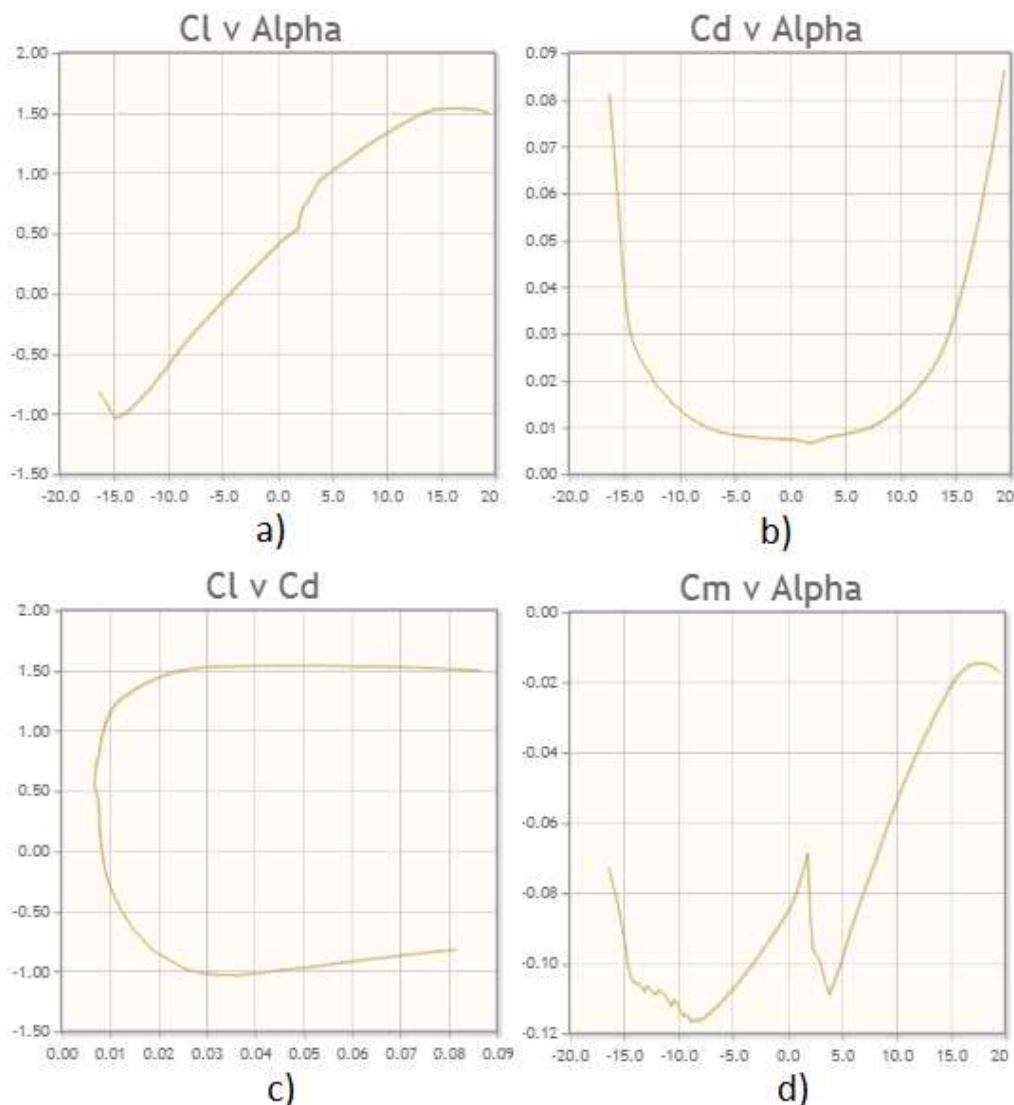
Obrázek 1: Znárodnění sil působících na obtékáný profil [1]

tento úhel měnit, budeme měnit i chování tělesa a tyto síly. Součinitele odporu C_d a vztlaku C_l jsou tedy závislé na úhlu náběhu α . [1]

Příklad této závislosti (pro profil NACA 4415)¹ je znázorněna na obr. 2a a 2b. Je patrné, že součinitel vztlaku roste přibližně lineárně, až do odtržení obtékajícího proudu na sací (horní) straně, zatímco součinitel odporu roste s rostoucím úhlem náběhu v kladném i záporném směru. [2]

¹ Charakteristiky související se součiniteli C_d a C_l obvykle popisujeme pro profil, čímž je myšlen bokorys daného obtékaného tělesa. Pokud bychom chtěli vypočítat síly působící na profil, je třeba vydělit sílu vypočtenou ve vzorci (1) a (2) hloubkou profilu. Výsledkem je jednotková síla na profil [N/m] nekonečné délky se zanedbáním koncových jevů. Nemá-li těleso konstantní tento bokorys, stává se silový výpočet komplikovanější a rovnice uvedené v této kapitole již k němu nedostačují. [3]

Na obr. 2c je potom znázorněna závislost součinitele vztlaku C_l na součiniteli odporu C_d , neboli polára profilu. Každý bod poláry potom pro daný úhel náběhu ukazuje konkrétní hodnoty součinitelů C_d a C_l . [1]



Obrázek 2 a) Závislost C_d na úhlu náběhu; b) Závislost C_l na úhlu náběhu
c) polára profilu; d) Závislost C_m na úhlu náběhu [4]

Součinitele C_d a C_l se dají zjistit experimentálně, případně numericky. [2]

Posledním silovým účinkem znázorněným na obr. 1 je klopný moment M . Opět vzniká pouze u nesymetricky obtékaného tělesa a lze ho snadno určit pomocí vztahu [2]:

$$M = C_m \cdot \rho \cdot A \cdot b \cdot \frac{v_\infty^2}{2} \quad (4)$$

kde b je charakteristický rozměr měřeného profilu (v případě křídla tětiva) a C_m součinitel klopného momentu. Závislost součinitele C_m na úhlu náběhu je zobrazena na obr. 2d.

Kromě výše zmíněných veličin závisí součinitele také na Reynoldsově čísle, proto je třeba měřit daný profil vždy jen pro určité Reynoldsovo číslo. Právě polára profilů bude měřena v experimentální části práce. Reynoldsovo číslo určíme dle známého vztahu:

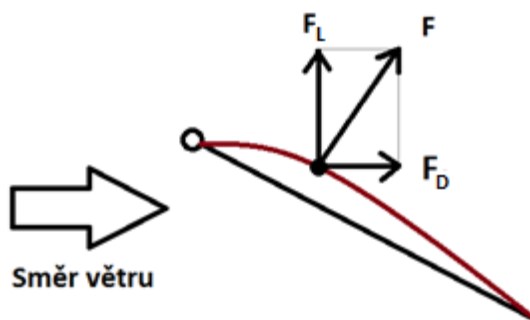
$$Re = \frac{v_{\infty} \cdot b}{\nu} \quad (5)$$

kde ν je kinematická viskozita obtékající tekutiny. [2]

3. Fyzikální model plachetnice

3.1. Síly působící na plachtu

Je zřejmé, že aby se loď pohybovala, musí na ní plachta působit určitou silou F , vyvolanou větrem na plachtu působícím. Výslednou sílu F , kterou plachta působí na loď můžeme vektorově rozložit do dvou složek, odporové síly F_D a vztlakové síly F_L viz. obr. 3. [5]



Obr. 3: Síly, jež způsobuje vítr na plachtě

Síla odporová F_D působí ve shodném směru s proudícím vzduchem a má brzdný účinek při plavbě proti větru, naopak při plavbě na zadní a zadoboční vítr² je právě tato složka stěžejní pro pohyb lodi vpřed. [5]

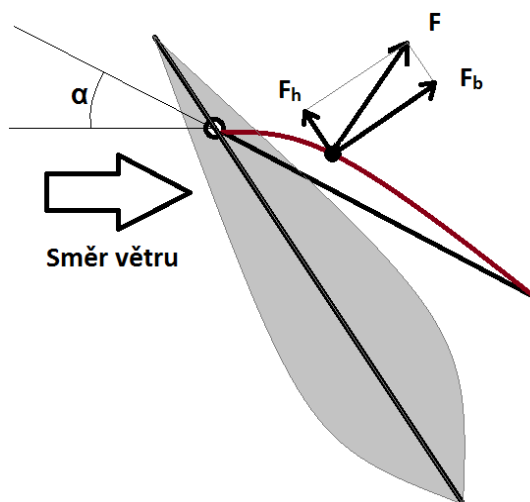


Obrázek 4: Plavba s využitím odporové (vlevo) a vztlakové (vpravo) síly

² Vítr se v námořní terminologii označuje dle směru vůči lodi. Přední vítr fouká přímo proti přídi, zadní ve směru opačném. Boční vítr fouká kolmo na trup a předoboční, případně zadoboční vítr je kombinací větru předního (zadního) a bočního.

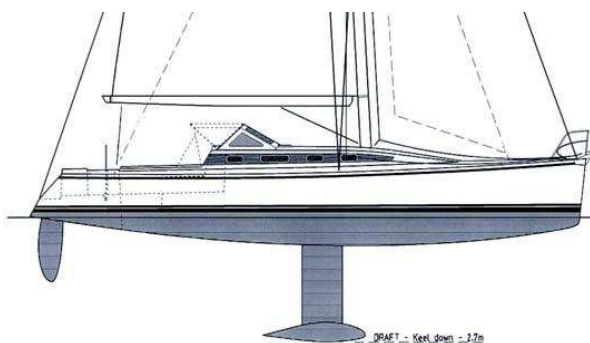
Síla vztaková F_L vzniká u plachty stejným mechanismem jako v případě křídla. Rozdíl je, že u plachty můžeme snadno měnit jak úhel náběhu, tak i její tvar v závislosti na podmínkách. Problematické při plavbě ve vztakovém režimu je nutnost precizního nastavení plachet a následné držení konstantního úhlu plachet vůči větru. I malá změna úhlu způsobí velké ztráty vztlaku. Zejména za nestabilního větru je tedy třeba zkušené vedení lodi. [5]

3.2. Síly laterálu, silová rovnováha plachetnice



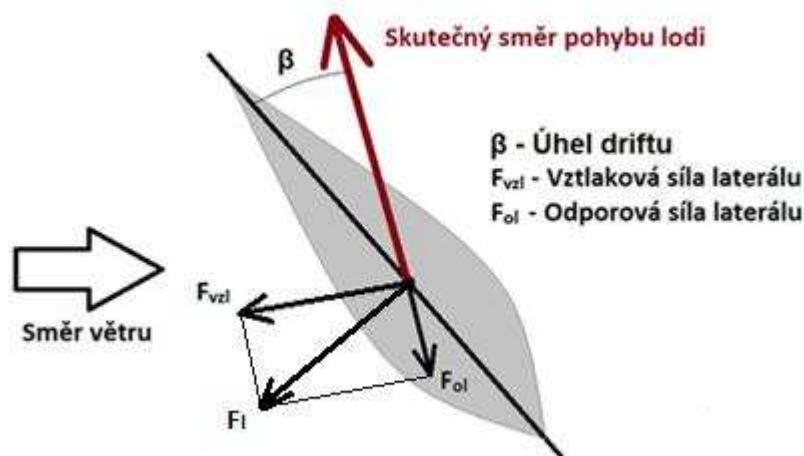
Obr. 5: Síly, jimiž působí plachta na loď

Z obr. 5 je patrné, že pokud bude síla F rozložena na boční sílu F_b a hnací sílu F_h , boční síla F_b je výrazně větší než síla hnací F_h . Historicky byl tento problém řešen především pomocí vhodného tvarování trupu lodi. Bylo zapotřebí dosáhnout toho, aby odpor trupu ve směru boční síly F_b byl mnohonásobně vyšší než odpor ve směru pohybu lodi. Ideálním způsobem je využití lodního kýlu (obdélníkového profilu ponořeného kolmo pod trup v ose lodi, obr. 6). [5]



Obr. 6: Znárodnění laterálu lodi s výrazným kýlem [6]

Kýl má díky velké boční ploše (neboli *laterálu*, obr. 6, tmavá část [5]) vysoký odpor v bočním směru, ale jen minimální odpor ve směru pohybu lodi, což omezuje pohyb lodi ve směru boční síly (Drift). Tento pohyb ale nikdy nelze zcela eliminovat, loď tedy nikdy nepluje ve směru své podélné osy, ale částečně splouvá po větru. Díky tomu je kýl vychýlen od směru pohybu a voda ho tím pádem neobtéká rovnoměrně z obou stran, čímž způsobuje společně se zbytkem laterálu trupu



Obr. 7: Rozbor sil laterálu

vztlak obdobným způsobem, jako křídlo se symetrickým profilem (Pro většinu sportovních plachetnic je tedy ideální tvar kýlu dlouhý a štíhlý, obr. 6). Síly vznikající na Laterálu jsou znázorněny na obr. 7. [7]

Pro pohyb lodě daným směrem je tedy potřebné dosáhnout silové rovnováhy. Boční síla F_b je částečně kompenzována silou laterálu F_{vzl} , čímž je omezen drift, ale vzniká moment, který loď naklání. Tento moment vychyluje metacentrum (těžiště vztlakových sil trupu) a těžiště lodi, jež potom společně vytváří moment, který působí proti momentu sil plachty a laterálu. Nezbytné je také držet úhel driftu β tak, aby byl kýl obtékán bez odtržení a nedocházelo ke vztlakovým ztrátám a nárůstu odporu. [7]

Tvar kýlu se může velmi lišit v závislosti na potřebách dané lodi a podmínkách, v jakých bude pracovat (omezení ponoru apod.). Často je kýl ve spodní části vybaven mohutným závažím (například jako na obr. 6), jež přispívá k udržení svislé polohy lodi. Dále je možné vybavit kýl dvojicí nerovnoběžných kýlů, jež mají optimální vztlakové vlastnosti i pokud je loď v náklonu. [7]

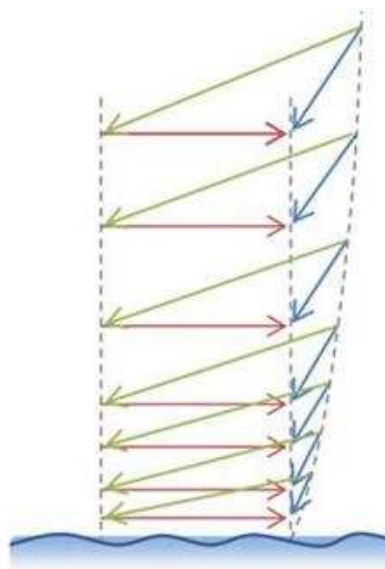
Při plavbě na zadní a zadoboční vítr plachta neprodukuje vztlakovou sílu (v případě zadobočního větru zanedbatelnou) a tedy ani žádnou boční sílu F_b , nedochází tedy k driftu a trup lodi je obtékán rovnoměrně, nevzniká tedy ani vztlaková síla laterálu F_{vzl} a kýl v tuto chvíli pouze zvyšuje odpor. U některých závodních plachetnic je proto možné ho zatáhnout do lodi, čímž loď sníží odpor. [5]

3.3. Aerodynamika plachty, její charakteristiky

3.3.1. Základní pojmy

Plachta je tzv. měkký profil, je tedy nastavitelná v mnoha ohledech. Důležitý je pro nás úhel náběhu a tvar plachty.

