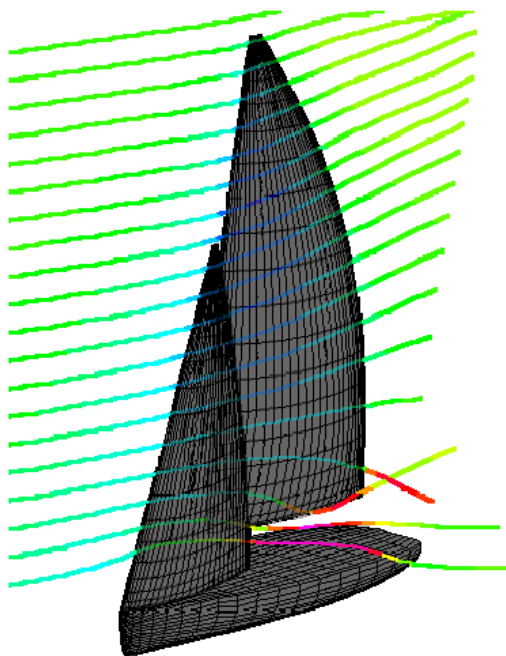


Andrej Kavčič

## ***Aero-hidrodinamika jadranja***



Mentor: prof. dr. Rudi Podgornik

Ljubljana, oktober 2007

## POVZETEK:

Seminar obravnava v uvodu fizikalne lastnosti jadranja, nato pa se osredotoči na fiziko jadra in kobilice, ki sta kot bodo videli, vitalnega pomena pri optimizaciji tovrstnih plovil. Tekom seminarja se bomo sprehodili od klasične dinamične slike, preko rojstva dinamičnega vzgona in matematičnih analitičnih modelov do danes popularnih izkustvenih in numeričnih pripomočkov dinamike tekočin. Naj poudarim, da se bomo vseskozi opirali na primere s prakse, tako da seminar ne bo zvenel šolsko suhoparno.

## KAZALO:

|                                                      |    |
|------------------------------------------------------|----|
| - uvod . . . . .                                     | 3  |
| - sestavni deli jadrnice . . . . .                   | 3  |
| - dinamika jadranja - shema sil . . . . .            | 4  |
| - shema navorov . . . . .                            | 5  |
| - uvod v aerodinamiko . . . . .                      | 5  |
| - aerodinamika jader - teorija tankih kril . . . . . | 6  |
| - primer 2D krila . . . . .                          | 8  |
| - teorija 3D tankih kril . . . . .                   | 9  |
| - teorija mejnih plasti . . . . .                    | 11 |
| - realni opis . . . . .                              | 12 |
| - primer . . . . .                                   | 12 |
| - optimizacija po višini jadra . . . . .             | 14 |
| - pojav nenadnega padca količnika upora . . . . .    | 15 |
| - hidrodinamika . . . . .                            | 16 |
| - kobilica kot krilo jadralnega letala . . . . .     | 17 |
| - rizik tankih profilov . . . . .                    | 19 |
| - zaključek . . . . .                                | 21 |
| - uganka . . . . .                                   | 22 |
| - literatura . . . . .                               | 22 |
| - opombe . . . . .                                   | 23 |

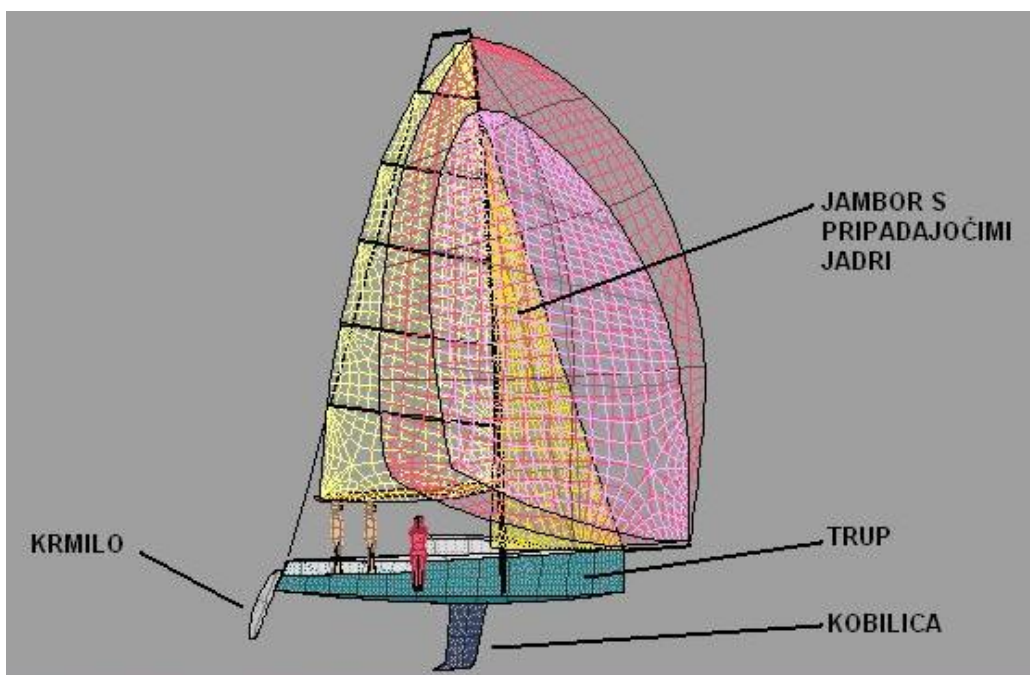
## UVOD:

Jadranje postaja čedalje bolj popularen šport, pri tem pritegne množico športnih in rekreativnih navdušencev, ki izkustveno spoznajo prve zakonitosti jadrnanja, pri tem pa se nehote pogloblja prepad med laično in izvirno sliko jadrnanja. Zato je potrebno predstaviti nekaj fizikalnih osnov, preko katerih je skorajda nemogoče osvojiti izvirno sliko tega športa. Naj omenim, da se bomo predvsem posvečali plovbi v veter – tj. ko piha veter nekje s sprednje strani plovila – saj omenjena slika najbolj zadovolji obravnavano problematiko. To ne pomeni, da je plovba z vetrom tako dolgočasna, da ne potrebuje razlage, ampak je preskok od trivialne razlage (efekt padala) do znanstvene analize enostavno prevelik in nima vmesnih stopenj.

Poleg tega, pa se v samo problematiko aero-hidrodinamike ne bo smiselno preveč poglobljati, saj omenjeno področje obsega poleg gibanja po zračnih ter vodnih masah tudi samo gibanje po gladini. Slednje pa je sila komplicirano in neekonomično, kar dokazuje tudi narava, ki ni razvila živalskega bitja, ki bi se premikalo izključno po gladini, tako da lahko kaj hitro nastane obravnava enostavne jadrnice prekomplicirana. Tako se bomo držali samo otipljivih obrazložitev.

## SESTAVNI DELI JADRNIC:

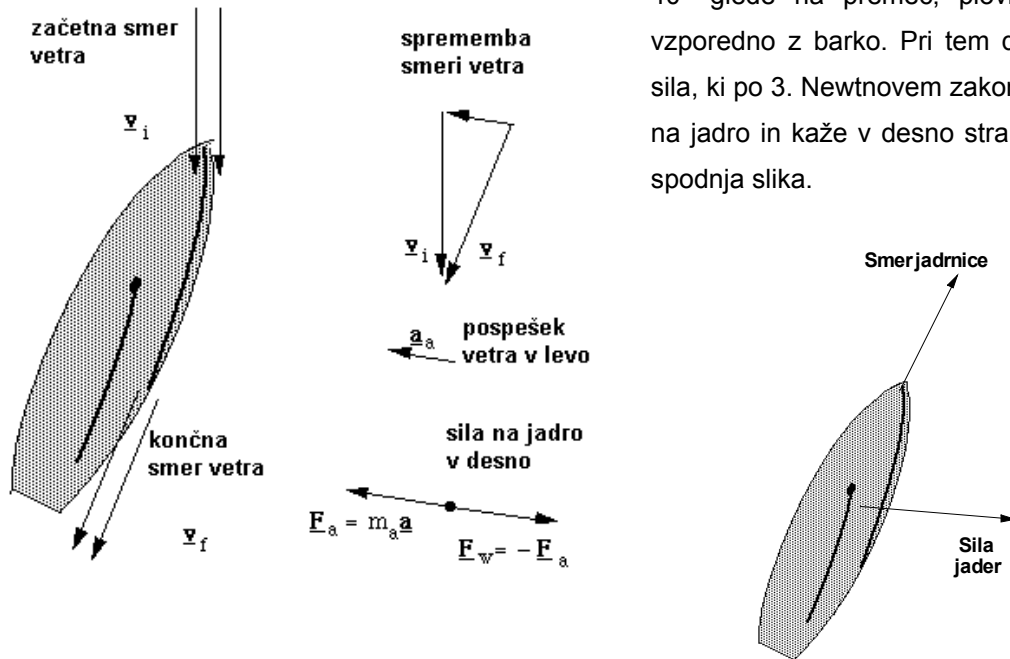
Kot se spodobi za začetek, je potrebno predstaviti nekaj sestavnih delov, da vemo o čemu bo tekla beseda. Spodnja slička naj služi temu, da je možno praktično celotno aero-hidrodinamiko opisati samo z nekaj sestavnimi deli plovila, ne pa s celotno anatomijo plovila, ki že na začetku privede do navideznega (in v resnici nepotrebne) globokouma.



Sl. 1: recimo, če uporabimo še čudo dodatnih izrazov, ki opisujejo trimanje, balansiranje, probojnost skozi val...itd, se v resnici vse navezuje zgolj na nekaj osnovnih pojmov.

## DINAMIKA JADRANJA:

Nekako najlažji začetek fizikalne obravnave se začne z opisom gibanja, ki je posledica sil, tj. z dinamiko. Tokrat bomo imeli v mislih jadranje proti vetru in izrabili veter kot izključno pogonsko sredstvo. Na spodnji sliki so prikazane smeri vetra, sprememba smeri vetra in posledično sile, ki zaradi spremembe smeri vetra delujejo na jadro.