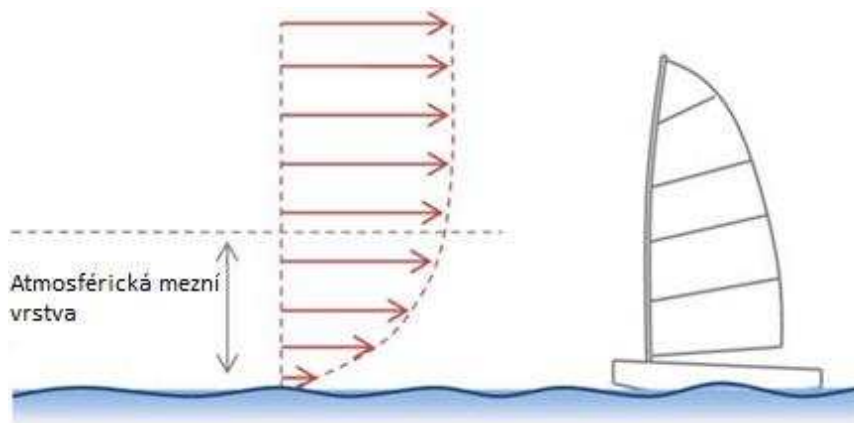
Úhel náběhu je úhel, který svírá směr proudění vzduchu s tětivou plachty (tedy spojnici předního a zadního lemu plachty). Na úhlu náběhu silně závisí aktuální nastavení plachet. Důležité je, že úhel náběhu je brán vůči *zdánlivému větru*, tedy větru, který je vektorovým součtem skutečného a *jízdního větru* (Obr. 8). V případě, že se loď pohybuje proti větru, je zdánlivý vítr vždy větší než vítr skutečný, plachetnice si tedy svým pohybem zvyšuje i rychlost větru na plachtě a tím vztlak, který ji pohání vpřed (vzhledem k rychle se zvyšujícímu odporu trupu, ale rychlost brzy stoupat přestane) Naopak pokud se loď pohybuje po větru, je zdánlivý vítr menší než vítr skutečný. [8]



Obrázek 8: Znárodnění zdánlivého větru. Červeně je znázorněn jízdní vítr, modře skutečný vítr, zeleně zdánlivý vítr [9]

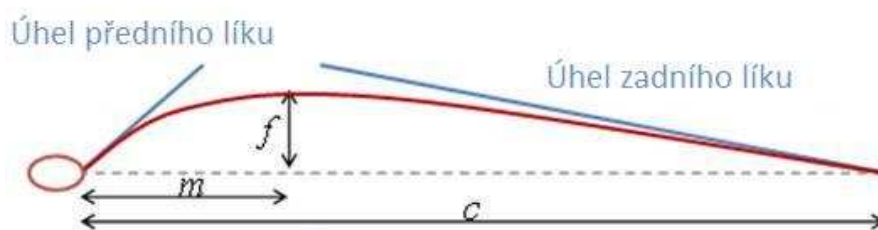
3.3.2. Zjednodušený fyzikální model plachty

Jelikož váhy, jejichž návrh a stavba budou popsány v této práci, jsou koncipovány k měření polár modelů s konstantním profilem, musí i model plachty, jež bude pro měření použit, mít konstantní profil po celé délce. Reálná plachta toto ale nesplňuje, a proto je zapotřebí provést několik zjednodušení. Skutečná plachta na běžné sportovní plachetnici má tvar blízký trojúhelníku. Také rychlostní profil skutečného větru směrem vzhůru od hladiny vodní plochy je nekonstantní, což je patrné z obr. 9 (nebo též z obr. 8).



Obrázek 9: Rychlostní profil větru při hladině rozlehlé vodní plochy [9]

Problematické při převedení plachty na model o konstantním průřezu je, že tvar plachty se s různou výškou od hladiny liší. S rostoucí rychlostí skutečného větru směrem od hladiny se mění i směr zdánlivého větru. Bude-li na plachtu pohlíženo jako množství vodorovných profilů nad sebou, bude na tyto profily v různých výškách působit proudění o rozdílné rychlosti a v rozdílném směru, což má za následek jejich rozdílné zdeformování (rozdílné hodnoty f a m na obr. 10). [9]



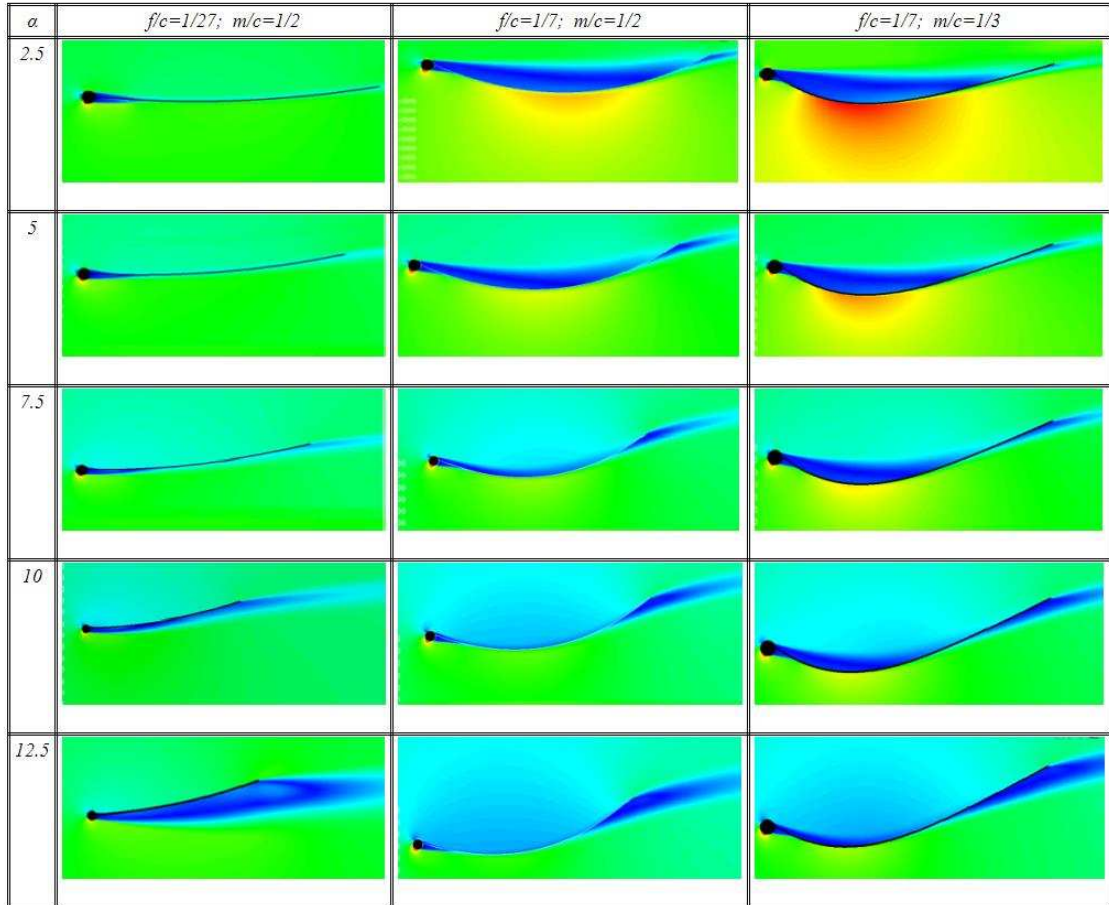
Obrázek 10: Řez plachtou - zobrazení jejího profilu [9]

Na obr. 10 je zobrazen a popsán obecný profil plachty. Hodnota c se nazývá *tětiva* (a je charakteristickým rozměrem), hodnota f hloubka profilu (běžně používaný je výraz „břicho“) a hodnota m udává pozici břicha, často vyjadřovanou v procentech délky tětivy. [5]

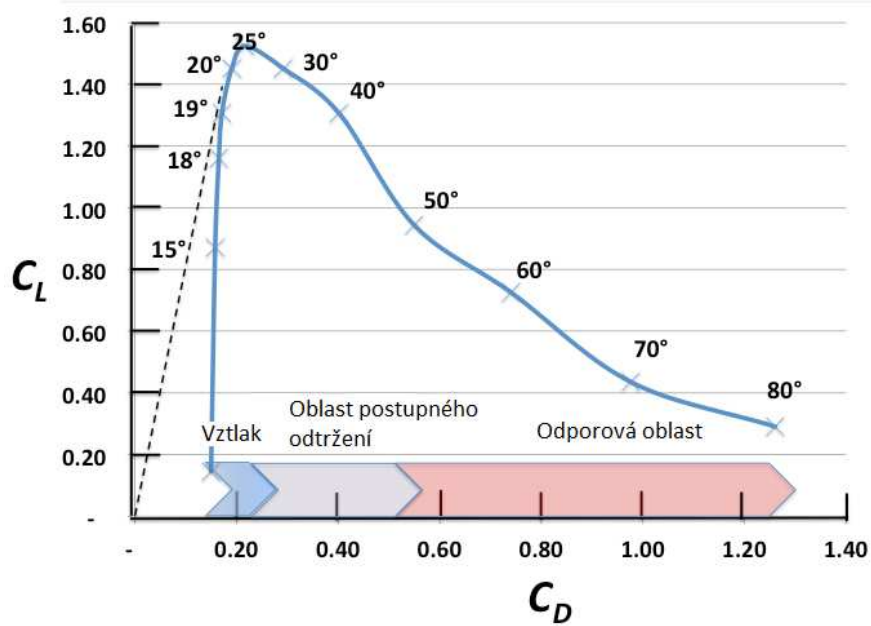
Je zde dobře patrná analogie s leteckým profilem. Největší odlišnost je na „náběžné hraně“, která je (v případě hlavní plachty, kterou se zabýváme) zastíněna stěžněm, díky čemuž se zde může vytvářet nežádoucí oblast odtržení proudění. [9]

Toto je dobře patrné z výsledků simulace provedené Damienem Lafforguem na University of Southampton v roce 2007. Výsledky jsou zobrazeny na obr. 11. V simulaci byly uvažovány pevné profily tvaru popsáno v tabulce. Odpovídají různému vypnutí plachty, různé poloze břicha a různým úhlům náběhu. Barevné schéma popisuje rychlost proudění (zelená nejpomalejší, červená nejrychlejší). Dále na obr. 11 můžeme vidět vhodnost různého nastavení plachet pro různé úhly náběhu. Je evidentní, že pro jeden tvar plachty a různé úhly náběhu budou různé hodnoty součinitelů

vztlaku a odporu (výpočet vztakové a odporové síly je analogický k výpočtu křídla). Bude tedy možné sestavit poláru daného profilu. Příklad takové poláry je na obr. 12. [9]



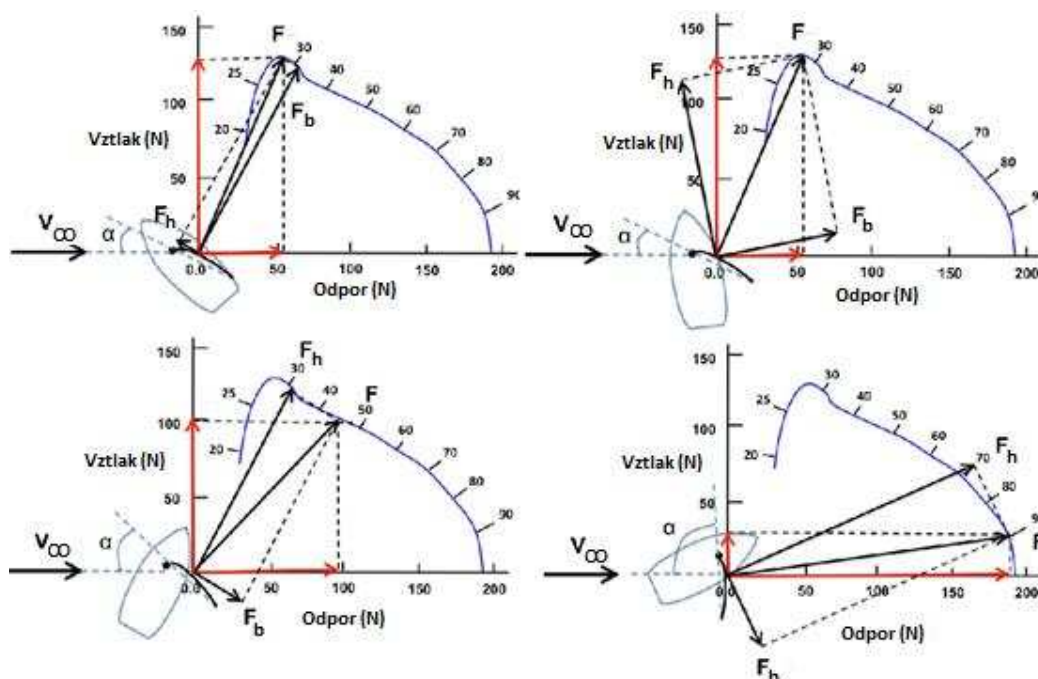
Obrázek 11: Simulace obtoku profilu plachty [9]



Obrázek 12: Příklad poláry plachty [10]

3.3.3. Polára plachty, Sail polar diagram

Z obr. 12 je na první pohled je patrné, že polára je sestavena i pro úhly náběhu blízcí se 90° , což u polár leteckých profilů není běžné. V obrázku jsou také vyznačeny oblasti charakteru silového působení, jež plachta pro daný úhel náběhu vyvolává. Takovýto diagram lze snadno upravit (dle R. Garreta) pro konkrétní plachtu dosazením do rovnic (1) a (2) a výsledkem je (za pomoci silových rozkladů popsaných v kapitolách 3.1 a 3.2) názorný diagram sil, působících na loď v závislosti na úhlu náběhu a kurzu lodí (obr. 13). [11]



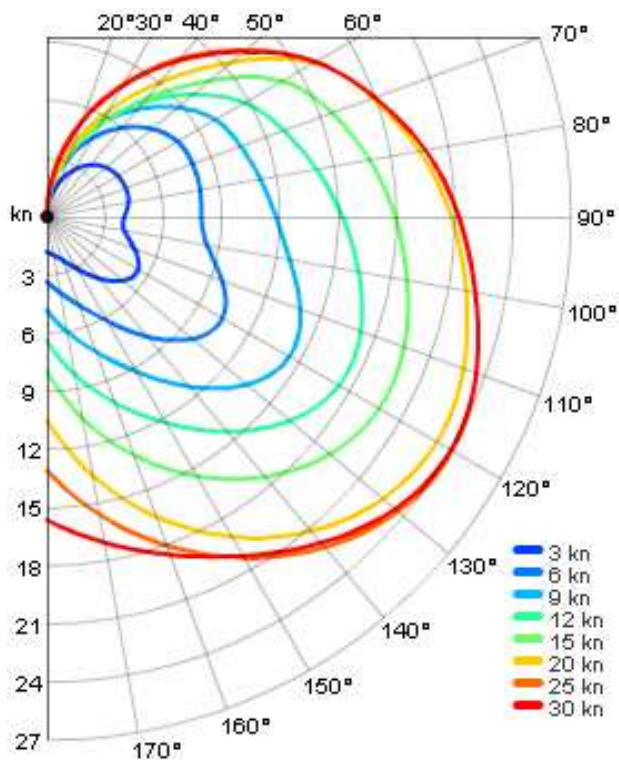
Obrázek 13: Závislost sil působících na loď na úhlu náběhu plachty a kurzu [10]

Z obr. 13 lze snadno odečíst poměr síly vztlakové a odporové (červené šipky) pro aktuální úhel náběhu a je-li známý kurz lodí, můžeme výslednou sílu rozložit na sílu boční, a sílu pro pohyb lodí stěžejní, sílu hnací.

Nevýhodné je, že diagramy na obr. 12 a 13 popisují pouze jedinou plachtu, v jediném stavu.³ Nezohledňují možnost plachty upravovat dle konkrétních podmínek, ani hydrodynamiku trupu. Z toho důvodu se v praxi k popsání a porovnání vlastností plachetnic používají výpočetní modely VPP (Velocity prediction program), jež zohledňují i poláru trupu, jeho stabilitu a další údaje. [9]

³ Poláru, stejně jako ostatní grafy je možné sestavit pro model plachty s konstantním profilem, stejně jako pro reálnou plachtu, případně pro kompletní lodní oplachtění.

Názorným výstupem může být graf známý jako Sail polar diagram (obr. 14). Graf ukazuje maximální dosažitelnou rychlost dané lodi (svislá osa) na jejím úhlu natočení vůči skutečnému větru (polární stupnice) a rychlosti tohoto větru (barevné křivky).



Obrázek 14: "Sail polar diagram" [12]

3.3.4. Alternativní lodní oplachtění

Alternativou k měkké plachtě je plachta nepružná. Ta má sice nevýhodu, že ji není možno tak široce trimovat (nastavovat) a přizpůsobovat aktuálním podmínkám, ale současně je méně náročná na obsluhu, jelikož v podstatě jedinou možností jejího ovládní je rotace kolem stěžně, tedy změna úhlu náběhu.

Tohoto faktu využívá například jachta Maltese Falcon, jež je na obr. 30. Z obrázku je patrné, že výsledná plachta je tvořena dílčími plachtami z měkkého materiálu, jež jsou ale vypnuty ve svém rámu tak, že se téměř nepohybují. Celé plachtoví se potom ovládá jednoduchou rotací stěžňů, případně stažením plachet. [13]

Další možností pevné plachty, tou, kterou se budeme zabývat, je plachta, jejíž profil není křivkou, ale stejně jako profil letecký tvoří uzavřenou plochu. Takováto křídlová plachta nabízí proti běžné plachtě vyšší hodnoty součinitele vztlaku při menším odporu. Proto je hojně využívána u závodních plachetnic (například v kategorii AC72, obr. 15). Jako měřítko pro porovnání je obvykle

používán podíl plochy křídlové plachty ku ploše, kterou má klasická plachta se stejným vztlakem (závodní týmy uvádějí na svých stránkách hodnoty 0,7 až 0,8). Nevýhodou křídlové plachty je menší rozsah efektivního úhlu náběhu. Zatímco při plavbě ve vztlakovém režimu má tento profil evidentní výhodu, při plavbě v odporovém režimu je jeho menší plocha nevýhodou a je nutné ho kombinovat s dalšími plachtami klasického typu. Výjimku tvoří závodní lodě, které dokáží vyvinout rychlost, která i více než dvakrát převyšuje rychlost skutečného větru a zdánlivý vítr, který na loď působí (s výjimkou přímého zadního větru) bude vždy předobční. Další nevýhodou je to, že profil musí být použitelný v případě větru z pravoboku, i levoboku a musí být tedy buď zhotoven z jednoho symetrického profilu, nebo více částí, jež ale musí být určitým mechanismem přesunutelné do zrcadlové polohy dle podélné osy lodi. [14]



Obrázek 15: Superjachta "Maltese Falcon" [13]



Obrázek 16: Závodní jachta kategorie AC72 týmu Emirates Team New Zealand [14]

4. Aerodynamické váhy

4.1. Možné konstrukce aerodynamických vah

Aerodynamickými váhami se rozumí měřící zařízení zaznamenávající silovou reakci daného modelu na proud vzduchu generovaný aerodynamickým tunelem. Dle tvaru měřeného modelu se váhy dělí na 3D váhy, tedy váhy měřící 3D modely (obr. 17) a váhy 2D, měřící profil konstantního průřezu (obr. 18). [16]



Obrázek 17: Příklad „vnitřních“ 3D vah [15]



Obrázek 18: Příklad „vnitřních“ 2D vah [17]

Dále lze váhy dělit dle systému přenosu z měřeného modelu na měřící členy (nejčastěji tenzometry).

Výše zobrazené váhy používají tzv. vnitřní váhy, tedy váhy, jejichž měřící členy jsou instalovány uvnitř podpory modelu a tím je minimalizováno působení podpěr pro přenos sil na výsledky měření. Nevýhodou vnitřních vah je jejich technická sofistikovanost. Je v podstatě nezbytné pro konkrétní tunel zhotovit váhy na míru. Navíc, aby byl dopad podpory na měření minimalizován, je třeba, aby byl celý mechanismus co nejmenší. [17]

Vnější váhy (obr. 19) mají zásadní výhodu v možnosti použití téměř libovolných měřících členů, jelikož jsou umístěny vně měřícího prostoru. Nevýhodou je potřeba mechanismu, který přenesou veškeré síly na měřící členy a minimálně ovlivní měření. Tento typ vah byl zvolen pro naše použití.



Obrázek 19: Příklad „vnějších“ 2D vah

4.2. Aerodynamické váhy pro měření oplachtění

Lodní Oplachtění se standardně měří na vahách 3D. Často měření probíhá v rozlehlém bazénu, aby byl lépe nasimulován efekt mezní vrstvy při hladině. [18]

Model může obsahovat jen jednu plachtu (obr.20, vlevo), případně kompletní oplachtění (Obr.20, vpravo). Váhy pro měření kompletního oplachtění dané lodi se obvykle používají pro ladění momentové rovnováhy lodi [18], zatímco váhy pro měření jedné plachty (případ vah navrhovaných v této práci) slouží v popisu aerodynamiky dané plachty. [9]



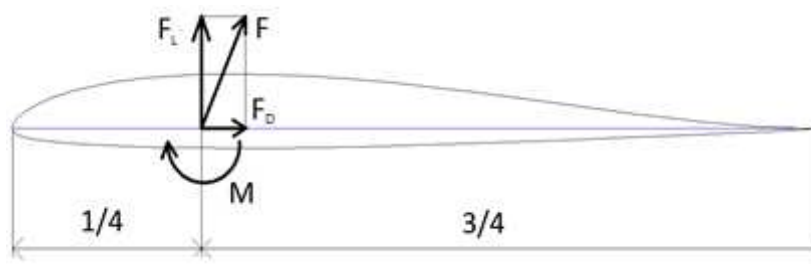
Obrázek 20: Příklad 3D vah pro vyvažování lodi (vlevo) a vah pro měření hlavní plachty i s modelem lodi s mechanismem pro ovládání plachty [18], [9]

5. Návrh a realizace vah

5.1. Rozbor sil měřených na vahách

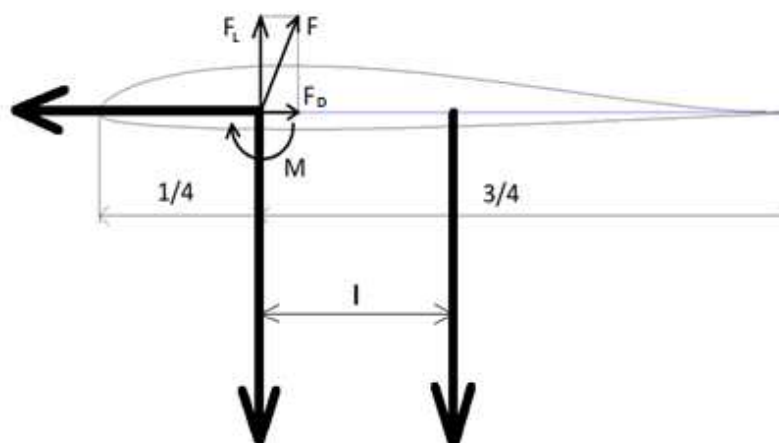
Základní věcí pro návrh fungujících vah je správný silový rozbor. Budou-li špatně určeny síly jež mají váhy měřit, bude možné je použít jen velmi omezeně, nebo vůbec.

Silový rozbor je uveden na obr. 21. Na obecném profilu způsobí proudící vzduch následující síly: Odporovou sílu F_D , vztlakovou sílu F_L a klopný moment M . Výsledná síla, kterou generuje profil je potom označena jako F . [3]



Pro měření všech těchto sil bude zapotřebí tří měřících členů na každé straně modelu (obr. *Obrázek 21: Znárodnění sil působících na profil*)

22). Jako měřící členy byly zvoleny tenzometrické váhy (tenzometry), jejich výběr je popsán v dále. Jeden pár tenzometrů bude zapotřebí pro měření odporu, jeden pár pro měření vztlaku a jednoho páru bude třeba po měření klopného momentu. Vzdálenost v obrázku označená jako „ l “ je důležitá právě pro výpočet klopného momentu. Vzhledem k velikosti tenzometrů a pohodlnému zacházení byla zvolena vzdálenost 6 cm.



Obrázek 22: Znárodnění uchycení profilu a předpokládaný směr sil, působících na tenzometry

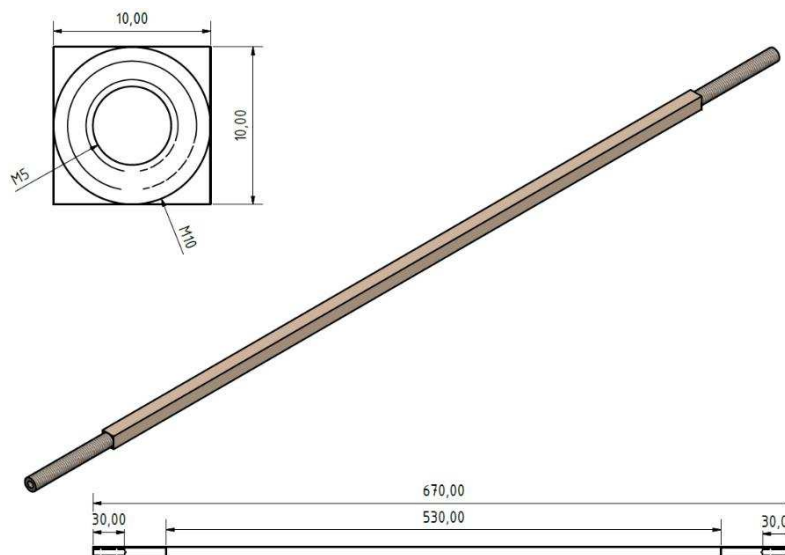
5.2. Mechanismus přenosu sil z modelu na tenzometrické členy

Tenzometry by měly být uchyceny v pevném rámu a s modelem být spojeny táhlem, případně pomocí ocelových lanek, tak aby byla minimalizována pružná deformace. Volena byla karbonová táhla, jež vynikají vysokou pevností v tahu, s napínací maticí (obr. 23). Karbonová táhla mají proti ocelovým lankám také tu výhodu, že mohou přenášet kromě tahu i tlak.

Dále je nezbytné zajistit přenos sil z měřeného modelu ven z měřicího prostoru tunelu a to tak, aby byly minimálně narušeny hladké stěny tunelu, což by ovlivňovalo měření. Zde byla použita tyč čtvercového průřezu, na obou koncích opatřenou závity (obr. 24), jež bude spojena s modelem tak, aby přenášela všechny výše uvedené silové účinky.⁴



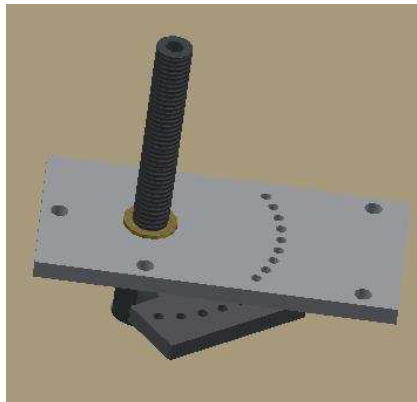
Obrázek 23: Táhlo s napínací maticí



Obrázek 24: Ocelová tyč pro přenos sil z prostoru tunelu

⁴ Pozn.: Kromě tyče může být k přenosu sil použitý libovolný rám dle požadavků modelu. Důležité je správně navrhnout tuhost rámu tak, aby se neprohýbal a také je nezbytné, aby bylo možné rám na obou koncích přichytit k tenzometrům stejně, jako námi použitou tyč.

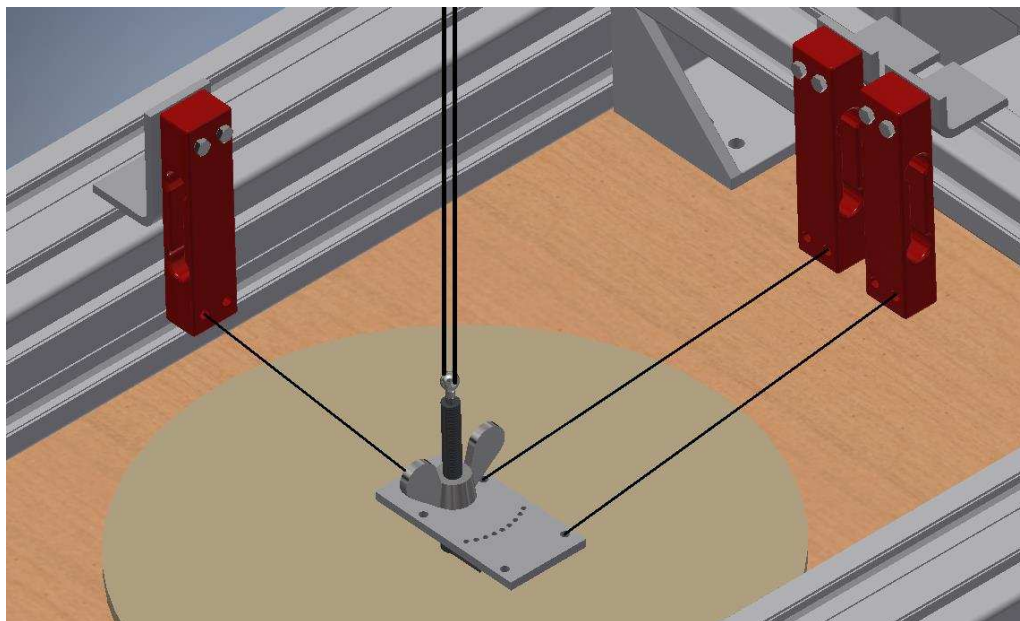
Nezbytný je také mechanismus pro nastavení úhlu náběhu měřeného modelu (tedy úhlu natočení osy modelu vůči proudu vzduchu). Ten byl vyřešen pomocí dvou ocelových destiček, které je možno vzájemně pootáčet po dvou stupních a zajistit čepem (příloha A, obr. 25).



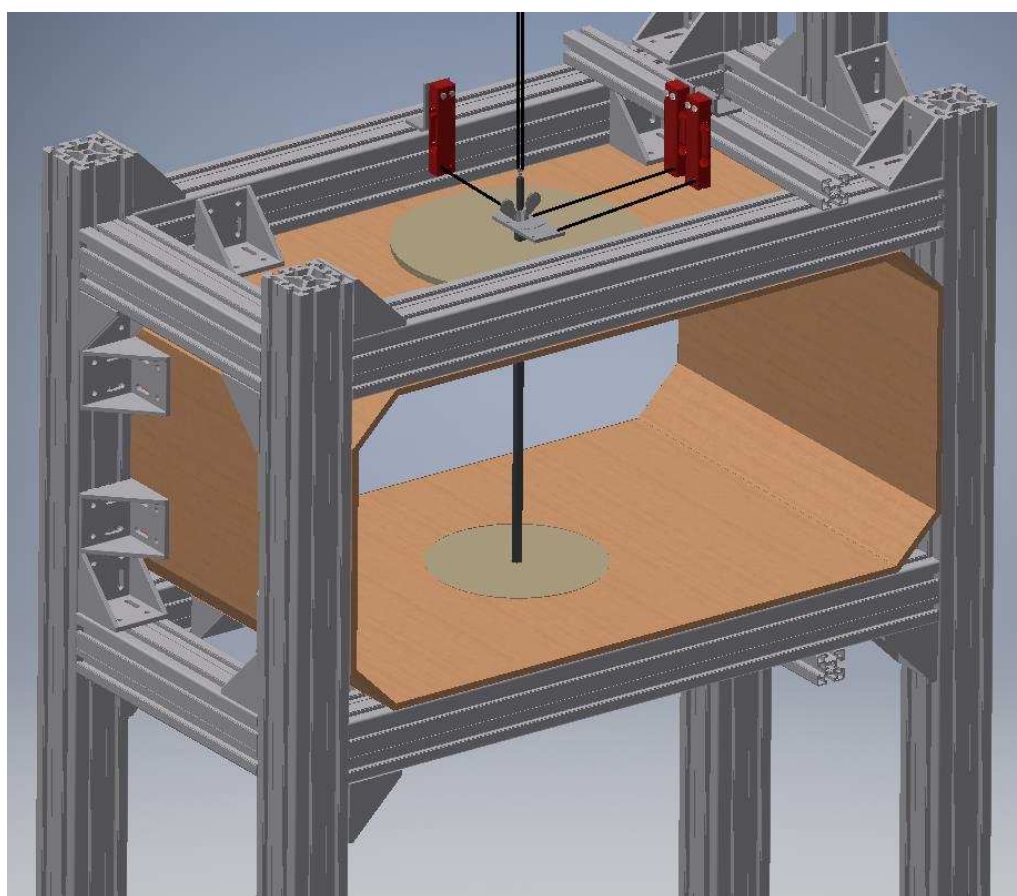
Obrázek 25: Umístění aretovacích destiček v modelu (Na obrázku není zobrazen šroub pro dotažení spodní destičky k tyči přes distanční kroužek)

Z Obr. 25 je patrné, že destička tvaru obdélníku je opatřena otvory pro spojení s tenzometry pomocí výše zmíněných táhel. Je také spojena s ocelovou tyčí rotačně, tedy zůstává vždy ve stejné poloze vůči tenzometrům a ocelová tyč společně s menší destičkou může být vůči ní pootáčena po dvou stupních. Na obr. 26 je zobrazeno spojení tenzometrů (červené) s tyčí, na níž je možné přichytit měřené modely. Na obr. 26 je dále patrný závěs modelu. Ten je nezbytný, jelikož model je měřen ve vertikální poloze (patrné z obr. 27) a je třeba potlačit účinky gravitace, která by jinak způsobovala dosednutí profilu na dno tunelu a vznik nežádoucích sil (tření apod.), jež by negativně ovlivnily měření.⁵ Na obr. 26 a 27 jsou také vidět kruhové kryty vstupních otvorů pro vložení měřeného modelu. Spára mezi stěnou tunelu a krycí deskou byla použitou technologií minimalizována, tak aby měření ovlivňovala co nejméně.

⁵ Pozn.: Vertikální poloha měřeného modelu byla zvolena vzhledem k tvaru měřicího prostoru tak, aby byl maximálně využit prostor ideálního proudění vzduchu a vliv zkosení hran měřicího prostoru byl minimalizován.