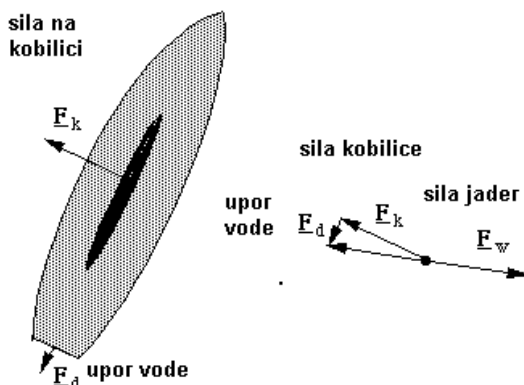


Recimo, da nam tokrat piha veter pod kotom  $40^\circ$  glede na premec, plovilo pa zapusti vzporedno z barko. Pri tem deluje na veter sila, ki po 3. Newtonovem zakonu deluje nazaj na jadro in kaže v desno stran kot prikazuje spodnja slika.

Bistveno je, da sama sila jader v tem primeru ne deluje direktno v smeri plovbe, praktično samo del jo poganja plovilo naprej, večina pa v stran.

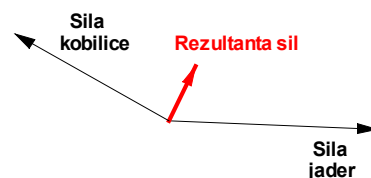
## Shema sil – dinamični pogoji:

Večkrat se tako pozablja omeniti primarni pomen kobilice, katere namen je, pa naj se sliši še tako nenavadno, da poganja plovilo naprej. Šele ona vzpostavi (sama od sebe) silo v levo stran, ki pripomore k pravi rezultanti sil in že na tem mestu se vidi, da bo potrebno kobilici nameniti vsaj tako težo kot jadrom.

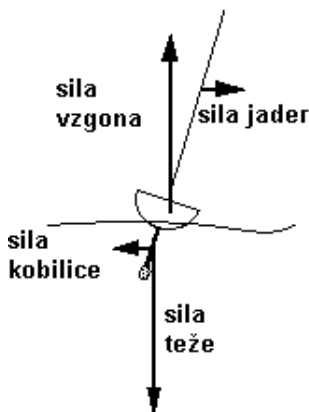


Vzrok nastanka te sile bomo opisali v naslednjih straneh, zaenkrat jo samo omenimo, ker je esencialnega pomena pri plovbi v veter. Naj omenimo, da je primarni namen kobilice vzpostavitev te sile, saj brez nje plovilo ne more pluti v veter (obtežitev je šele sekundarnega pomena).

$$\vec{F}_{jader} + \vec{F}_{kobilice} = \vec{F}_{pogonska}$$



### Shema navorov – statični pogoj:



Sila jader in sila kobilice imata seveda različni prijemališči in tako nagibata plovilo v smeri urinega kazalca, za uravnoteženje navorov poskrbi sila teže ter sila vzgona, ki imata ravno tako različni prijemališči in ravna plovilo. Pri večjih plovilih (nad 5m) je kobilica obtežena z namenom nižanja težišča.

$$\vec{M}_{jader} + \vec{M}_{kobilice} = \vec{M}_{teže} + \vec{M}_{vzgona}$$

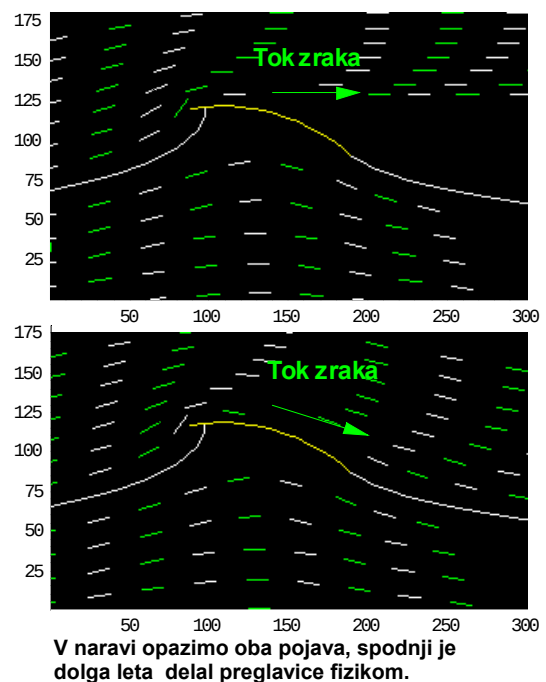
Do sedaj imamo zapisane samo štiri sile, manjka samo še sila upora in dinamični opis je že popoln. Če se bo kasneje pojavila še kakršnakoli dodatna sila, jo bomo vključili v že obstoječ sistem sil. Na tej točki bomo ločili podvodni del na hidrodinamski in nadvodni na aerodinamski, še prej pa bomo opisali njune skupne lastnosti.

### UVOD V AERODINAMIKO:

Moderna aerodinamika je relativno nova veda, začela se je šele pred dobrimi sto leti, za njenega očeta pa velja Nikolaj J. Žukovski, ki je leta 1904 ustanovil prvi aerodinamski inštitut v Moskvi (šeletem se je začel razvoj pravega pravega letalstva)<sup>1</sup>. Ni naključje, zakaj se je omenjeno področje začelo razvijati tako pozno, saj slika dinamičnega vzgona ni intuitivna. Za opis je bila potrebna visoka matematika, katere Newton, Bernoulli...itd še niso poznali, s tedaj znanim matematičnim orodjem pa je niso znali pravilno opisati (Napačni Newtonski in Bernoullijevski modeli so ponazorjeni v seminarju Saša Kneza dvodimenzionalni modeli vzgona letalskih kril, 2005).

Razumljivo je, da na spodnji strani krila zavijejo zračne mase navzdol saj čez krilo ne morejo potovati, ni pa samoumevno zakaj in do katere mere zavije zgornja plast zraka navzdol. Na desni strani imamo dva primera, v prvem potujejo zračne mase naravnost, češ zakaj pa bi se odklonile navzdol?

V drugem pa potujejo zgornje zračne mase vzporedno s krilom navzdol in tako pripomorejo, da tudi zgornji del zraka spremeni gibalno količino in tako vpliva na silo. Lahko bi rekli, da velik del sile na telo prispevajo zgornje zračne mase, še vedno pa ni jasno do katere višine nad krilom zavije zrak navzdol.



V naravi opazimo oba pojava, spodnji je dolga leta delal preglednice fizikom.

Na videz enostavni problem je bil rešen šele proti koncu 19. stol, ko je matematika že poznala kompleksno analizo s konformnimi preslikavami, v fiziki pa se je rojeval nov pojem s katerim opišemo snov, ne glede na njeno zgradbo, tj. kontinuum – tu je bil narejen bistveni napredek, saj smo zreducirali vse tekočine pod en pojem. Verjetno tudi ni naključje, da se je malo pred tem razvil elektromagnetizem, ki je nato odprl pot aerodinamiki, saj je slednja dodobra izkoristila pojem potenciala in ga elegantno izrabila za opis tokovnic (potencialni tok) s pomočjo kompleksnega potenciala. Vse skupaj pa je zaokrožil Žukovski, ki je zgoraj omenjen problem opisal s pomočjo nove količine – tj. cirkulacije (in tako zaobjel zgoraj zastavljeno vprašanje, brez da bi ga bilo potrebno eksplicitno rešiti), nemški matematik Kutta pa je dodal nujen robni pogoj, ki ohranja hitrostno polje okoli krila kot končno. Na ta način smo šele dobili prvo zadovoljivo teorijo, ki je pojasnila silo na telo v toku tekočine oz. rojstvo dinamičnega vzgona.

Vredno je še omeniti, da sama teorija ni razjasnila vzroka, češ zakaj zračne mase zavijejo navzdol, ampak je dala samo pravilni matematični princip opisa danega pojava v naravi – to kar fizika od Newtona naprej vedno išče. Zato odgovor na zgoraj zastavljeno vprašanje 'zakaj zavijejo zračne mase navzdol' ni esencialnega pomena za opis pojava – dokler v matematičnem jeziku ne razkrije česa novega. Res je, da poznamo odgovor zakaj zavijejo zračne mase navzdol - zaradi viskoznih efektov na meji zraka in krila, t.i. Coanda efekt (romunski aerodinamik Henry Coanda, 1930), ampak zaradi tega ne znamo nič bolje opisati pojava; ta odgovor služi bolj za osmiseljitev naše radovednosti.

Da ne bomo preveč zabredli v zgodovino aerodinamike, se bomo vrnili nazaj na aerodinamiko jader in bomo tokrat spustili matematičen opis teorema Žukovski (in obtekanje valja), saj je bil predstavljen že v mnogih seminarjih izpred prejšnjih let:

- Joukowski transform and flow around aerofoils, Mitja Uršič, 2000;
- Increasing lift of an airfoil, Luka Vidic, 2002;
- Dvodimenzionalni modeli vzgona letalskih kril, Sašo Knez, 2005...itd.

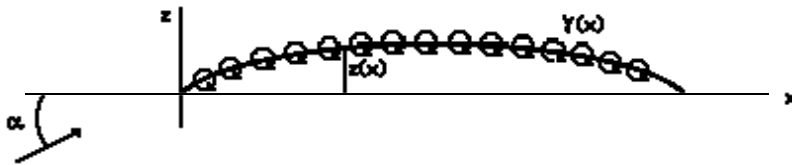
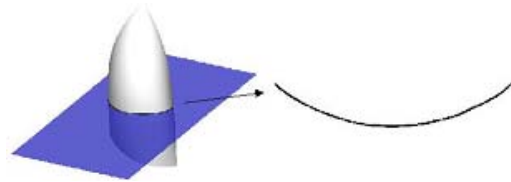
## **AERODINAMIKA JADER:**

Če smo zgoraj tako rekoč dodelili izum letala kot posledico teorije Žukovskega, potem bode v oči dejstvo, da za rojstvo jader ni bila potrebna kakršnakoli novodobna znanost, saj obstajajo že več tisoč let, pa kljub temu izkoriščajo silo dinamičnega vzgona<sup>2</sup>. Zaradi tega paradoksa – razvoj profila krila kot posledica znanosti proti razvoju profila jader kot posledica evolucije jadriranja – se danes lepo vidijo posledice, do katerih bomo prišli v nadaljevanju.