Obrázek 26: Spojení tenzometrů s tyčí vstupující do měřícího prostoru (na táhlech nejsou zobrazeny napínací šrouby)



Obrázek 27: celkový model aerodynamických vah

Otvor, kterým prochází ocelová tyč skrze kruhové desky musí být kruhový, aby bylo možné tyčí rotovat, a musí také být dostatečně velký, aby se ho tyč nedotkla. Aby ale minimálně ovlivňoval měřicí prostor, je třeba aby byl co nejmenší možný. Volen byl průměr 15 mm.

Tenzometrické členy a veškeré součásti k jejich propojení s měřeným profilem musí být, jak bylo uvedeno výše, po obou stranách měřeného profilu, tedy i na spodní straně tunelu.

5.3. Rám

Rám vah byl navržen a zhotoven z hliníkových profilů ALUTEC, jež mají vynikající pevnostní vlastnosti a díky stavebnicovému systému je jejich montáž pomocí úhelníků a šroubů snadná a je možné snadno provádět případně změny konstrukce pro další aplikace vah. Do rámu jsou dle obr. 27 vsazeny překližkové stěny měřicího prostoru, přímo navazující na aerodynamický tunel a přichyceny vruty. Ocelová tyč s měřeným profilem jsou zavěšeny na pomocném rámu a tenzometrické členy jsou přichyceny k rámu pomocí ocelových L profilů. Rám je dále opatřen kolečky pro snadnou manipulaci a aretovacími nožičkami, jež slouží pro přesné sjednocení výšky měřicího prostoru vah s výškou tunelu. Schematický výkres tunelu, pro nějž byly váhy zhotoveny je v příloze B.



Obrázek 28: Kopletně sestavené váhy, připravené k měření

5.4. Volba Tenzometrů

5.4.1. Návrhové výpočty pro vztlakové a odporové tenzometry

Pro správnou volbu tenzometrů je třeba předběžně spočítat jejich zatížení. Pro tento výpočet musíme znát rozměr měřeného modelu, rychlost, při jaké bude možné váhy použít, součinitele C_l a C_d a hustotu vzduchu při teplotě, která je v laboratoři. Pro předběžné zjištění C_d a C_l také potřebujeme znát nejvyšší Reynoldsovo číslo, pro které budeme modely měřit. Zjistíme ho dosazením do rovnice (5):

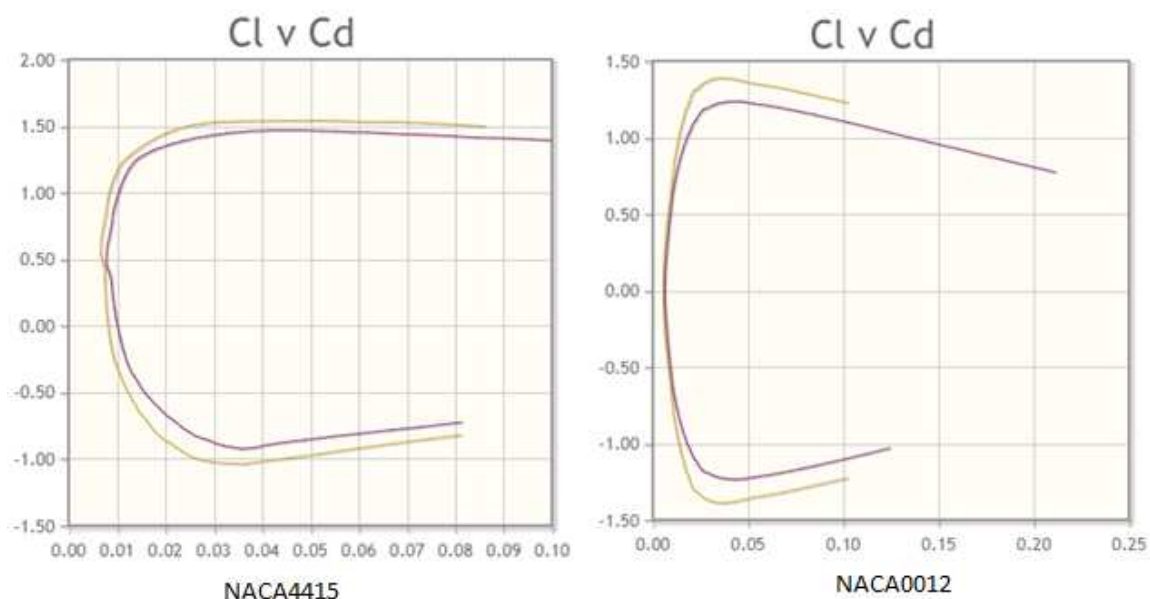
$$Re = \frac{v_\infty \cdot b}{\nu} = \frac{60 \cdot 0,2}{15,3 \cdot 10^{-6}} = 784594$$

Kinematická viskozita v laboratoři je závislá na teplotě vzduchu v laboratoři a ta je závislá na meteorologických podmínkách. Zvolíme střední teplotu 20°C a tomu odpovídající kinematickou viskozitu $15,3 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$.

Maximální velikost měřeného objektu je dána velikostí vstupního otvoru ($\varnothing 250 \text{ mm}$) a výškou tunelu v místě měření (450 mm). Je zřejmé, že model nemůže měřit přesně 450 mm, jelikož by docházelo k tření mezi modelem a stěnami tunelu. Mezera mezi modelem však musí zároveň být co nejmenší, aby proud vzduchu proudící mezi profilem a stěnou tunelu byl co nejmenší. Výsledná maximální plocha modelu tvaru křídla je tedy $0,09 \text{ m}^2$.

Maximální rychlost proudění v tunelu je 60 m/s.

Součinitele C_l a C_d jsou závislé na měřeném modelu. Měřeny byly modely s profilem NACA 0012 a NACA 4415. Dále potom modely s profilem dle vlastního návrhu a model plachty. Z obr. 29 jsou patrné hodnoty součinitelů. Jsou zde uvedeny hodnoty pro Reynolds = 500000 a Reynolds = 1000000, pro rozsah úhlu náběhu $\pm 20^\circ$. Maximální hodnota Reynoldsova čísla pro naše měření je 784594, tedy naše křivka by měla ležet mezi těmito křivkami.



Obrázek 29: Poláry profilů NACA4415 a NACA0012 [4]

Pro NACA 0012: $C_d = 0,22$; $C_l = 1,25$

Pro NACA 4415: $C_d = 0,1$; $C_l = 1,6$

Poslední chybějící veličinou do vzorců pro výpočet sil působících na tenzometry je hustota. Pro její určení opět potřebujeme znát teplotu. Jako v předchozím případě volíme teplotu 20°C. Odpovídající hustota je $1,1887 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$.

Do výpočtu sil zahrneme maximální hodnoty součinitelů, dosažitelné během našeho měření, výsledné síly tedy dle budou (1) a (2):

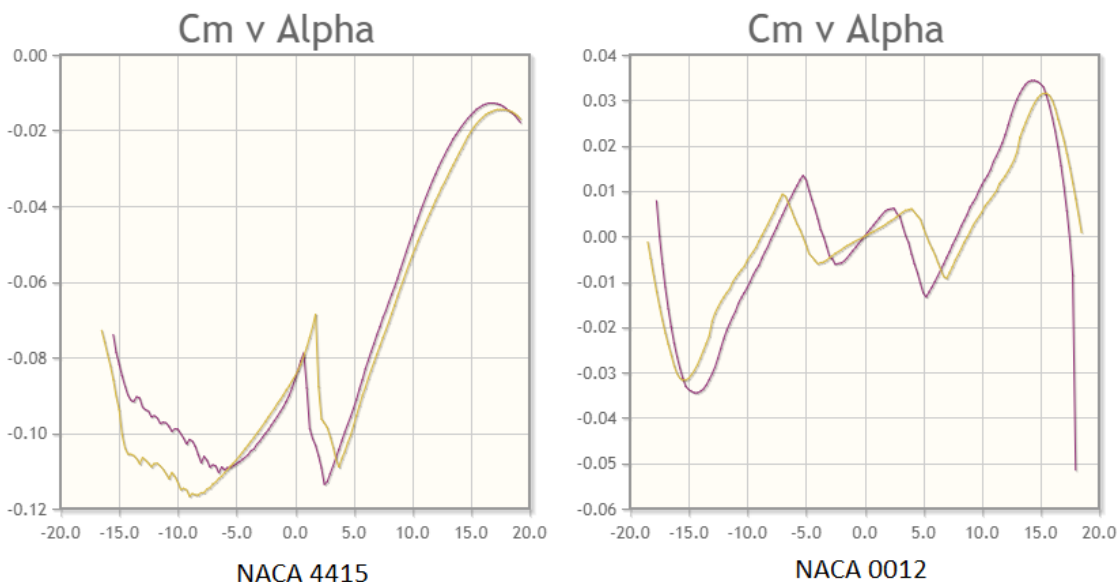
$$F_D = C_d \cdot A \cdot \rho \cdot \frac{v_\infty^2}{2} = 0,22 \cdot 0,09 \cdot 1,1887 \cdot \frac{60^2}{2} = 42,4 \text{ N}$$

$$F_L = C_l \cdot A \cdot \rho \cdot \frac{v_\infty^2}{2} = 1,6 \cdot 0,09 \cdot 1,1887 \cdot \frac{60^2}{2} = 308,1 \text{ N}$$

5.4.2. Výběr konkrétních vztlakových a odporových tenzometrů

Síla F_D bude přenášena na dva tenzometry, tedy hodnota síly, na kterou musí být tenzometry dimenzovány bude poloviční, tedy po zaokrouhlení 21 N. Zvolen byl tenzometr ZEMIC L6D 3 kg (Obr. 31) s únosností 29.4N. Zpětným dosazením do (1) zjistíme, že je možné měřit modely s hodnotou součinitele až do $C_D = 0,45$.

Tenzometry pro přenos vztlkové síly dimenzujeme stejným způsobem. Zde vychází síla na jeden tenzometr 154 N. Opět volíme tenzometr s vyšší únosností ZEMIC L6D 20 kg s únosností 196,2 N. Po zpětném dosazení do původní rovnice (2) získáme hodnotu maximálního součinitele vztlaku: $C_l = 3$.⁶



Obrázek 30: závislost součinitele klopného momentu (C_m) na úhlu náběhu pro oba profily [4]

5.4.3. Návrhový výpočet pro tenzometry měřící klopný moment

Tenzometry pro měření klopného momentu určíme ze vzorce pro výpočet klopného momentu (4):

$$M = C_m \cdot \rho \cdot A \cdot b \cdot \frac{v_\infty^2}{2} = 1,11 \cdot 1,1887 \cdot 0,09 \cdot 0,02 \cdot \frac{60^2}{2} = 4,3 \text{ Nm}$$

kde b je charakteristický rozměr, tedy tětiva profilu. Hodnoty C_m byly odečteny z grafu, stejně jako v předchozím případě. Aby byla získána hodnota síly F_{C_m} , potřebná pro návrh tenzometru, je nezbytné tuto hodnotu dosadit do vzorce pro výpočet silového momentu:

$$F_{C_m} = \frac{M}{l} = \frac{4,3}{0,06} = 71,7 \text{ N}$$

⁶ Pozn.: Hodnoty únosnosti tenzometrů je možné přetížít o 150%, krátkodobě až o 300% (Dle technického listu), tenzometr ale při přetížení přestává měřit.

5.4.4. Výběr konkrétních tenzometrů pro měření klopného momentu

Sílu je opět třeba vydělit dvěma, aby byla získána hodnota na jeden tenzometr: 35,8 N. I přes to, že tato mezní hodnota přesahuje rozsah tenzometru ZEMIC L6D 3kg, bude použit. Hodnota vypočtená výše je totiž v praxi jen velice těžko dosažitelná a tenzometr je při ní přetížen o 16%, což ho nepoškodí (viz. pozn. 6).



Obrázek 31: Tenzometrický měřicí člen ZEMIC L6D 3kg



Obrázek 32: Tenzometry umístěné v rámu, připojeny k měřenému modelu a připraveny na měření

6. Návrh korekcí vah

V každém aerodynamický tunel dochází k ovlivňování měření vnějšími vlivy. Pro typ vah, který byl navržen v této práci je těchto vlivů několik. Patří mezi ně například vůle mezi stěnou tunelu a měřeným modelem, tyč procházející stěnou, vliv otvoru, kterým tyč prochází a náhlé rozšíření v blízkosti za měřícím prostorem. Pro každé aerodynamické váhy je potřebné vypracovat korekce.

Základní hodnotou pro správné určení je hodnota součinitele zaplnění aerodynamického tunelu. Tu snadno určíme pomocí vzorce [19]:

$$C_Z = \frac{A_B}{A_P} \quad (6)$$

kde C_Z je součinitel zaplnění aerodynamického tunelu, A_B plocha průřezu měřícího prostoru, kterou zabírá měřený model a A_P plocha průřezu měřícího prostoru.

Modely, jež budou měřeny v rámci této práce mají maximální možnou plochu $0,09 \text{ m}^2$. Nebudou však nikdy měřeny tak, aby tato plocha byla vystavena kolmo na směr proudění. Maximální úhel náběhu, pro který bude měření probíhat je z bezpečnostních důvodů stanoven na 25° . Výslednou čelní plochu měřených modelů lze stanovit pomocí goniometrické funkce:

$$A_B = \sin(25^\circ) \cdot 0,09 = 0,038 \text{ m}^2$$

Plochu průřezu měřícího prostoru můžeme určit z přílohy B. Je rovna $0,425 \text{ m}^2$. Výsledný součinitel potom vychází:

$$C_Z = \frac{A_B}{A_P} = \frac{0,038}{0,425} = 0,087$$

Tato hodnota koeficientu zaplnění už vyžaduje další korekce, jelikož překračuje doporučenou hodnotu 5%, vliv stěn tunelu na měřený model již není zanedbatelný. V této práci není pro další výpočet korekcí prostor, ale v budoucnu by měly být provedeny a výsledky měření by se měly přiblížit numerickým simulacím.

Na vahách lze měřit i bez korekcí, zejména má-li být výsledkem porovnání dvou, či více profilů měřených na těchto vahách a porovnání s numerickou simulací, případně s výsledky měření na jiných vahách je vedlejší.

7. Návrh a realizace modelů pro měření

7.1. Návrh profilů

Pro samotné měření bylo navrženo pět profilů:

1. Profil NACA 0012

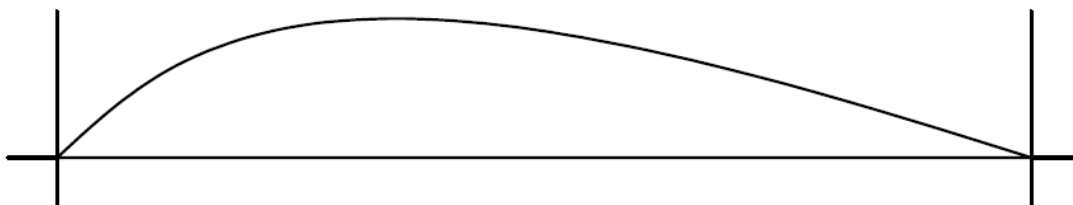
Tento profil byl zvolen pro otestování vah a nastavení případných korekcí.



Obrázek 33: Profil NACA 0012

2. Model plachty

Měkká plachta tvaru obdélníku s poměrem $f/c = 1/7$. Její přesný profil se bude měnit dle aktuálního úhlu náběhu a rychlosti proudění v tunelu. Plachta s konstantním profilem po celé délce v praxi nereálná, v této práci poslouží tento model k porovnání vlastností s ostatními modely s uzavřeným profilem.



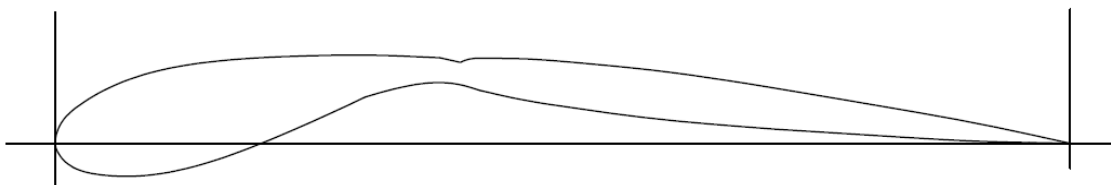
Obrázek 34: Měkká plachta

3. Profil „ETNZ“

Byl navržen podle profilu křídlové plachty, jež využívá loď na obr. 31. Splňuje podmínky kategorie závodních plachetnic AC72. Mezera mezi dvěma dílčími profily může být v případě lodi uzavřena, případně otevřena dle potřeby. Použitá technologie při našem měření toto neumožňuje a modelu bude zanechána pouze rýha v místě spojení obou profilů (obr. 36). Jelikož je profil složen ze dvou symetrických profilů, je možné měnit smysl jeho úhlu náběhu.