### **Teorija tankih kril:**

Sedaj pa poizkušajmo končno kaj izračunati. Jadra lahko obravnavamo kot zelo tanka krila in si sposodimo Prandtlovo teorijo tankih kril iz letalstva. Osnova ideja je, da po profilu porazdelimo vrtnice ter jih opišemo s pomočjo Biot-Savartovega zakona (kot da imamo tokovnice vzdolž krila). Samo izpeljavo si bomo ogledali le na hitro, saj nas tokrat bolj zanima rezultat<sup>3</sup>.

Vzdolž jadra pogledamo kaka je krivina in nanjo porazdelimo majhne vrtince. Lahko bi nanjo porazdelili tudi tokovne izvore, samo tisto je bolj praksa debelejših profilov.

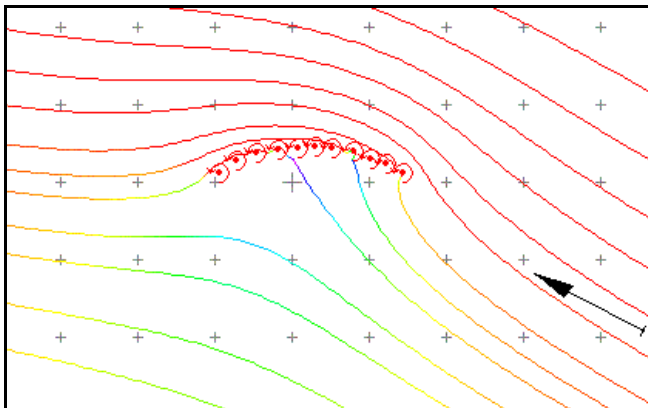


Nato hitrostno polje vrtincev, zapišemo s pomočjo Biot-Savarta takole:

$$w(x) = \frac{1}{2\pi} \int \frac{\gamma(x')}{(x-x')} dx' \quad , \text{ kjer } \gamma(x') \text{ predstavlja posamezno cirkulacijo, glavni robni pogoji pa zapišemo kot:}$$

$$v_0 \sin(\alpha + \arctg(-\frac{dz}{dx})) + w(x) = 0 \quad , \text{ ki pravi, da pravokotno na jadro ni toka tekočine.}$$

Nato pa sledi obilica poenostavitvev (upoštevani le mali koti), razvoj in upoštevanja robnih pogojev (pri tem je bistven Kutta pogoji na robovih jadra), ki na koncu privede do rezultata celotne cirkulacije okoli krila  $\Gamma$  in nato preko Žukovskega do dinamične sile vzgona oz. koeficienta vzgona  $C_l$ .



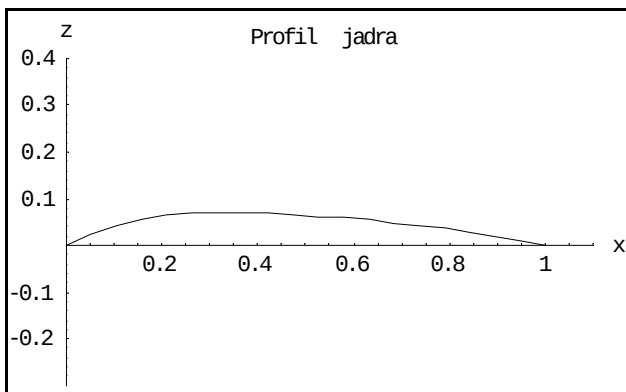
Na levi je shematski prikaz potencialnega toka, s tem da se v sredini nahaja 11 enako močnih vrtincev.

Tokovnice tako spominjajo na podoben primer, kot če bi imeli v sredini tanko jadro.

Skratka na ta način dobimo relativno enostaven rezultat za izračun vzgonskega količnika za poljubno krivuljo, ki se nahaja v potencialnem toku kot:

$$C_l = 2\pi(\alpha + \frac{1}{\pi} \int_0^\pi \frac{dz}{dx} (\cos\theta - 1) d\theta) \quad , \text{ kjer sta } \theta \text{ in } x \text{ povezana kot } x = \frac{c}{2}(1 - \cos\theta) \text{ , } \alpha \text{ predstavlja naletni kot zraka, } z \text{ in } x \text{ pa sta koordinati.}$$

**Primer:** recimo, da ima naše jadro sledečo obliko (gledano s floris):



Na vertikalni profil jadra 'nafitamo' ustrezen polinom, tako da dobimo krivino izraženo v matematičnem jeziku.

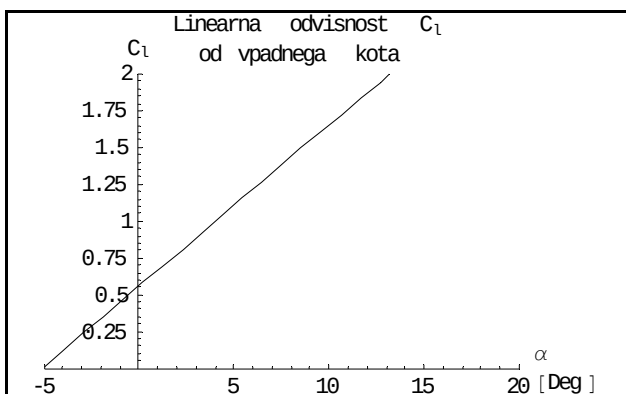
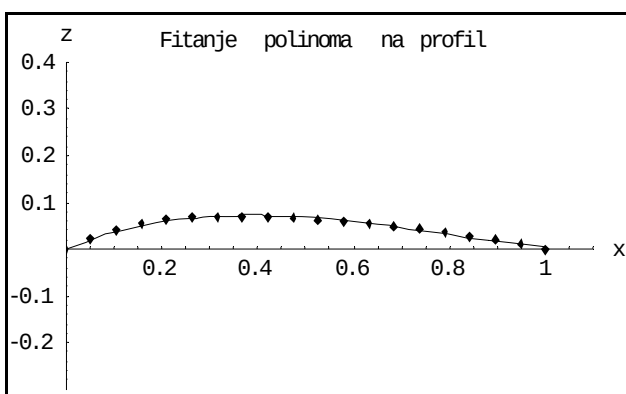
Da ne bomo komplicirali, pojdemo tokrat samo do polinoma tretje stopnje. Rezultat naše krivulje je približno:

$$z(x) \approx 0.3x^3 - 0.7x^2 + 0.4x$$

Nato ga vstavimo v zgornjo enačbo,  $x$  pišimo kot novo spremenljivko:

$$x = \frac{c}{2}(1 - \cos\theta) \text{ in dobimo rezultat:}$$

$$\underline{C_l \approx 2\pi(\alpha + 5^\circ)}$$



Tako dobimo linearno odvisnost vzgonskega količnika od naletnega kota:

$$C_l = 2\pi(\alpha + \alpha_0);$$

$\alpha_0$  predstavlja geometrijsko zvrtje jadra, ki v našem primeru znaša okoli  $5^\circ$ .

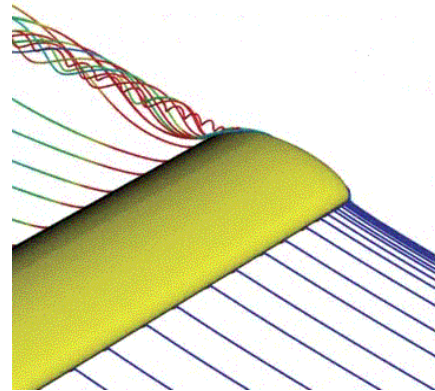
Razumljivo je, da pri večjih kotih stvar ni relevantna saj smo v sami teoriji predpostavili majhne kote, je pa dobra osnova za nadaljnje razmišljanje. V resnici daje ta model kar dobre rezultate pri majhnih kotih (recimo, v našem primeru od  $2^\circ$  -  $6^\circ$ ), je pa seveda neprimeren za izračun optimalnega profila saj nam bo z iterativnim ponavljanjem raznih krivulj izbral najbolj zakrivljeno – pač v skladu s teorijo potencialnih polj, ki še ne pozna ne viskoznosti ne odlepljanja mejne plasti. To si bomo pogledali malo kasneje, sedaj pa dopolnimo naš model s tem, da upoštevamo velikost jader.

Omenimo še, da je bila to na splošno prva teorija, ki je omogočala analitičen izračun vzgona, oz. po domače rečeno na njej je letela celotna aviacija 1. sv. vojne.

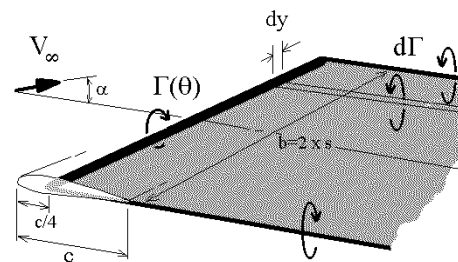
### Teorija 3D tankih kril - inducirani upor:

Če upoštevamo, da je krilo končno, nastane na robovih vrtnec kot posledica različnih pritiskov na obeh straneh krila. Prandtl je pojav opisal na podoben način kot v 2D primeru, le da je dodal delne vrtnice še vzdolž krila (tokovnice pa tečejo prečno na krilo, s tem da je najmočnejša na robovih).

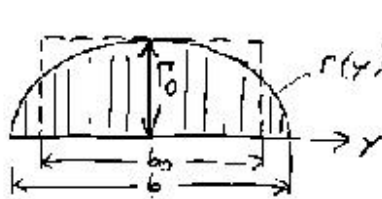
Rešitev je danes znana pod pojmom teorija realnih kril oz. teorija Lanchester - Prandtl (1918), bistvena pa je ugotovitev, da je za maksimalno učinkovitost potrebna eliptična porazdelitev vzgona nad krilom. Samega rezultata v obliki enačbe ne bi omenjali, ker bi bil potreben obširen komentar posameznih parametrov, zato pa si raje oglejmo kar praktične rezultate.