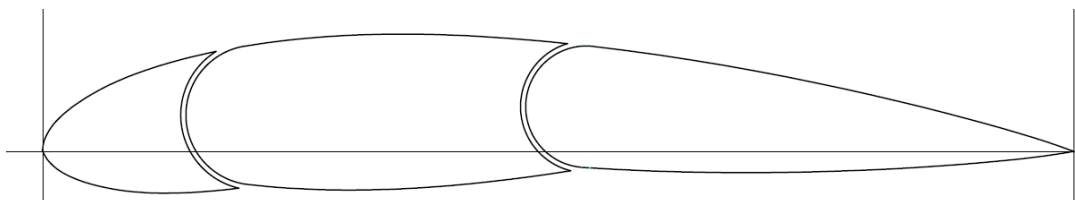
Obrázek 35: Profil "ETNZ"



Obrázek 33: Profil "ETNZ" po technologické úpravě

4. Profil NACA 4415 – Oboustranný profil

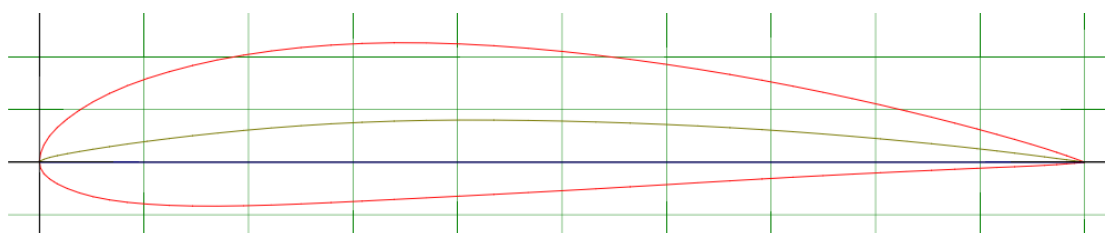
Byl navržen jako alternativa k profilu ETNZ. Základní profil NACA 4415 byl vybrán pro své dobré vztlakové vlastnosti. Jeho horní strana dle možností kopíruje horní stranu profilu NACA 4415. Spodní strana je potom sestavena ze zrcadlových křivek tak, aby byl možné profil překlápět na obě strany. Tento profil by dle předpokladů mohl vykazovat hodnoty blízké originálnímu profilu NACA 4415 při zachování „oboustrannosti“.



Obrázek 34: Profil NACA 4415 - oboustranný

5. Profil NACA 4415

Byl vybrán pro porovnání vlastností s profilem NACA4415 – oboustranný

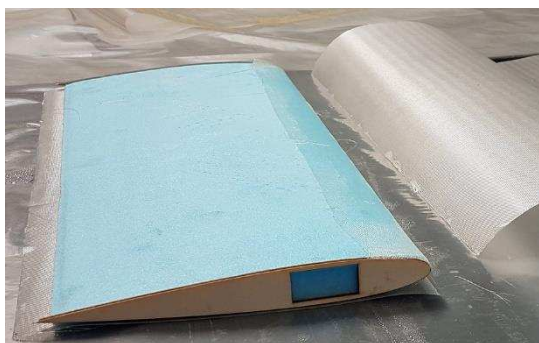


Obrázek 38: Profil NACA 4415

7.2. Výroba modelů

7.2.1. Samotné model s uzavřenými profily

Modely daných profilů byly vyrobeny metodou vakuového laminování. Bočnice profilů byly vyfrézovány z překližky, samotný profil potom vypálen z polystyrenu tavným drátem. Překližkové bočnice byly následně nalepeny na strany polystyrenového profilu a celý model byl vakuově zalaminován (Obr. 39).



Obrázek 39: Laminování polystyrenového profilu s překližkovou bočnicí

7.2.2. Mechanismus pro upevnění modelu k vahám

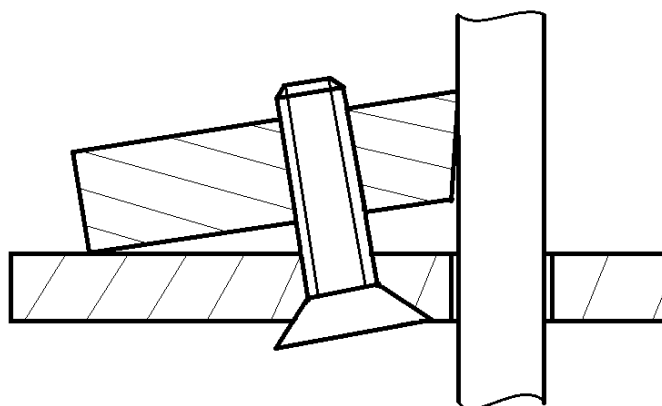
Do profilu byl následně z každé strany vytvořen hlubší otvor, odpovídající obdélníkovému otvoru v překližce, o hloubce 3 až 4 cm. Do něj byl vlepen sklotextitový bloček, jež je na obr. 3. V něm je potom umístěn kovový kvádr, jež je pomocí šroubu dotahován k ocelové tyči, jež spojuje model s vahami (viz. kapitola 5.2. o návrhu vah). Mechanismus dotahování je zobrazen na obr. 41.⁷



Obrázek 40: Sklotextitové bločky a jejich pozice v modelu křídla

⁷ U modelu s profilem ETNZ nebyl v bočnici prostor pro vlepění sklotextitového bločku a ocelová tyč je opřena přímo o překližkovou bočnici. Vzhledem k výrobním přesahům jednotlivých součástí nedochází jejímu pohybu.

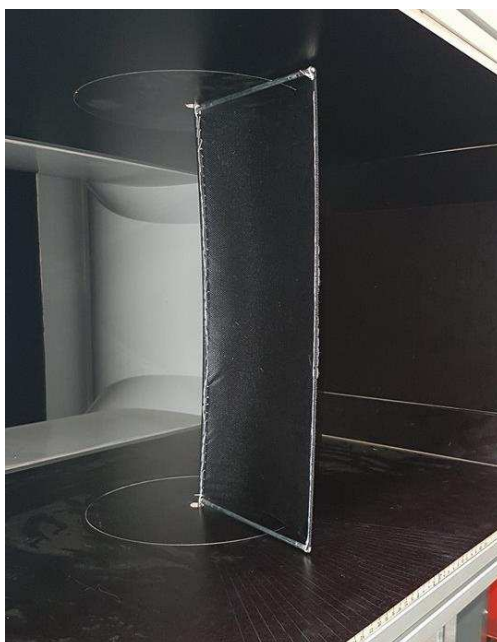
Poslední potřebnou operací je vytvoření otvoru pro ocelovou tyč skrz model. Otvor byl propálen pomocí nažhavené ocelové tyče.



Obrázek 41: Mechanismus dotahování modelu k ocelové tyči

7.3. Model měkké plachty

Plachta je vypnuta ve svařovaném rámu z oceli. Připevněna je nerozebíratelně přišíáním. Z obr. 42 je patrné, že rám je tvaru obdélníku a je tedy součástí i zadního líku plachty, kde je skutečná plachta pouze vypnuta ocelovým lankem. V případě našeho měření by ale ocelové lanko nebylo dostatečně pevné a model plachty by potom nesplňoval podmínku konstantního profilu. Všitá ocelová tyčka na odtokové hraně ovlivní měření.



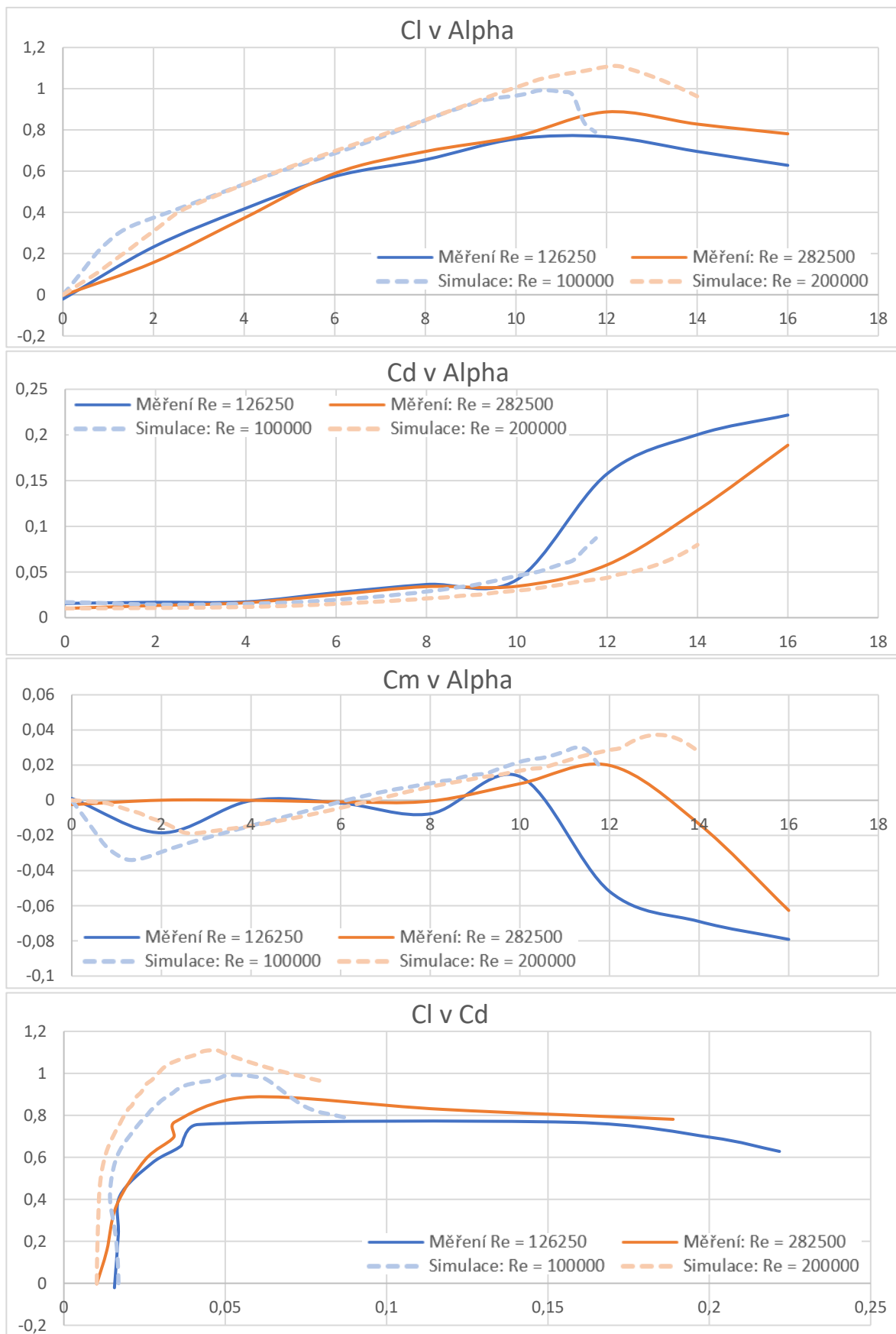
Obrázek 42: Plachta vypnutá v rámu. Zde je již plachta obtékána pod úhlem náběhu 14°, navíc při rychlosti 23 m/s, a je lehce prohnutá

8. Výsledky měření

Měření modelů probíhalo v aerodynamickém tunelu v laboratoři mechaniky tekutin za použití vah popsaných v kapitole 5. Charakteristiky každého modelu byly změřeny pro dvě Reynoldsova čísla. Rychlost v měřicím prostoru se během měření pohybovala do 36 m/s. Důvodem byla jednak bezpečnost, a také pružná deformace měřicího mechanismu by již ovlivňovala měření.

8.1. Model s profilem NACA 0012

První byl měřen model s profilem NACA 0012. Model byl měřen pro dvě rychlosti (10 m/s, 23 m/s). V grafu jsou vedle naměřených hodnot uvedeny hodnoty z webu Airfoil Tools (světlou barvou, čárkovaně). Hodnoty Reynoldsova čísla byly vybrány nejbližší možné.



Obrázek 43: Výsledky měření modelu s profilem NACA 0012

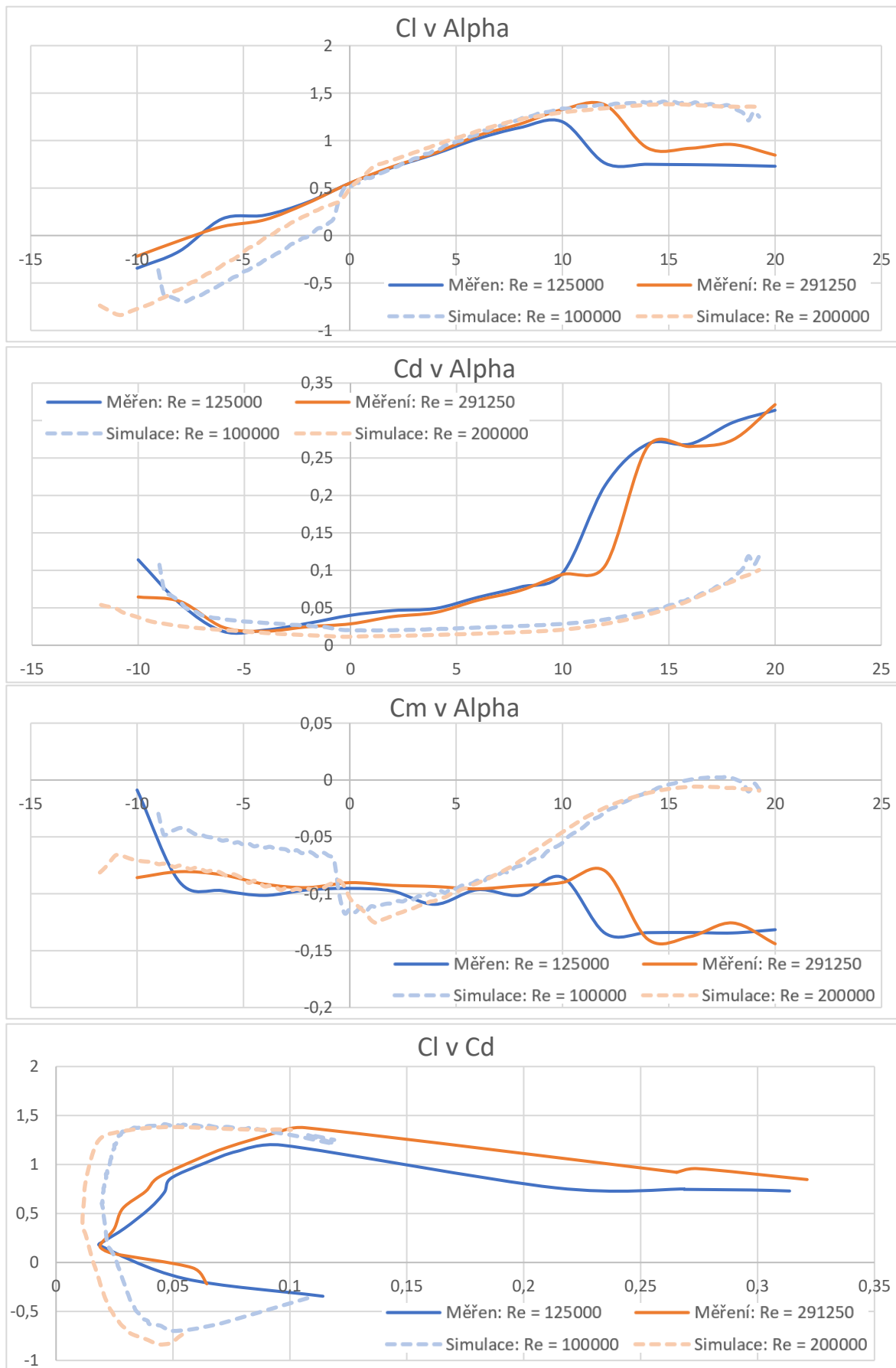
V porovnání s daty webu Airfoil Tools, jež byla získána numerickou simulací, vyšly hodnoty maxima C_l nižší přibližně o 20%, taktéž hodnota C_d se po překročení 10° začíná výrazně lišit. Z grafu je nicméně patrné, že k odtržení proudění na sací straně (oblast v blízkosti maxima C_l) došlo při stejném úhlu náběhu jak v simulaci, tak při měření. Výsledná polára je potom na posledním grafu.