Induciran vrtnec na robu krila



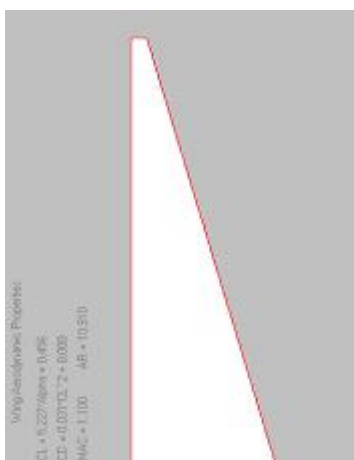
Matematični opis na robovih krila



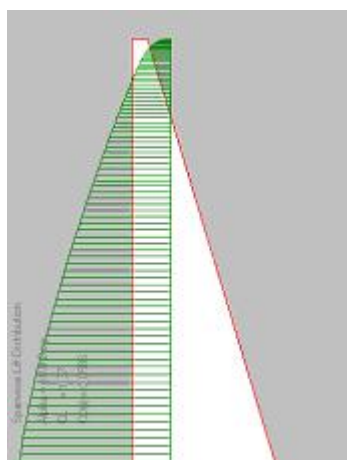
Če predpostavimo eliptično porazdelitev cirkulacije, dobimo najmanj vrtncev na robovih



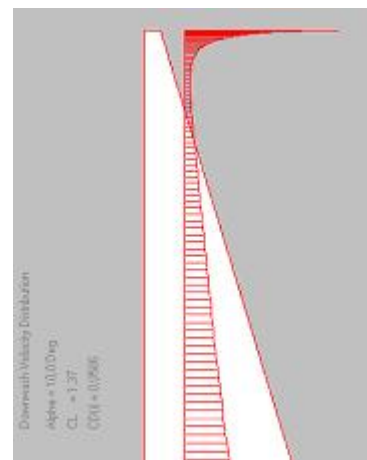
**Primer:** recimo, da imamo trikotno jadro (velikosti 2.5 x 10m) in si oglejmo kake popravke vzgonskega količnika nam da ta teorija, vzemimo kar isti profil kot smo ga imeli v prejšnjem primeru in pogledjmo rezultate pri 10 stopinjskem naletnem kotu:



**Trikotno jadro,  $\alpha=10^\circ$ , geometrijsko zvitje =  $5^\circ$  dimenzije 2.5 x 10m**



**Zelena barva ponazarja popravek vzgonskega količnika po višini jadra**



**Rdeča barva prikazuje jakost vrtncev po višini jadra**

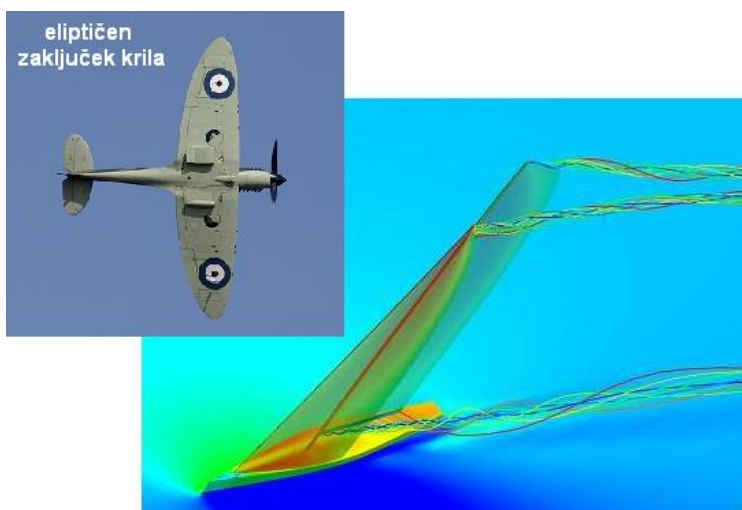
**2D primer:**  $C_{l(\alpha=10^\circ)} = 1.65$

**3D primer:**  $C_{l(\alpha=10^\circ)} = 1.37$

Zaradi končne dimenzije jadra, smo v našem primeru dobili za skoraj 20% manjši vzgonski količnik, pa smo upoštevali le zgornje odprte jadra. Razlika ni tako velika, ker imamo sorazmerno visoko in ozko jadro.



Tako imajo praviloma regatne jadrnice zaprt spodnji rob prednjega jadra, zadnje (glavno) jadro pa je zaradi praktičnih razlogov odprto (oz. delno zaprto saj znaša odprtina le dober meter ali dva)<sup>4</sup>. Zgornji rob (popolnoma odprt) pa predstavlja tako največjo izgubo vzgona.



Zgornji rob jader je večkrat oblikovan v eliptičnem profilu, ker po Prandtlvi teoriji omogoča boljše izkoristke vzgona kot katerakoli druga oblika. Ta teorija je bila še posebej aktualna proti koncu 2. sv. voj., ko je imelo marsikatero letalo eliptičen rob kril (Spitfire, Thunderbold...).

Sedaj pa bi sledilo logično vprašanje, zakaj pa niso vsa krila (oz. jadra) eliptično zaključena, če je to teoretično najboljši zaključek krila? Ne smemo pozabiti, da do sedaj sploh nismo govorili o viskoznosti, viskoznost je aerodinamika žrtvovala že v začetni fazi, da je sploh prišla do teorema Žukovski. Celotna teorija potencialnih tokov (in s tem dobršen del aerodinamike) sloni na Eulerjevi enačbi<sup>5</sup>, ki upošteva

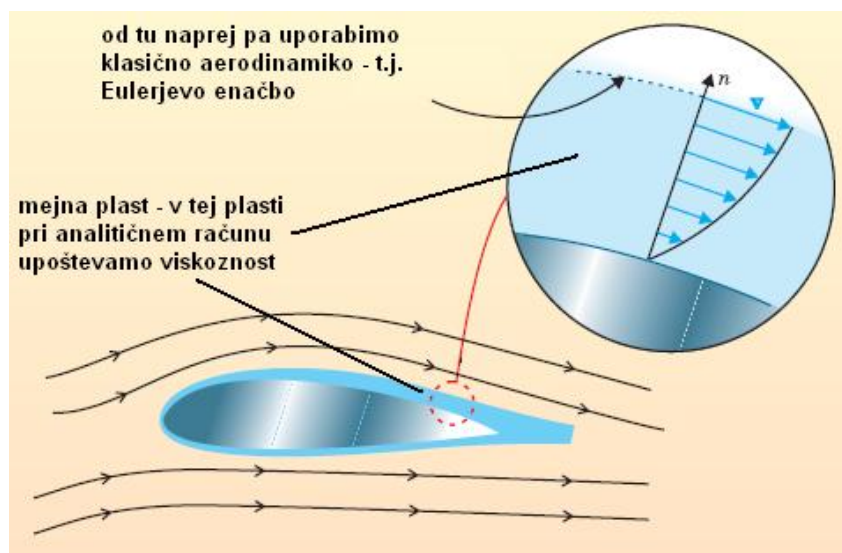
obilico poenostavitev, zato ne škodi, da jih zavestno navedemo (z namenom, da vemo kaj vse smo zanemarili, da ne bi nehote prišlo do paradoksov kakršni so se tekom zgodovine že večkrat pojavili – recimo d'Alembertov paradoks):

1. Vseskozi nosimo predpostavko, da so sile kratkega dosega – sile polja ne upoštevamo (pri zapisu napetostnega tenzorja).
2. Za viskoznost velja linearni zakon, t.i. Newtonske tekočine → tu je že možen zapis Navier-Stokesove enačbe.
3. Tekočina je nestisljiva oz. njena gostota je konstantna.
4. Tekočina je neviskozna → tu je šele možen zapis Eulerjeve enačbe.

Zato je bil naslednji veliki uspeh aerodinamike, upoštevanje viskoznosti oz. rojstvo teorije mejnih plasti. To je uspelo, komu drugemu kot Prandtlu, pred dobrimi 50 leti. Omenjeno poglavje bomo na hitro oplazili saj je bil na to temo v preteklosti narejen celoten seminar<sup>6</sup>.

### Teorija mejnih plasti

Bistvo je, da razdelimo tokovno polje na dva dela in sicer na polje mejne plasti (v tem delu se tekočina nalepi na krilo zaradi viskoznosti – recimo nekaj milimetrov okoli krila) in ostali prostor neviskozne tekočine.

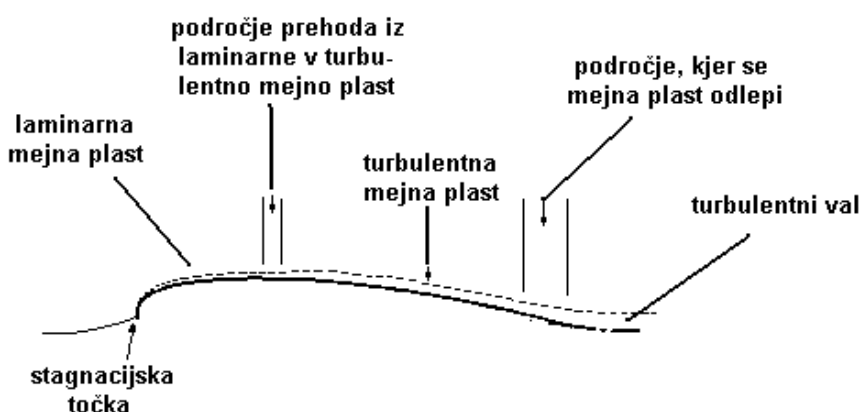


Na ta način je uspelo Prandtlu bistveno poenostaviti Navier – Stokesovo enačbo (iz eliptične oblike je prešla v parabolično) in aerodinamika je prvič znala analitično izračunati upor krila. V praksi to izgleda tako, da skozi oko klasične aerodinamike vidimo debelejša krila (krilo + mejna plast) in zanj poračunamo koeficient vzgona, iz same mejne plasti pa ugotovimo koliko zraka se je nalepilo na krilo in od tod dobimo upor. Toliko o tem, več pa se nahaja v zgoraj omenjenem seminarju.

Če povzamemo, sedaj bi že znali analitično izračunati tako vzgon kot upor jadra, stvari pa se hitro zakomplicirajo, ko nastopi turbulenca - slednjo moramo zaobjeti za vsako ceno saj se mnogokrat pojavlja in ni nujno da je vedno negativnega pomena.