Obrázek 44: Model s profilem NACA 0012 při montáži do měřicího prostoru

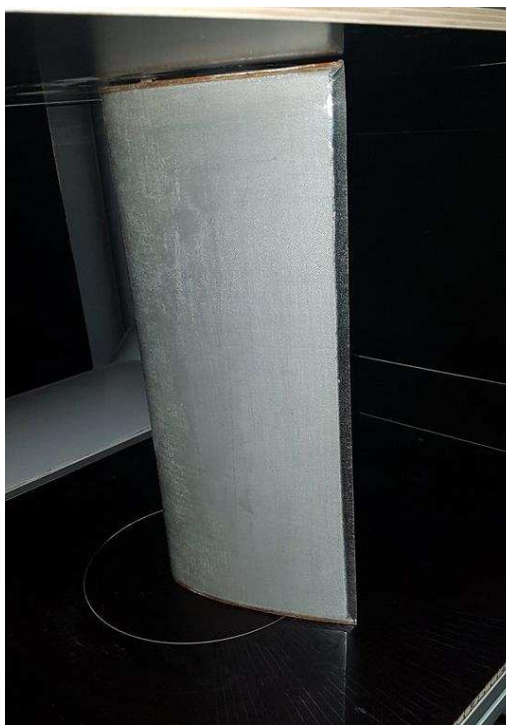
8.2. Model s profilem NACA 4415

I tento model byl měřen pro dvě rychlosti (10 m/s, 23 m/s). v grafech jsou opět i hodnoty z Airfoil Tools.



Obrázek 45: Výsledky měření modelu s profilem NACA 4415

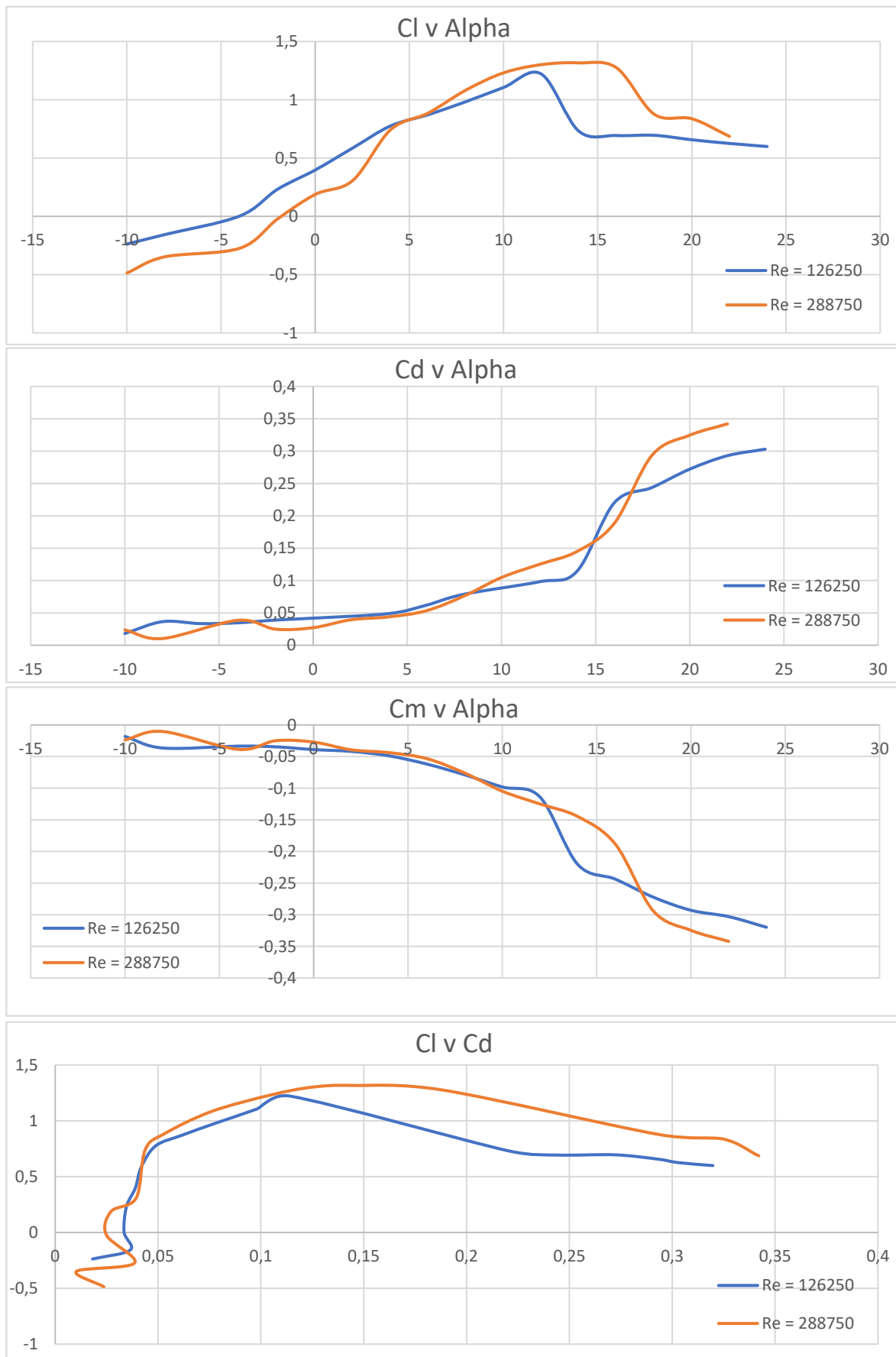
Součinitel odporu vyšel při našem měření výrazně větší než v simulaci. Hodnoty C_l si dlouho téměř odpovídají, také jejich maximum je blízké ale v případě našeho měření došlo k výraznému odtržení dříve než v simulaci. Hodnoty klopného momentu se (zejména za hranicí 10°) liší. Polára na posledním grafu odpovídá rozdílnému odporu profilu a rychlejšímu odtržení.



Obrázek 46: Model s profilem NACA 4415 v měřicím prostoru

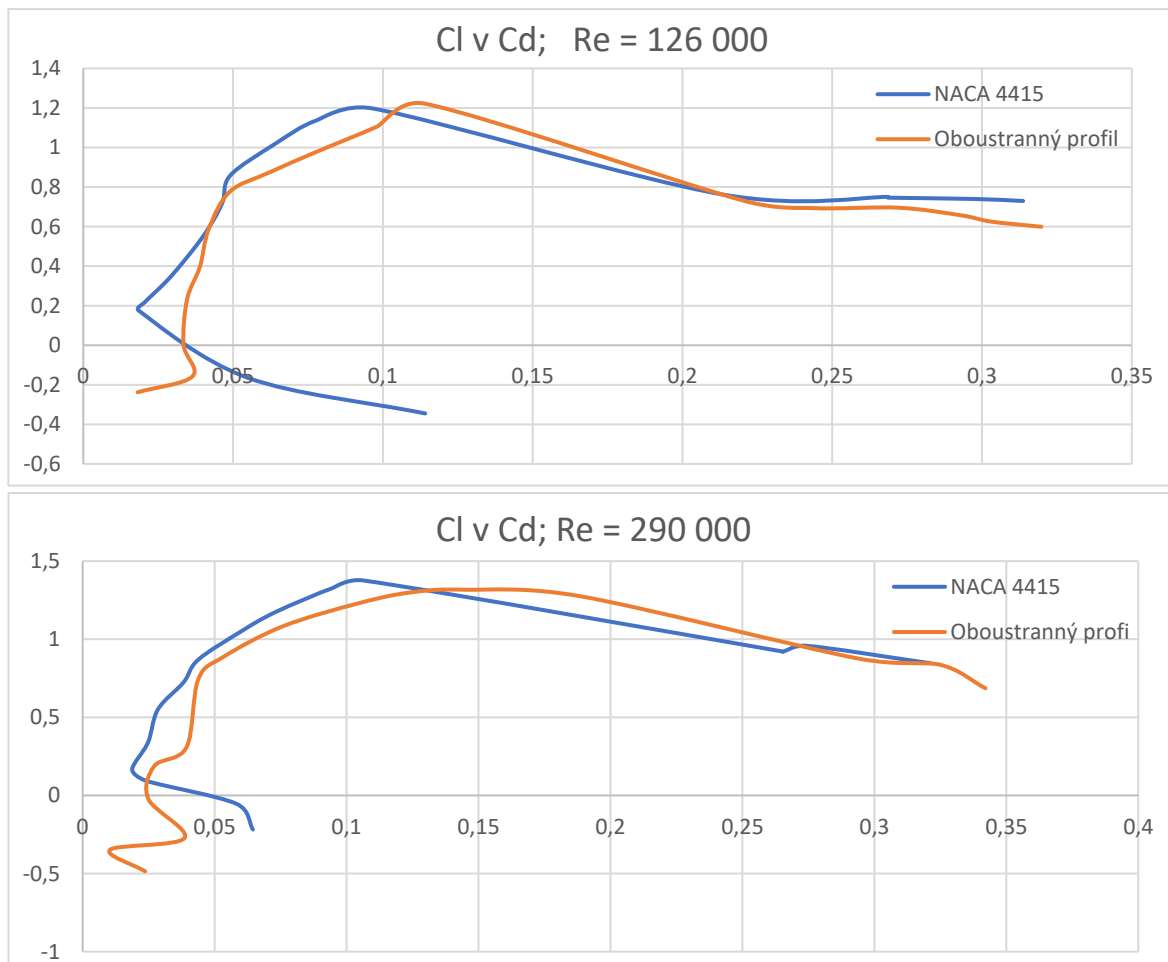
8.3. Model s profilem NACA 4415 – Oboustranný profil

Tento profil bude srovnáván především s profilem NACA 4415 a profilem ETNZ. Měření bylo opět pro rychlosti 10 m/s a 23 m/s. Jelikož se jedná o profil navržený v této práci a pro numerickou simulaci již nezbyl v této práci prostor, jsou hodnoty vyneseny v grafech pouze z měření v laboratoři. Profil bude měřen i v záporném úhlu náběhu. Tato situace je vzhledem k jeho oboustrannosti nesmyslná, jelikož je ale model pevně vylaminován, měření nám umožňuje. Navíc bude možné profil později lépe srovnat s profilem NACA 4415.



Obrázek 47: Výsledky měření profilu NACA 4415 v oboustranné variantě

Z prvního grafu je opět vidět prudké odtržení proudění. Součinitel odporu opět narůstá poměrně rychle. Pro lepší srovnání profilů NACA 4415 a oboustranné varianty téhož profilu, jsou poláry těchto profilů zobrazeny jednom grafu na obr. 48.



Obrázek 48: Porovnání polár profilů NACA 4415 a NACA 4415 - oboustranný

Z grafů je patrné, že hodnoty z měření, jež bylo provedeno, jsou si velice blízké. Oboustranný profil vykazuje při maximální hodnotě C_l (1,2, resp. 1,3) vyšší součinitel odporu, než NACA 4415. Vzhledem k možnostem oboustranného profilu je ale rozdíl (0,02) zanedbatelný.

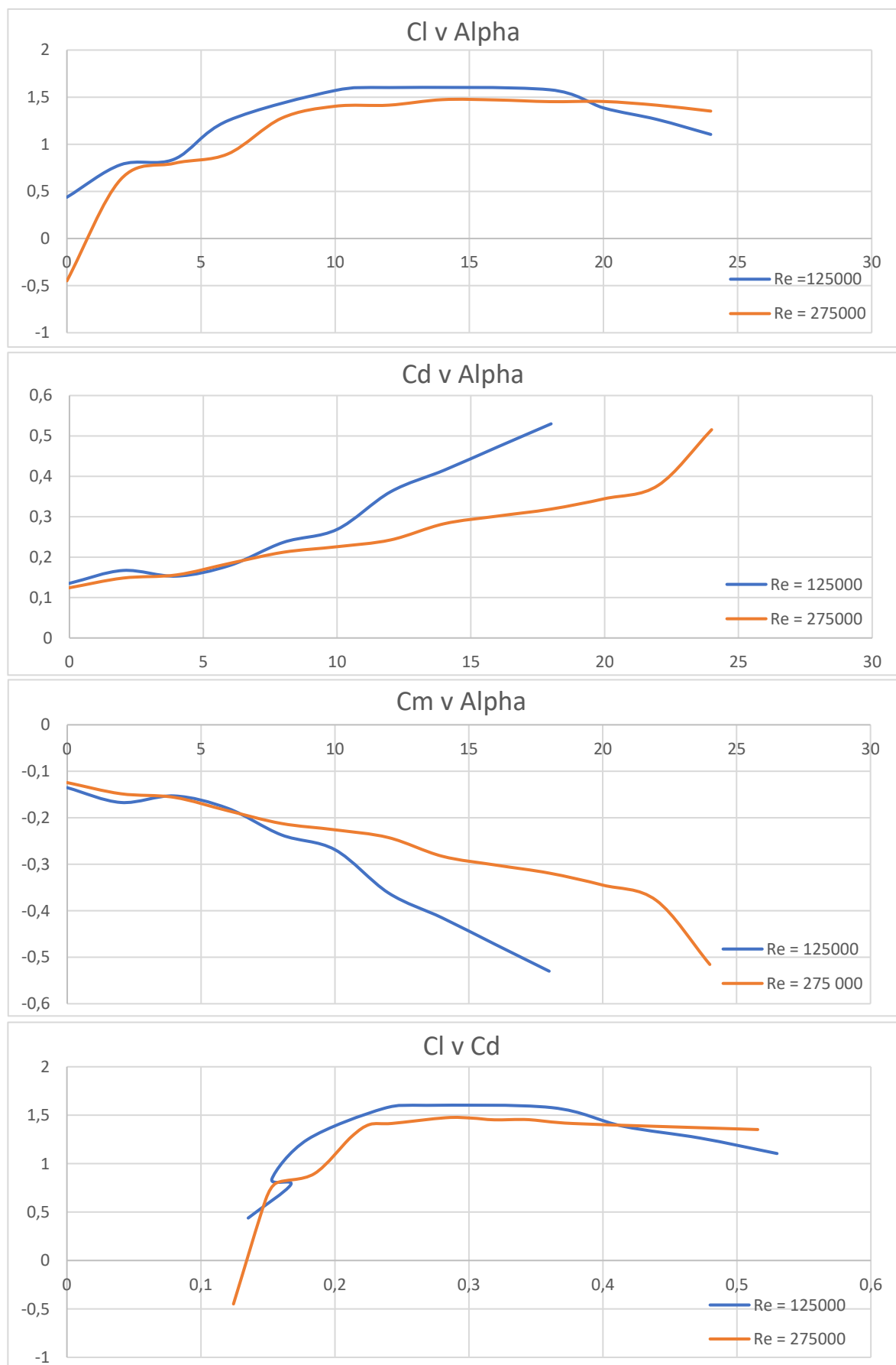
V záporných úhlech náběhu, při vyšších rychlostech, se oboustranný profil začal chovat zcela nepředvídatelně, pravděpodobně se jedná o nepřesnost měření.



Obrázek 49: měření modelu s oboustrannou variantou profilu NACA 4415

8.4. Model Plachty

Měření plachty bylo provedeno opět pro dvě rychlosti (10 m/s, 23 m/s). Vzhledem k volbě nastavení plachty (viz. popis jejího profilu) byla měřena do úhlu náběhu 24° . Pro větší úhly náběhu by již plachta vytvářela přílišné síly na tenzometry měřící klopný moment a tenzometry odporu. V praxi by v takové chvíli došlo k jejímu přenastavení.



Obrázek 50: Výsledky měření plachty

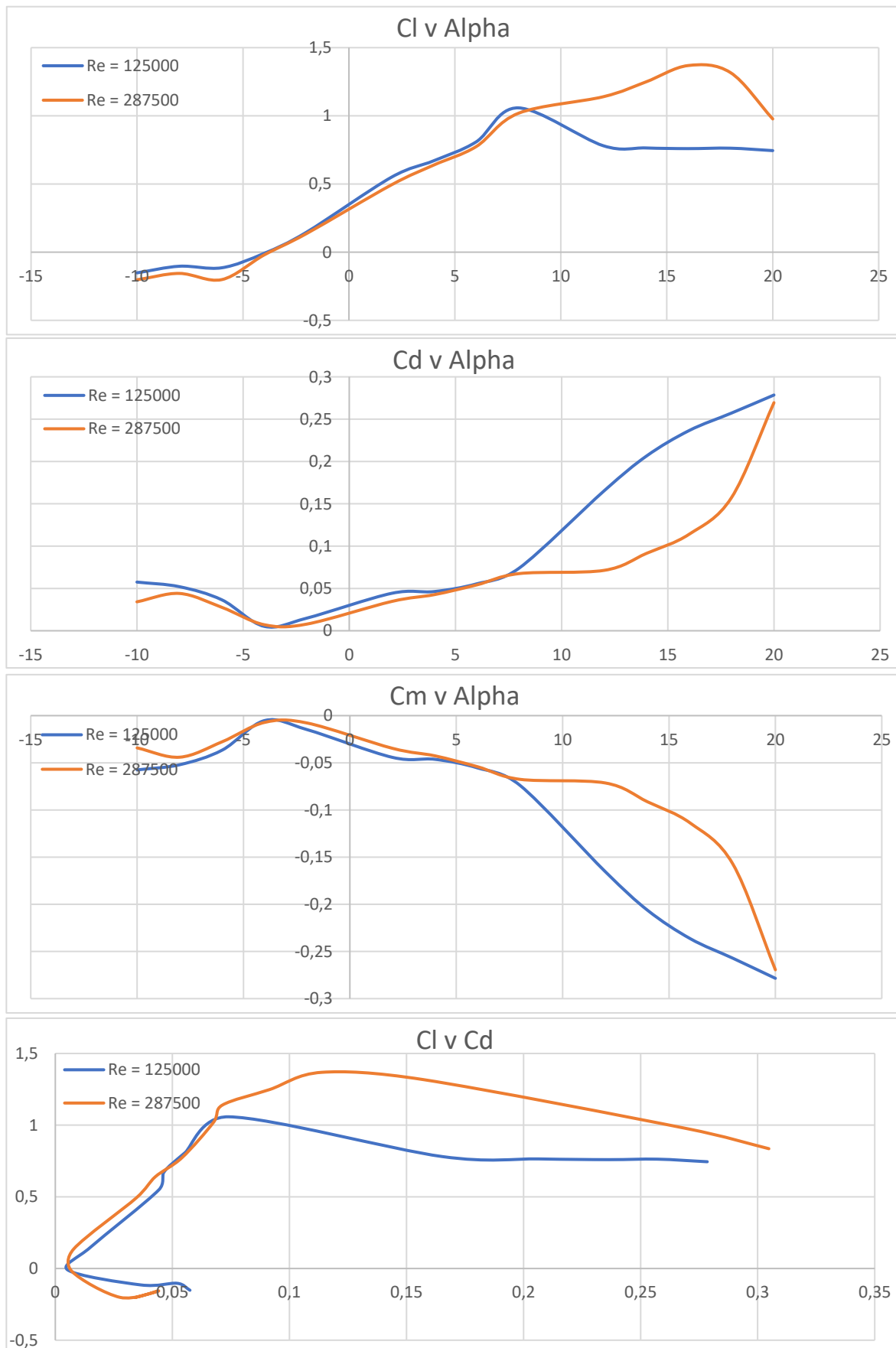
Z Grafů je viditelné, že model plachty nabývá maximálního vztlaku na 10° , kde vztlakový součinitel nabývá hodnot 1,6, resp. 1.5. Následně postupné odtrhávání proudění na sací straně je na plachtě dobře okem viditelné, plachta se začíná třepotat. Plachtu také nemá smysl (stejně jako symetrický profil) proměřovat v záporných úhlech náběhu, plachta pouze „převalí břicho“ a bude symetrická. Jako obtížné se také ukázalo měřit plachtu s nulovým úhlem náběhu. I sebemenší vychýlení k jedné straně má za následek okamžité přisátí plachty a vznik vztlaku. Při nízkých úhlech náběhu je také okem patrný vliv „stěžně“, v našem případě čelní přední tyče rámu, v němž je plachta všita. Pozorování potvrdilo simulace z obr. 11. Nezanedbatelný také bude vliv ocelové tyčky všité v odtokové hraně plachty. Jeho míru ale bez porovnání s modelem bez této tyčky lze jen těžko přesně odhadnout. Z grafů je také patrné, že tento konkrétní model má až do 12° lepší vlastnosti pro pomalejší proudění. I když dojde dříve k odtržení proudění na sací straně, až do tohoto momentu jeví plachta vyšší hodnoty C_l a i když je vyšší také odpor, ve výsledku je polára pro nižší rychlost výhodnější až do zmíněného úhlu náběhu. Na obr 51. je potom dobře vidět, jak plachta v závislosti na úhlu náběhu mění svůj tvar. Se zvyšujícím se náběhem zmenšuje poměr m/c tak, jak jí její vypnutí umožní, dokud nedojde k odtržení.



Obrázek 51: Plachta pod malým (4° , vlevo) a velkým (22° , vpravo) úhlem náběhu

8.5. Model s profilem ETNZ

Jako ostatní modely, i tento model byl proměřen pro rychlosti 10 m/s a 23 m/s, v rozsahu -10° až 20° . Profil sice nikdy pod záporným úhlem náběhu nebude, změřen přesto byl. Výsledky měření jsou následující:

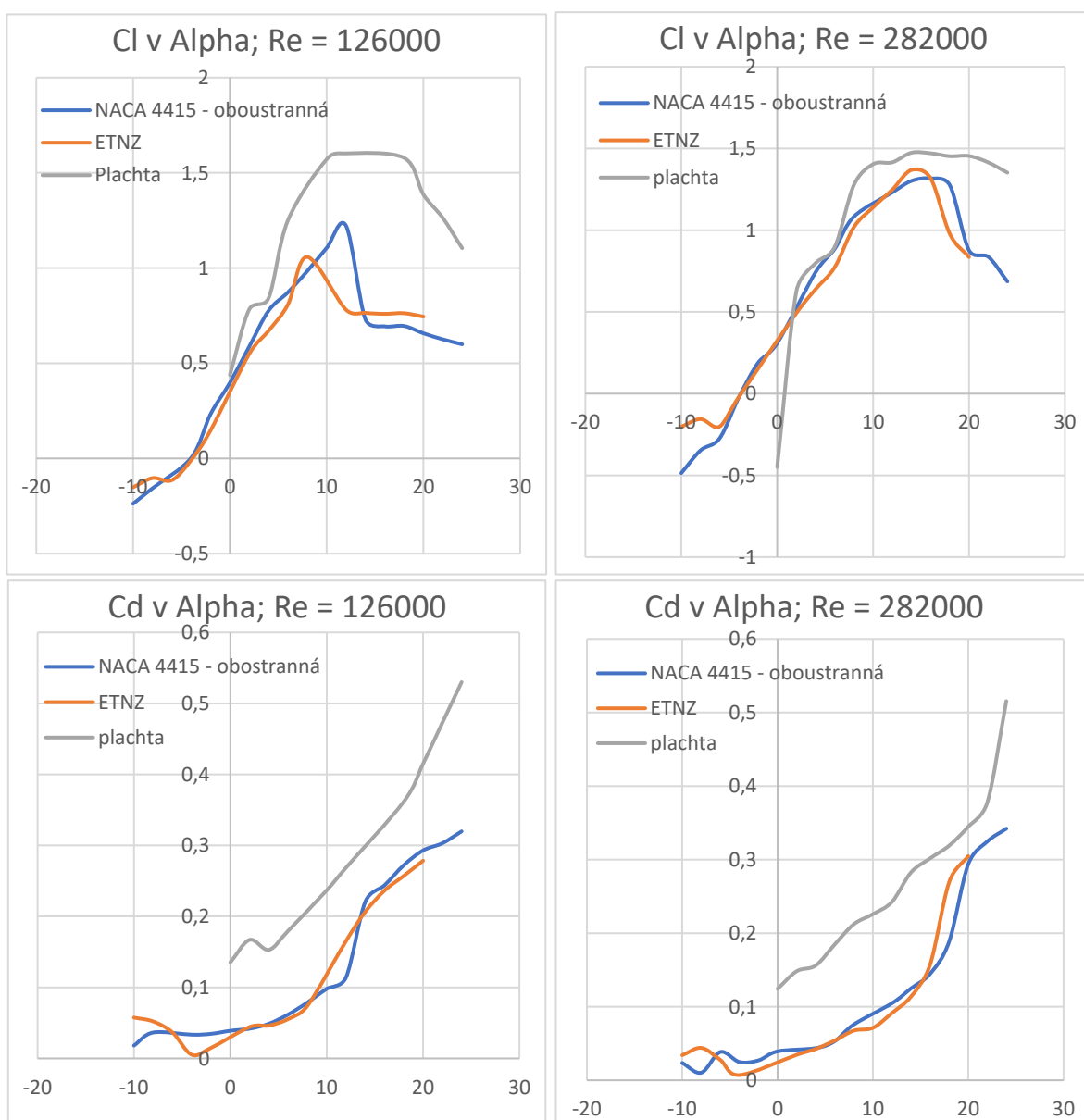


Obrázek 51: Výsledky měření modelu s profilem ETNZ

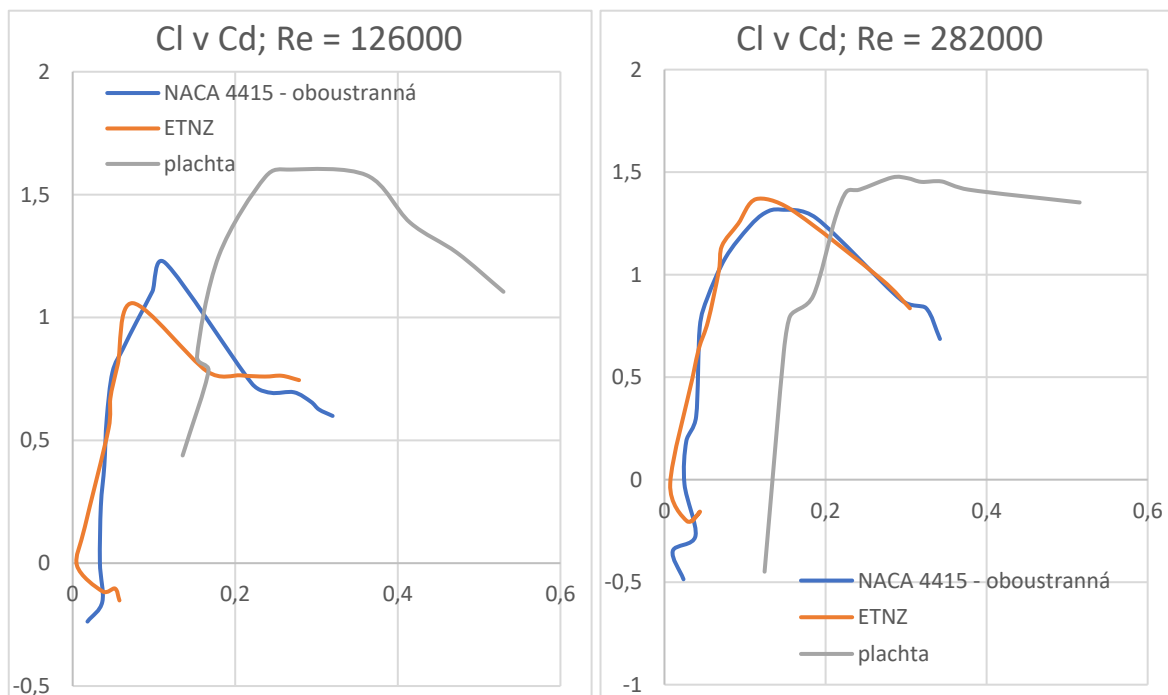
Z prvního grafu je dobře viditelné odtržení proudění pro obě rychlosti. Při vyšší rychlosti došlo ke ztrátě vztaku o 10° později, než v případě rychlosti nižší. Dřívějšímu odtržení pro nižší rychlost odpovídá také vyšší nárůst součinitele odporu, k vyrovnání se hodnoty blíží až při odtržení i rychlejšího proudění.

9. Srovnání naměřených výsledků

Tato kapitola bude věnována podstatě této práce, tedy porovnání vlastností různých profilů. Porovnání profilu NACA 4415 s jeho oboustrannou variantou už bylo provedeno na obr. 48 a ukázalo, že mezi nimi není velkých odlišností. Na obr. 52 a obr. 53 je srovnání profilů, jež svou konstrukcí umožňují použití pro pohon lodí, s tradiční plachtou.

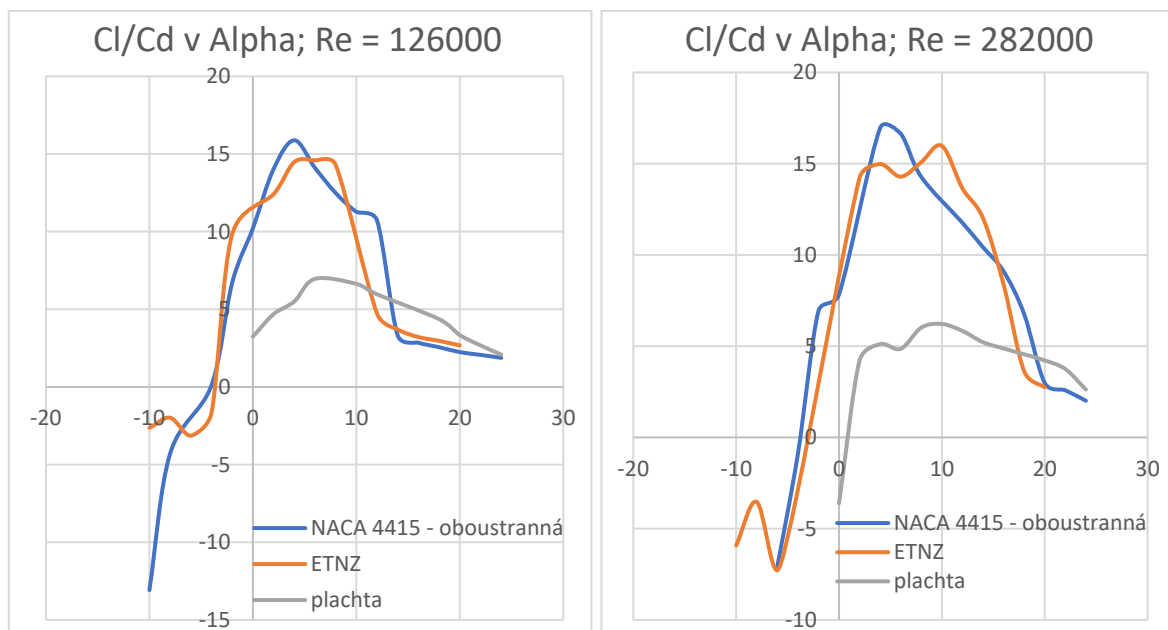


Obr. 52: Srovnání profilů použitelných k pohonu lodí



Obrázek 53: Srovnání polár profilů vhodných pro použití na lodích

Z hodnot C_l a C_d je jasné patrné, že plachta se od obou zbývajících modelů výrazně odlišuje. Vykazuje sice mnohem vyšší hodnoty součinitele vztlaku, ale také vyšší hodnoty součinitele odporu. Zajímavý je také fakt, že v případě plachty došlo k odtržení proudění později (přibližně o 5° a o 8°), než u zbývajících profilů. Na obr. 54 je sestaven graf klouzavosti, tedy závislost C_l/C_d na úhlu náběhu. Klouzavost vyjadřuje poměr mezi součinitelem vztlaku a odporu. Ideální je hodnota klouzavosti co nejvyšší, a to jak pro letadla, tak pro plachetnice. [3]



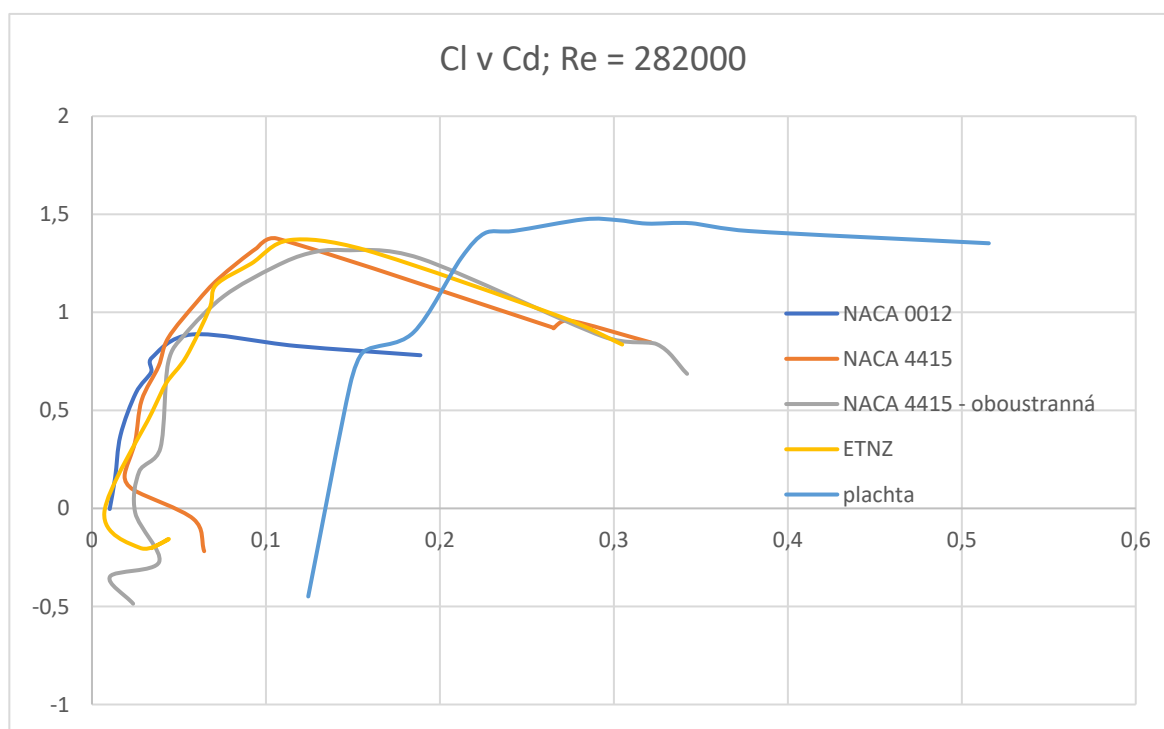
Obrázek 54: Klouzavost profilů použitelných pro pohon lodí

Z grafu na obr. 54 je jasně vidět, že klouzavostí oba pevné profily plachty překonávají, a to až trojnásobně. Pouze ve vysokých úhlech náběhu, kde je již proudění od pevných profilů odtrženo, je plachta překonává. Z hlediska plavby to znamená, že zatímco plachtu je možné použít i vyšší úhly náběhu, měřené segmentové profily by bylo zapotřebí dříve přenastavit na konkrétní podmínky.