#### **Realni opis – (pomoč baze podatkov iz vetrovnikov):**

Mejna plast se proti koncu jadra neusmiljeno povečuje, zrak se nalepi na jadro, izgublja energijo, postaja nestabilen in na koncu postane turbulenten. V tem delu se mejna plast še ni odlepila od jadra, postala je samo turbulentna. Tu se analitična teorija dinamike tekočin ustavi in opremo se na numerične izračune<sup>7</sup> ter empirične podatke iz vetrovnikov. Na spodnji skici je prikazano potovanje zraka, ki na svoji poti sreča vse tri možne faze (laminarna mejna plast, turbulentna mejna plast, turbulentni val).

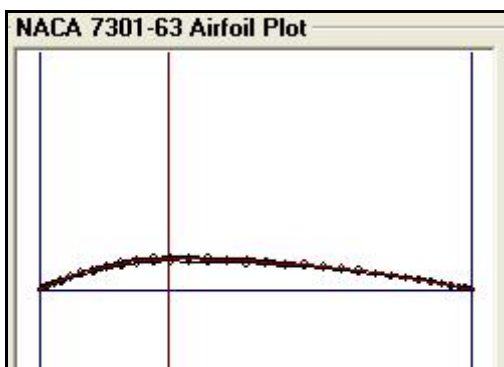


Na koncu jadra se lahko mejna plast odlepi, nastane prazen prostor, s tem se drastično poveča upor (t.i. parazitski upor), ki je zadnje kar si želimo (točko, kjer se mejna plast odlepi, je silno težko napovedati – to znajo v grobem numerični modeli, bolj otipljivi pa so podatki z vetrovnikov).

**Primer:** pa si sedaj s pomočjo zgornjih analitičnih modelov (katerim v primeru računanja upora mejne plasti pomaga numerični model) ter s pomočjo arhivske baze podatkov iz vetrovnikov oglejmo naše jadro iz prejšnjega primera.

Tule bomo še omenili načelo aerodinamske podobnosti, ki je bistveno za interpretacijo podatkov. Če zapišemo Navier-Stokesovo enačbo v brezdimenzijski obliki<sup>8</sup> vidimo, da so rešitve odvisne izključno od  $Re$  števila. Iz tega sledi, da imamo enake tokove v tekočinah z istim  $Re$  in pri različnih hitrostih, dimenzijah, gostotah ter viskoznostih. Zaradi tega načela je tudi  $Re$  število tako fundamentalno pri opisu tekočine – v vetrovnikih se da modelček majše velikosti, pri tem se zmanjša  $Re$  in poskrbeti moramo pri drugih količinah, da se poveča (recimo ohladimo zrak, da se spremeni viskoznost, ali pa povečamo pritisk...itd).

Pa si pogledjmo sedaj naše krilo.



Skorajda vsako krivuljo lahko tako ali drugače prilagodimo na arhivsko zbirko inštituta za aeronavtiko – NACA<sup>9</sup>, za naše jadro izberemo kako iz 4. serije (naprimer NACA7301) in pogledamo, kake rezultate dobimo tokrat (ker so rešitve odvisne od Reynoldsa, vzemimo velikost recimo  $8 \cdot 10^5$ ). Za vzgonski količnik dobimo vrednost :

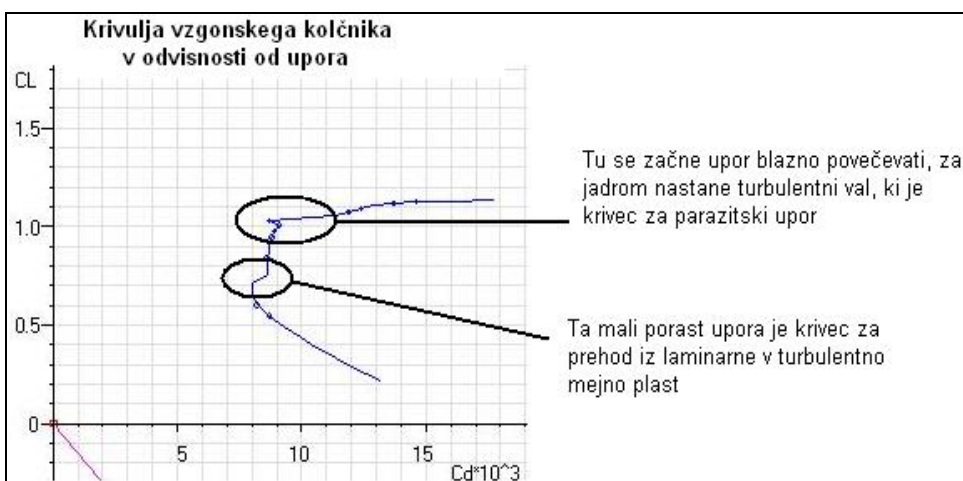
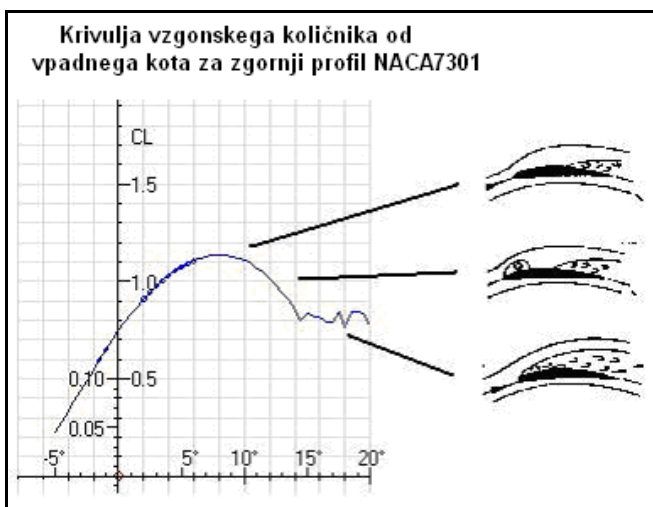
$$C_{l(\alpha=10^\circ)} = 1.1$$

Tokrat lahko tudi prvič izračunamo koeficient upora:

$$C_{d(\alpha=10^\circ)} = 0.024$$

Na levem grafu lahko opazimo, da se pri omenjenem Re in naletnem kotu  $10^\circ$  že začne odlepljati mejna plast, pri kotih nad  $15^\circ$  pa dobimo na celotnem zunanem robu turbulentni val oz. turbulenco.

V poglavju hidrodinamika si bomo še bolj detajlno ogledali ta način določevanja aero - hidrodinamskih lastnosti.



Kot vidimo je bistvenega pomena, da za vsako ceno preprečimo nastanek turbulentnega vala. V tem primeru se upor fantomsko poveča (pač ni zvezen pojav) in zaradi tega se plovilo ustavi. Večja škoda je pri letalstvu, kjer ta nezvezen prehod povzroči recimo nekajkratno povečanje upora. Tu letalo še ne pade dol, ker je vzgona dovolj, vendar motorji nimajo moči ga premagovati upora. V praksi to izgleda tako, da ko se zlomi vzgon (krila se tresejo, a letalo še vedno leti), nato hitrost v nekaj sek. močno pade zaradi povečanja upora in šele sedaj ko hitrost pade, smo izgubili vzgon. Hočem reči, da letala ne padajo zaradi porušitve vzgona, ampak zaradi povečanja upora. Lahko imamo primere letenja brez dinamičnega vzgona, ki imajo tako močne motorje da letijo samo na uporu – taka letala so ponavadi akrobatska ali vojaška in šele tedaj omogočajo izvedbo eksotičnih figur.

Pa se vrnimo na jadra, jadralci so evolucijsko prišli do tega spoznanja, za indikator mejne plasti pa uporabljajo kar enostavne trakce.

Trakci na jadru služijo za detekcijo  
mejne plasti - ali je laminarna,  
turbulentna - ali je turbulentni val

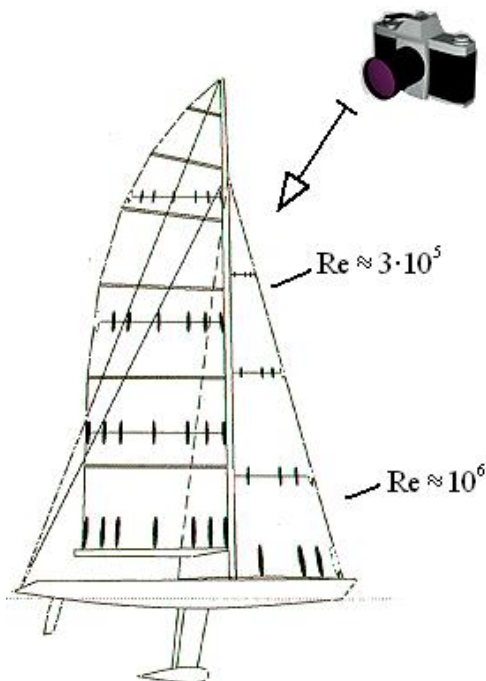


Tranci so prav tako v pomoč pri testiranjih  
v zračnem kanalu

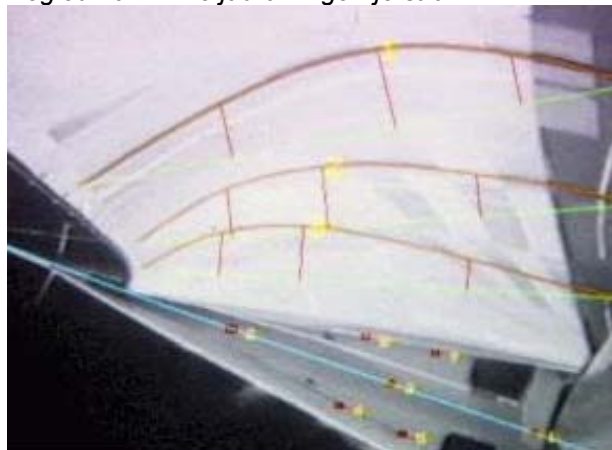


### Optimizacija profila po višini jadra:

Optimalna krivina jadra je tako odvisna od  $Re$  števila in je (za razliko od kril), zaradi svoje trikotne oblike različna po višini jadra. Na spodnjem robu je, zaradi večje dolžine prepotovanega zraka ob jadru  $Re$  število večje kot pri vrhu jambora, zato tudi ni rečeno, da ima jadro isto krivino po celotni višini. Res je, da se v praksi ta najbolj podreja jakosti vetra, vendar si pogledjmo primer, ko želimo optimizirati vzgon po celotnem jadru.