Z naměřených výsledků se zdá, že plachta proti segmentovým profilům, u kterých je možné měnit smysl úhlu náběhu příliš neobstála. Sice nabývá vyšších hodnot C_l , zejména pro nižší hodnoty Reynoldsova čísla (až 1,6), má vyšší rozsah prakticky použitelného úhlu náběhu, ale má výrazně vyšší odpor, což se negativně podepisuje na klouzavosti. Pro rychle závodní, nebo sportovní plachetnice je tedy horší volbou než zbylé dva profily.

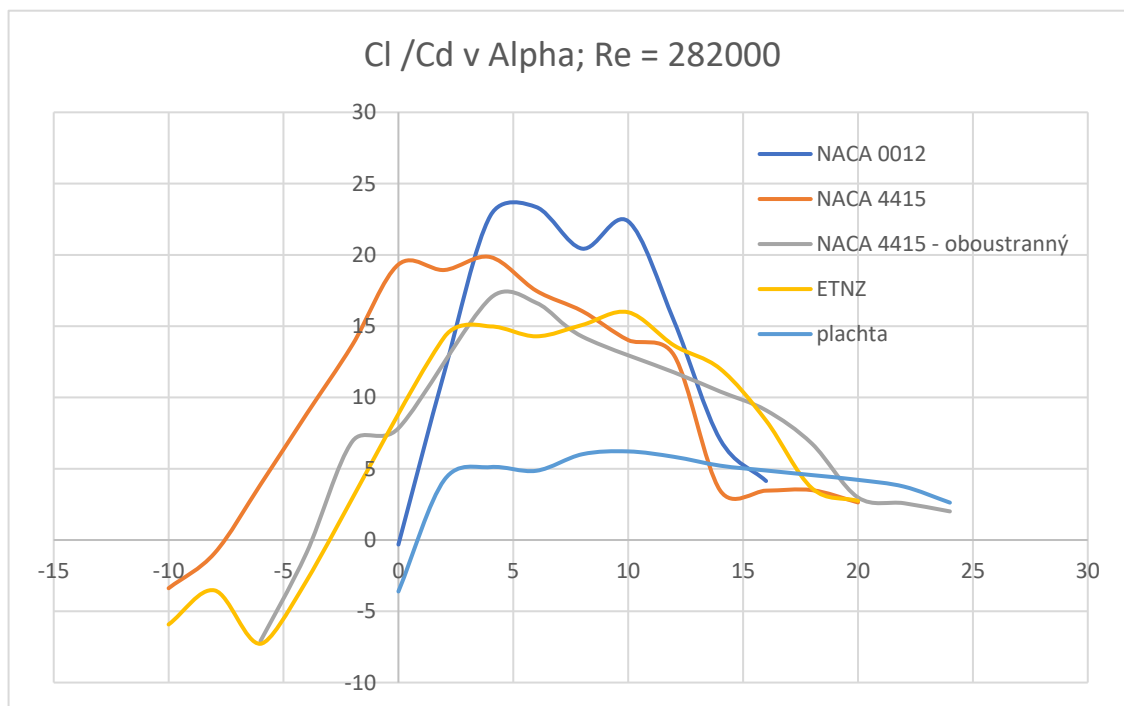
Srovnání profilu kategorie AC72 lodi Emirates Team New Zealand (zkráceně „ETNZ“) a profilu, jež byl navrhnut jako jeho „konkurenční“ profil ukázalo, že profily jsou překvapivě vyrovnané, co se týče téměř všech charakteristik. Pro nižší hodnoty Reynoldsova čísla se dle měření ukázal mírně vhodnější profil kopírující sací stranou profil NACA 4415. V měření s vyšším Reynoldsovým číslem byly rozdíly minimální.

Pro úplnost je na obr. 55 uvedeno srovnání polár všech měřených profilů (již pouze pro vyšší hodnotu Reynoldsova čísla, na obr. 56 potom jejich klouzavost.⁸



Obrázek 55: Srovnání všech měřených polár

⁸ V celé kapitole 8. jsou použity zaokrouhlené hodnoty Reynoldsova čísla na hodnoty 126000, resp. 282000.



Obrázek 56: Srovnání Klouzavosti všech měřených profilů

Srovnání polár ukazuje, že nejnižšího součinitele vztlaku dosahuje profil NACA 0012 (0,8). Na tomto profilu také dojde nejdříve k odtržení proudění na sací straně. Nejvyšší hodnoty součinitele vztlaku dosahuje plachta, avšak při vysokých hodnotách odporu (jak bylo zmíněno dříve). Hodnoty součinitelů pro profil NACA 4415 potom mírně překonávají oba oboustranné profily, ale dochází dříve k odtržení.

Obrázek 56 potom ukazuje, že nejvyšší klouzavosti má profil NACA0012, následovaný profilem NACA 4415. Letecké profily tedy tři měřené „lodní“ profily překonaly.

Profil NACA 4415 je nicméně pro použití na lodi nevhodný, jelikož loď by mohla plout jen jedním směrem a v podstatě by byla její trasa odkázána aktuální směr větru.

Profil NACA 0012 sice jakožto symetrický model může být na lodi použit, ale jeho nízká hodnota maximálního vztlaku by znamenala potřebu velké plochy křídlové plachty tohoto profilu, což by bylo, vzhledem k tomu, že profil nelze „stáhnout“ jako plachtu nebezpečné při proměnlivých podmínkách, nebo bouři.

Klouzavost zbylých tří měřených modelů (dvou segmentových, jedné plachty) byla popsána výše.

10. Závěr

Jak bylo zmíněno v úvodu, námořní plavba s použitím plachtění má stále potenciál. Svět závodních plachetnic a také windsurfingů už zcela jasně opouští klasické měkké plachty ve prospěch pevných křídlových plachet. Ty dle dostupných informací poskytují lepší vztlak při menší potřebné ploše a menším odporu.

Tato práce toto tento trend potvrzuje. Segmentové profily, jež by v praxi byly vybaveny mechanismem pro změnu smyslu úhlu náběhu, a tedy mohli nahradit klasickou lodní plachtu vykazovaly během měření vynikající výsledky. Za oběma osvědčenými leteckými profily rodiny NACA zaostaly jen mírně.

Nejlepších výsledků nakonec dosáhl profil NACA 4415. Dosahoval vysokých hodnot součinitele vztlaku (vyšších hodnot dosáhla pouze klasická plachta) a klouzavost byla také vynikající. Bohužel ale musíme tento profil z našeho výběru vyřadit. Jak bylo řečeno výše, profil nespĺňuje zásadní podmínku „oboustrannosti“ a loď by s ním mohla jezdit jen tak, jak vítr fouká.

Profil NACA 0012 dosáhl vynikajících hodnot klouzavosti, ale maximální součinitel vztlaku, jež poskytuje, je nejnižší ze všech měřených profilů. To pro pohon lodi není příliš vhodné, jelikož aby byla vyvinuta dostatečná síla, musela by mít plachta velkou plochu, což není žádoucí. Profil není možné „skasat“, což je velmi nebezpečné v nestálém počasí, kdy prudká změna směru větru může loď zcela převrátit.

Oba segmentové, oboustranné profily během měření vykazovaly velmi podobné vlastnosti. I přes nepatrnou výhodu v podobě vyššího koeficientu vztlaku pro nízké rychlosti obtékání (ne vždy fouká silný vítr, tedy je to rozdíl využitelný) profilu navrženého v této práci má profil ETNZ nespornou výhodu v tom, že je sestaven pouze ze dvou segmentů a jeho nastavování do ideální polohy je tím pádem jednodušší.

Klasická plachta vykazovala v porovnání s ostatními profily zcela odlišné výsledky. Dosahovala vysokých hodnot součinitele vztlaku, ale i součinitele odporu. Vzhledem k velkému odporu lodi, ale není odpor plachty natolik markantní, aby nebylo zjevné, že pro těžké lodě bude mít plachta stále význam. Její největší výhodou ale zůstává možnost téměř absolutní kontroly. Což je zásadní pro bezpečnost plavby, případně pro zábavu posádky.

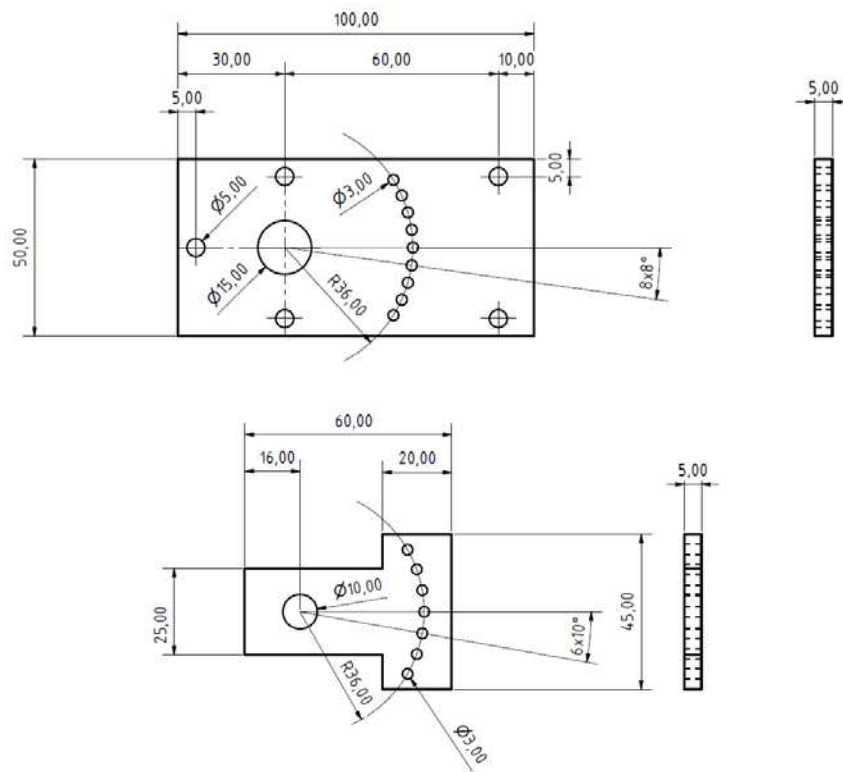
Na konci úvodu zmíněné aerodynamické váhy byly umístěny do laboratoře mechaniky tekutin a jsou plně funkční, i když stále nabízí prostor pro vylepšení.

Použité zdroje

- [1] JEŽEK, VÁRADIOVÁ, ADAMEC. *Mechanika tekutin*. Vydavatelství ČVUT, Praha 6, 2000
- [2] BROŽ. *Aerodynamika nízkých rychlostí*. Vydavatelství ČVUT, Praha 6, 1990
- [3] ZÁRYBNICKÝ. *Aerodynamika podzvukových rychlostí*. Praha, 1999
- [4] Airfoil Tools, NACA digit generator, Copyright © 2017 (cit. 3.4.2017)
- [5] DEDEKAM. *Plachty*. Yacht, 2008
- [6] REDFORD YACHT DESIGN, Australia, 2015 (cit. 4.5.2017)
- [7] FOSSATI, *Aero-Hydrodynamics and the Performance of Sailing Yachts*. McGraw-Hill Education, 2010
- [8] ANDERSON, *The physics of sailing Explained*. Sheridan House, New York, 2003
- [9] LAFFORGUE, *Sails: from experimental to numerical*. University of Southampton, 2007
- [10] „HOPSONROAD“, *Forces on sail*, Wikipedia, 2015 (cit. 4.5.2017)
- [11] GARRETT, *The Symmetry of Sailing*. Sheridan House, 1996
- [12] SailOnline, *Sailonlines Boathouse Polar Diagrams and Boat Info*, 2017 (cit. 4.5.2017)
- [13] Superyachts.com, *Malthese Falcon Yacht* (cit. 6.6.2017)
- [14] Emirates Team New Zealand, ©2014 (cit. 6.6.2017)
- [15] WILD, *What are wind tunnels?*. NASA Knows!, 5.4.2017 (cit. 9.6.2017)
- [16] MCKIE, *Low-speed wind tunnel tests of a two dimensional wing fitted with two plain differentially deflected trailing edge flaps*. John MCKie London, H.M. Stationery Office, 1975
- [17] HUDSON, *Aerodynamics Lab Exercise*, 27.2.2003 (cit. 9.6.2017)
- [18] FORSSATI, MUGGIASC, *Experimental Investigation of Sail Aerodynamic Behavior in Dynamic Conditions*. Transaction – Society of Naval Architects and Marine Engineers, 2013
- [19] SAHINI, *Wind Tunnel Blockage Corrections*, Texas University, 8.2004

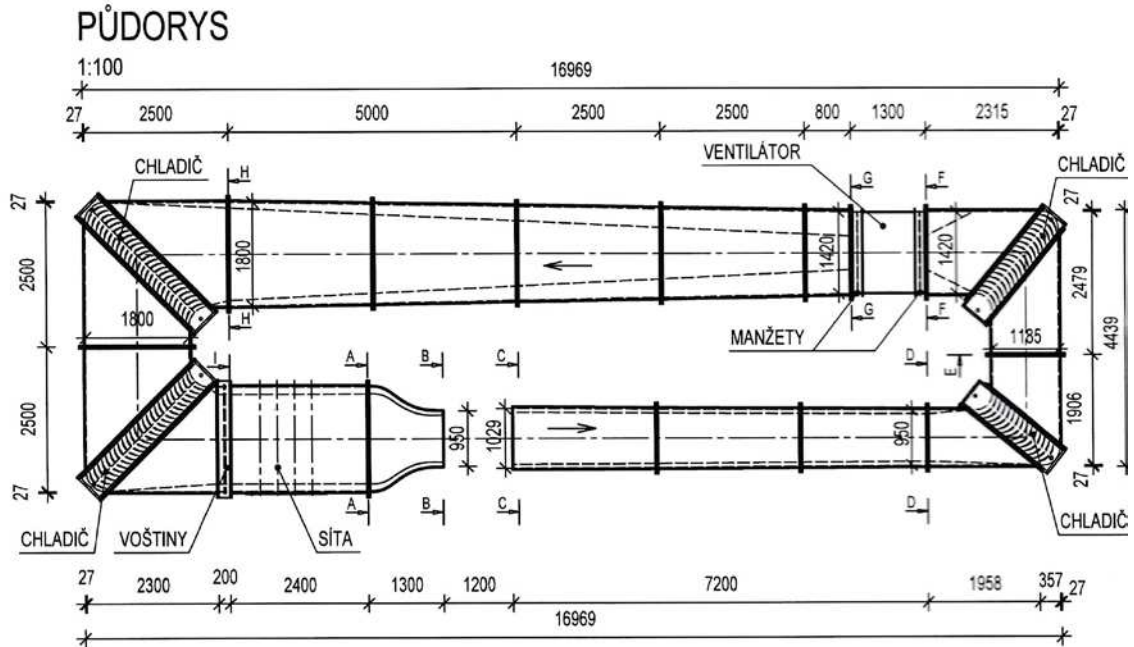
Příloha A

Aretovací destičky pro nastavení konkrétního úhlu náběhu



Příloha B

Schematický náčrt aerodynamického tunelu v laboratoři mechaniky tekutin



VNITŘNÍ PRŮŘEZY TUBUSU