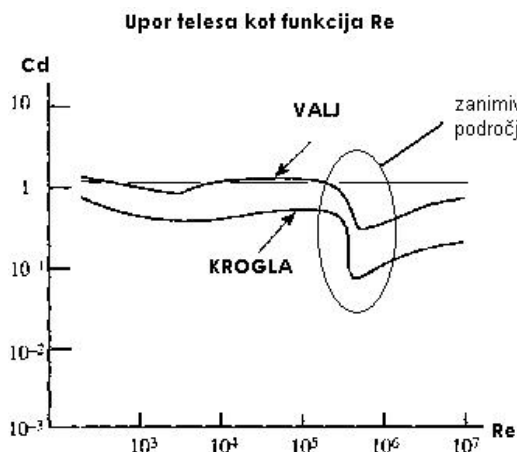


*Pogled na krivino jadra z zgornje strani:*



Presenetljivo se nam lahko zgodi, da je optimalna krivina na spodnjem robu popolnoma različna od tiste zgoraj.

Krivec za tako velike razlike se skriva v nelinearnosti osnovnih aerodinamskih količin in slednje lahko povzročijo, da pri majhni spremembi začetnih pogojev dobimo popolnoma različne rešitve optimalnih krivulj. Kot ponazoritev si oglejmo graf koeficienta upora za kroglo in valj v odvisnosti od  $Re$ .



Elegantno je, če uspemo priti v območje, kjer upor telesa drastično pade. Vzrok za to se skriva ravno v tistem pojavu, ki ga v zgornjem poglavju nismo znali več analitično opisati – to je, ko se laminarna mejna plast pretvori v turbulentno mejno plast (a ne še v turbulentni val). Takrat je mejna plast najbolj stabilna in se najkasneje odlepi od telesa.

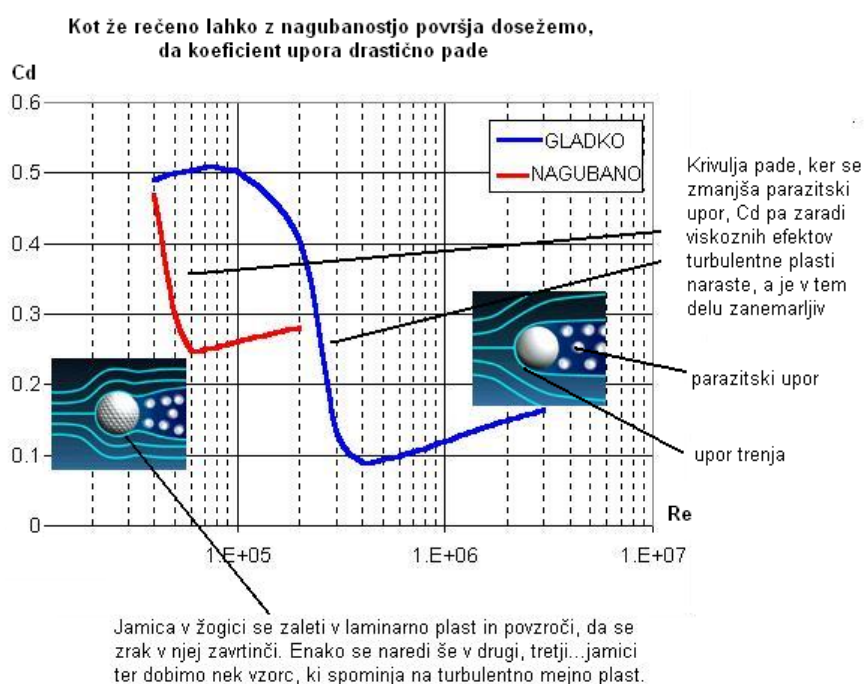
### Nenaden padec upora:

Bistvo je, da imamo za vsako ceno mejno plast ob telesu – pa naj bo kakršnakoli – samo, da se ne odlepi, ker potem bomo imeli še dodatek najhujšega upora, t.j. parazitski upor. Zaradi tega se večkrat uporabljajo stimulatorji (ali turbulatorji)<sup>10</sup>, ki predhodno spremenijo laminarno plast v turbulentno, samo da se mejna plast ne bo odlepila, pa četudi imamo na ta račun sedaj turbulentno, ki ima malo večji upor trenja. Ta pojav (za katerega ni posebnega imena) je bil prvič opažen pri golf žogicah, saj so rabljene (in s tem bolj nagubane) letele dlje kot nove in še sedaj dolgujemo mnogo ugotovitev prav raziskavam s področja golf žogic.

### Evolucija golf žogic:



Hec je, ker to področje še ni raziskano, zaenkrat velja, da ima golf žogica pri šesterokotnem vzorcu najmanjši upor (zakaj ravno šesterokotni in ne recimo 3 kotni se ne ve) in zanimivo je tudi to, da se da z različnim vzorcem luknjic rahlo premikati območje padca upora.



Zanimivo je, da so nekateri krmarji izkustveno ugotovili, da je v določenih pogojih bolje, če je podvodni del plovila rahlo naguban, kar nehote spominja na paradox golf žogic ali pa na kožo morskega psa.

Da se vrnemo sedaj k jadrom; kot smo videli, se nam lahko zgodi, da se nahajamo v območju, kjer se bistveni koeficienti močno spremenijo ob minimalni spremembi  $Re$  in tako lahko dobimo popolnoma različne profile jadra po njegovi višini.

Na tem mestu je potrebno poudariti, da je tovrstno filigransko popravljanje krivine za vsak ščepec  $Re$  zgolj v teoriji, v praksi se nam  $Re$  pogosto sproti spreminja (veter nikdar ne piha konstantno, pa tudi če bi, ga ponavadi zaradi manevrov ali pa guncanja plovila jadro ne čuti) in zato se krivina jadra po višini bolj koregira glede na to, kje naj prijemlje težišče vzgona (odvisno od nagiba plovila in jakosti vetra) ter da se zmanjša upor v zgornjem delu jader.

To bi bilo na kratko vse o aerodinamiki, morda bi znali na grobo izračunati osnovne aerodinamske količine jadra, bistveno pa je, da imamo pogosto opravka z nelinearnimi količinami (zlom vzgona, pojav 'golf žogice') katere pogosto odločajo o zmagovalnem profilu, še bolj pa pridejo do izraza pri podvodnem delu kot bomo videli v naslednjem poglavju.

## **HIDRODINAMIKA:**

Lahko bi celo trdili, da je podvodni del (omočena površina) srce zmogljivosti plovila. Naj omenim, da se v samo klasifikacijo hidrodinamskih uporov ne bomo spuščali saj so bili predstavljeni v seminarju Tilna Kunstrla - Fizika jadriranja. Pa ne samo zato, ker so bili že omenjeni, ampak če se zgledujemo in optimiziramo plovilo po klasični klasifikaciji upora, potem ne pridemo daleč. Sledi kratka razlaga.

Ponavadi se hidrodinamski upor plovila loči na primarni in sekundarni del. Primarni je tisti, ki ga povzroča plovilo samemu sebi, sekundarnega pa okolica (recimo valovi). Primarni se potem deli na:

- upor, ki ga povzroča omočena površina - pač zaradi viskoznosti vode, ki se lepi nanj;
- upor zaradi nastanka lastnega vala - pojav pojasnjuje teorija potencialnih polj, voda se zaleti v plovilo, se ustavi in po Bernoulliju se poveča tlak – nastane val. (podobno kot pri Kelvin-Helmholzovi nestabilnosti);
- induciran upor – ta pa je tisti vrtnec, ki nastane pod kobilico.

Za prvega lahko rečemo, krogla ima najmanjšo površino glede na volumen, pa malce jo raztegnimo, da nastane cigara in že imamo optimalen trup (taki trupi so tudi v resnici optimalni, bodisi da je do njih pripeljala evolucija jadrnic ali pa zadnji tehnološki krik tehnike). Upor vala je že bolj delikaten, njegovo ozadnje ni docela pojasnjeno in se rešuje s testiranjem v vodnih kanalih. V 2. sv. voj. so tako izkustveno odkrili, da pri nekaterih hitrostih (nad 15 vozlov) pomaga bulb (torpedo) pred premcem, ki ustvari negativen val in eliminira osnovnega. Vendar so jadrnice zanj prepočasne, premajhne in preveč se gugajo. Induciran upor pa se v glavnem rešuje z ustreznim zaključkom oz. dimenzijami kobilice (t.i. aspect ratio).

Nato se pa dogodi, da upoštevamo vse zgornje količine, plovilo pa še vedno ni optimizirano. Vzrok se skriva v profilu kobilice in krmila. Lahko bi celo trdili, da je kobilica še bolj pomembna kot jadra, je namreč

edini element, ki nas vozi v pravo smer in na katerega nimamo vpliva. Jadra lahko variramo, kobilice praviloma ne. Pa si detajlneje oglejmo kako bi jo optimizirali.

### Kobilica kot krilo jadralnega letala

Težko je namreč kar iz nič začeti, tako da si za začetek sposodimo načelo hidrodinamske podobnosti. Recimo, da naj naša kobilica čuti sledeč  $Re$ :

$$Re = \frac{\rho v L}{\mu} = 1.5 \cdot 10^6 \quad ; v = 3 \text{ m/s}, L = 0.5 \text{ m}, \rho = 1000 \text{ kg/m}^3, \mu = 0.001 \text{ Pa} \cdot \text{s}$$

Skozi oko Navier – Stokesove enačbe se vse tekočine obnašajo podobno, ne glede na to kako gost medij je, oz. kako velika je ovira, rešitev je odvisna izključno od  $Re$ .

$$\frac{\partial v'}{\partial t'} + (v' \cdot \nabla') v' = -\nabla' p' + \frac{1}{Re} \nabla'^2 v'$$

Če pogledamo kakšne vrednosti bi sedaj dobili v zraku pri zgoraj omenjenem  $Re$ , dobimo za hitrost:

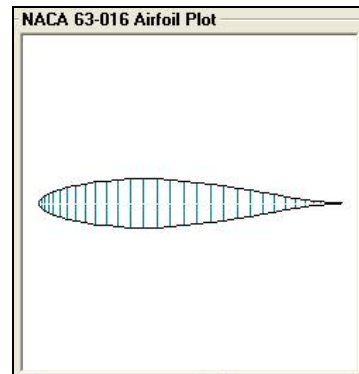
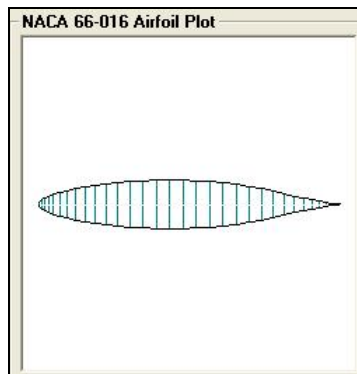
$$v = 27 \text{ m/s oz. } \approx 100 \text{ km/h} \quad ; Re = 1.5 \cdot 10^6, L = 0.7 \text{ m}, \rho = 1.2 \text{ kg/m}^3, \mu = 1.5 \cdot 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}$$

Torej, kobilica ki pluje 6 vozlov (3m/s) in je široka 0.5m, se bo obnašala enako kot krilo pri hitrosti 100km/h in širini 0.7m. Še dobro, da ujamemo letalstvo, namreč pridemo ravno na področje jadralnih letal, zanje pa že obstaja zajetna podatkovna baza profilov in si s tem privarčujemo dobršen del dela. Naj povemo, da idealen profil ne obstaja, obstaja približno idealen za točno določeno hitrost letenja, sicer pa ne. Zato je tu še vedno odprt prostor optimizacij in nobena rešitev ni v naprej vsevesoljna.

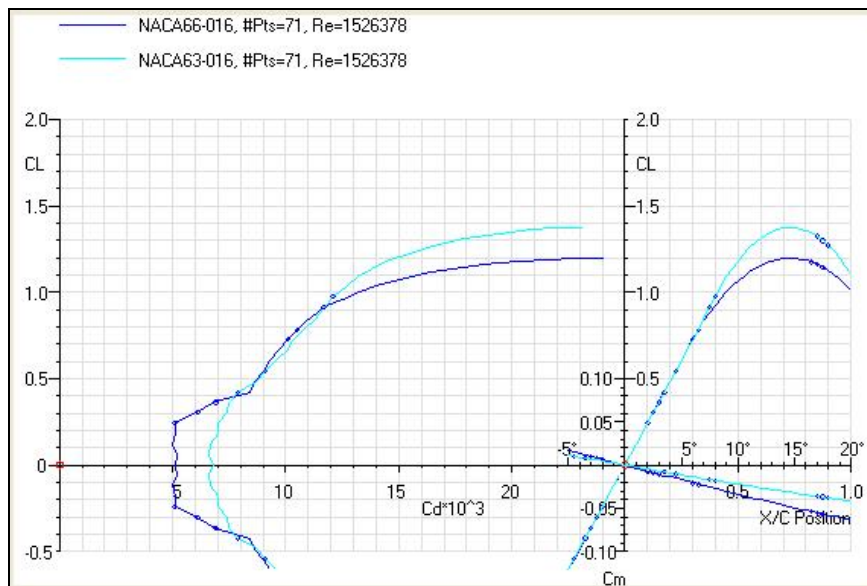
Sedaj pa zopet pogledamo v bazo in izberemo bodisi NACA, Wortmanov, Epplerjev...itd. profil, ker je kobilica fiksna, mora biti simetrična in najbolje je da si sposodimo krilo kakega akrobatskega jadralnega letala (ta mora lepo leteti tudi na glavi, tako da si lahko privošči le simetričen profil krila). Zaradi zgoraj navedenih razlogov tako ni naključje, da so si krila jad. letal in moderne komponente podvodnih delov tako podobne v vseh pogledih – profil, geometrijske lastnosti in zaključki.



Da ne bomo komplicirali z zbirkami profilov, si kar izberimo med dvema osnovnima simetričnima letalskima profiloma in pogledmo kako se obnašata (bomo na naslednji strani povedali, zakaj nismo izbrali ravno najtanjša).



Dolžina profila ( $L = 0.5\text{m}$ ) in hitrost tekočine (6 vozlov) naj bosta taki kot v zgornjem primeru, tako da si lahko pogledamo njune hidrodinamske lastnosti na konkretnem primeru.



**Hidrodinamske lastnosti profilov NACA66-016 (modrta linija) in NACA63-016 (zelena linija)**

Zgornje lastnosti veljajo samo pri zgoraj omenjeni hitrosti, namreč pri 3 vozlih je lahko situacija že drugačna. Tu se pojavi že prva razlika, jadralna letala nikdar ne letijo pri pol manjših hitrostih kot so dimenzionirana, jadronicam pa je potrebno pluti. Če pogledamo zgornjo sliko, pri majhnih naletnih kotih (do 4°) ima profil 66-016 za skoraj 30% manjši upor kot 63-016, v območju med 4° - 8° sta si ekvivalentna, še največja sprememba pa se dogodi pri večjih naletnih kotih (nad 10°), tako da se slika obrne in ima 66-016 kar za 40% večji upor kot 63-016.

Preden izberemo pravega, na hitro pogledmo odkod taka razlika. Prvi profil je bolj 'špičast', trebuh ima premaknjen proti sredini in lahko dlje vzdolž profila ohranja laminarno mejno plast, šele ko se začne ožati, mora voda iz okolice zapolniti prostor za njim in če ga zapolnjuje na tak način, da se prva plast vode zaradi viskoznosti ustavi na profilu, nato jo druga plast nad njo prehiti in zavije za njo, nato zopet tretja plast prehiti drugo in zavije za njo...itd, torej če se na tak način zavija tekočina nad profilom (po principu Coanda efekta), se zgodi prva manjša motnja in mejna plast preide v turbulentno, zato se na tem delu

malce poveča upor. Ker ima drug profil center debeline bolj spredaj, zato prej preide v turbulentno mejno plast in ima posledično večji upor. Taka je stvar pri majhnih kotih, pri večjih je stvar ravno drugačna. Prvi je na nosu bolj špičast, tekočina ki že pride pod kotom se mora hipoma nanj nalepiti in zaviti, zato je v tem primeru večja verjetnost za zrušenje vzgona (oz. nastanek turbulentnega vala). In ravno to se prvemu zgodi pri večjih kotih, tako da popolnoma pogori, ker ima pa drugi lepo zaobljen nos, mu tekočina še lahko sledi (seveda s turbulentno mejno plastjo).

*Bojim se, da je bil zgornji odstavek rahlo konfuzen. Ni potrebno razumeti kaj vse so te mejne plasti, z matematičnim opisom postanejo kvečjemu še bolj nepredstavljive. Lažje za razumeti je, da fizično opazimo bodisi laminaren bodisi turbulentni tok. Fizikom je uspelo laminarnega dodobra opisati s samo dvema komponentama, ki se imenujeta lam. in turb. mejna plast (če se ne bi zadovoljili s tem opisom, bi verjetno imeli še več komponent za opis – pač dokler ne dosežemo ujemanja hipoteze z naravo). Turbulentnega še ni uspelo razvozlati, morda ga bo v prihodnje s kako novo količino (tako kot n.pr. cirkulacija, ki se je rodila pred 100 leti, mejna plast pred 50...itd. in vsaka je nekaj razjasnila) in se bo prav tako iracionalno spraševati, zakaj pa imamo recimo točno  $3 \times Y \times Z$  količine za opis turbulence. Saj si jih lahko kdo tudi 10 spomni, samo da bo zadoščeno osnovnemu Newtonskemu principu opisa narave. Tako je tudi pri zgoraj omenjenih pojmi - imamo mejno plast laminarno ali turbulentno, vse ostalo pa turbulenca ali turbulentni val.*

Da se vrnemo na naša profila, namreč še vedno ne vemo katerega izbrati. Sila je namreč pri majhnih kotih odvisna od naletnega kota in hitrosti (za določeno kobilico):

$$F = \frac{1}{2} \rho S C_x (Re, A, Fr...) v^2 \approx \pi \rho S v^2 \sin \alpha \propto v^2 \alpha \quad ; \text{opomba št. 11}$$

V praksi pa to izgleda tako, pri šibkem vetru, ko se čoln komaj da premika, nastane sila – kakršna koli že – samo na račun naletnega kota. In tu že prvič reskiramo, če izberemo profil 66-016 saj smo bližje porušitvi. Pri močnih vetrovih so sile na jadru velike, podobno mora biti na kobilici in ker je hitrost jadrnice omejena<sup>12</sup> sila zopet nastaja samo na račun kota, torej že drugič reskiramo. Vendar v nekem vmesnem področju (recimo 5-6 vozlov) pa je boljši drug profil saj večina sile nastane na račun hitrosti, kot je majhen in upor tudi. Zato je na tej točki potrebno definirati namen plovila.

Striktna regatna plovila bi tako izbrala 66-016, ker si drugega kot najboljše v določenih pogojih ne morajo privoščiti, zato je bistveno poznati pogoje v katerih bodo jadrjala in na te optimizirati profil<sup>13</sup>. Še najslabše je tako nevede skopirati kak specifičen regatni profil (češ ta že leti) in ga uporabiti na drugem/širšem vetrovnem spektru – v teh primerih bi bil boljši drug, ker si za nobeno ceno ne smemo privoščiti porušitve.

### **Rizik tankih profilov**

Stvar postane še občutljivejša, če izbiramo med tankimi profili (ozek nos) in takrat smo po zgornji analogiji še bližje zlomu, vendar ga je pa mikavno izbrati ker ima že samo zaradi svojih dimenzij manjši upor in to nas zna tudi zaslepiti. Poglejmo si naslednji primer.

S strani deluje spodnja kobilica kot jadralno krilo, z bulbom na dnu, če poznamo še podvodno linijo (kje prijemlje navor, ko je plovilo nagnjeno) bi se dalo že samo iz statičnih pogojev oceniti kak velikosten red sile pričakujemo na kobilici.

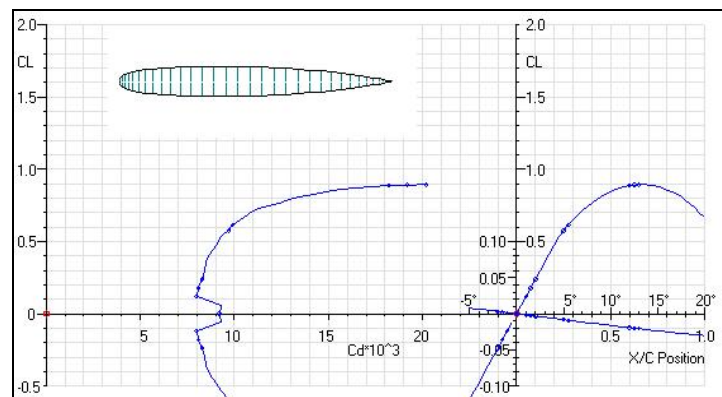


Pogled s strani...



...in od spredaj

Ko pa preverimo hidrodinamske lastnosti profila, vidimo, da so riskantne, vzgon se začne rušiti že pri  $6^\circ$ , kar pomeni da mora biti kobilica predimenzionirana, če hoče opravljati svoje delo (večina sile mora biti dobljene na ploščini, kar za seboj potegne večji upor omočene površine).



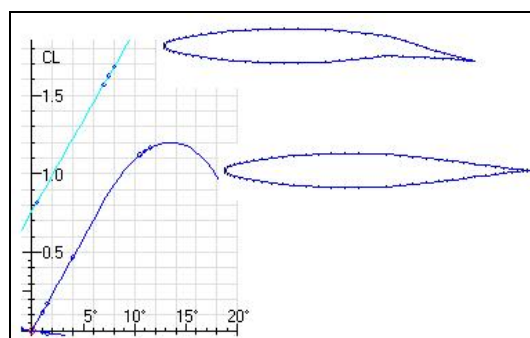
Primer tankega profila in hitre porušitve

Vsa stvar se še potencira, ker ima zgornje plovilo relativno širok trup in krmo (zaradi efektov, da lažje zglisira). To pomeni, da je občutljivo na bočni val (napačno je razmišljanje, da so širša plovila stabilnejša, najstabilnejša je boja, ki je nekaj metrov pod vodo obtežena – ta se nikdar ne prekucne, samo gor in dol gre, ne glede na višino in periodo vala, ravno nasprotno pa recimo katamaran, če ujame bočni val s polovično periodo svoje širine, takrat ima en krak na vrhu, drugega pa v dolini). In ko zgornje plovilo ujame bočni val, kobilica zaniha, takrat se naletni kot na dnu hipoma poveča in vzgon se zlomi. Tudi, ko val mine in pride kobilica na star kot, je na njej nastal vrtinec (kot stanje z najnižjo energijo), ki je ne zapusti dokler ga bo odpihnila laminarna plast (kot neke vrste histerezni učinek)<sup>14</sup>. Zaradi teh lastnosti bi lahko presodili, da zgornje plovilo ni optimizirano za jadranje v močnejše vetrove (tipičen primer je burja, ki pri nas piha kontra toku in naredi špičaste valove).

V eksotičnih primerih, kjer želimo zadovoljiti vseh zahtevam pa je nujna uporaba zakrilca, tokrat lahko uporabimo tanek profil, ki je uporaben na širokem kotnem spektru, pri tem pa je še največji problem poznati optimalne pozicije zakrilca v različnih pogojih.



Primer zakrilca na kobilici

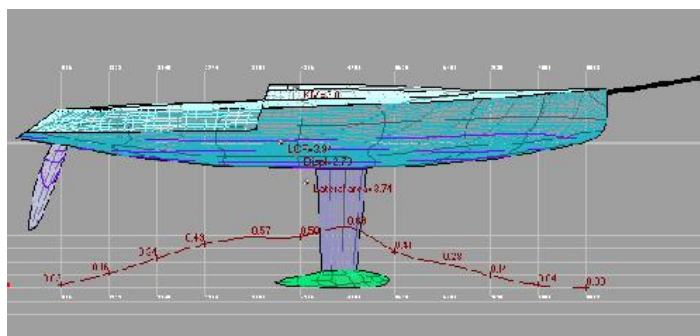


Popravek krivulja vzgona z zakrilcem

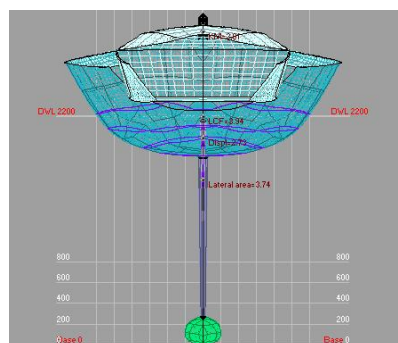
## Zaključek

Sedaj pa samo v nekaj stavkih zaključimo. Posvetili smo se samo kobilici, podobno razlago bi potrebovalo še krmilo. Krmilo namreč ne služi samo za manevriranje, ampak ima pomembno vlogo tudi pri vožnji v veter. Če bi želeli zares optimizirati te dve komponenti za recimo tržaški zaliv, bi pregledali rožo vetrov (statistika smeri in jakosti vetrov) in nanjo utežili pričakovane sile na jadro, kar posledično določa optimizacijski spekter kobilice in podvodnih komponent. Izbirali bi po zgornjih načelih, z večkratnim iterativnim ponavljanjem različnih profilov. V pogojih kjer bi ocenili rizik zloma, bi moral imeti krmar napotke (večkrat ima samo občutek) kako razbremenjevati jadrovje. Podobno je s trupom, le da se tega optimizira na zgoraj opisane upore, sekundarni val pa se kar simulira s periodično funkcijo. V teh primerih je prav tako potrebno žrtvovati pogoje z višjim (in krajšim) valom in dati krmarju napotke kako delovati v teh pogojih (odvisno od premca ali gre posadka naprej, da se delno potopi ali v premec vodne balaste...itd). Skratka plovilo je potrebno individualno optimizirati, večkrat se namreč pripeti, da si je lažje sposoditi kake uveljavljene primerke, malo spremeniti dimenzije (češ, če je večje jadro in težja kobilica je avtomatsko bolje) jih postaviti se v druge zalivske pogoje in rezultat je vse drugo kot hitra barka. Bistveno se je zavedati, kolikokrat imamo opravka z nelinearnostjo.

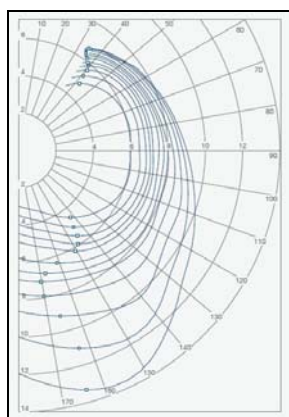
Sicer pa dandanes obstajajo že brezplačni programi za dizajn plovil, ki pa žal ne pokažejo vseh skrivnosti. Plovilo lahko oblikujemo že s parimi kliki miške, rezultati pa so podobni spodnjim slikam.



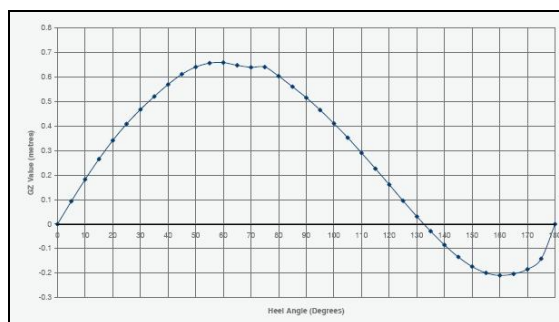
Digitalni dizajn plovila



Osnovni rezultati pa so dobljeni v jadralnem jeziku, na levi strani so t.i. hitrostne polare, ki povezujejo kot in jakost vetra s hitrostjo plovila, na desni pa stabilnostna krivulja.



Polarni diagram



Stabilnostna krivulja

Vendar to so zgolj modeli, zlom vzgona kobilic ni upoštevan, prav tako ne podvodni profil premca, ki je predstavnik največjega upora v valovitem morju (ko premec pogleda iz vode in ga od spodaj čelno udari val – še posebno če je spodnji del sploščen). Tako da ne škodi, če s kančkom kritike opazujemo dobljene rezultate.

Tu dolgujemo še odgovor na začetno vprašanje, namreč letalstvo se je razvijalo sistematsko, znanost je vedela kako narediti letalo, da bo dobro in tudi zakaj je, oz. zakaj ni dobro. Jadralstvo se je evolucijsko, če je vsako leto nastalo toliko in toliko jadrnic je evolucijsko sito prepustilo le najboljši promil. Tako so nastala plovila kot je zvezda (ki kmalu praznuje 100 letnico) in je od leta 1932 v olimpijskem razredu, J24, ki praznuje 30 letnico in je danes najmnogičnejše regatno plovilo (z obteženo kobilico)...itd, pri katerih je znanost šele kasneje ugotovila kaj je skrivnost uspeha in šele zadnje desetletje dohaja in diktira pot razvoja.

### Za konec pa še uganka:

Jadrnica pluje po široki reki iz mesta A v B, tok reke pa znaša 10 vozlov v isti smeri. Prvi dan piha veter iz A v B s hitrostjo 10 vozlov, drugi dan pa nič ne piha. Kdaj pride jadrnica prej do cilja?

### Literatura:

- Practical ship hydrodynamics, Volker Bertram,
- Mehanika kontinuov, Rudi Podgornik,
- Applied Aerodynamics: A Digital Textbook,  
<http://www.desktopaero.com/appliedaero/preface/welcome.html>
- Aerodynamisches Institut Aachen, Vorlesungsunterlagen Aerodynamik,  
<http://www.aia.rwth-aachen.de/index.php?id=134&L=0>
- Navodila programov: DELFTship, DesignFoil in X-Foil,
- Technology and the America's Cup (Cawthron Institute New Zealand) - kar je javno dostopnih tehničnih poročil bivših projektov.

## Opombe:

<sup>1</sup> Recimo, da razni minutnih poskusov pionirjev letalstva (Lilienthala, Aderja...itd) iz 1890ih ne štejemo pod pravo letalstvo.

<sup>2</sup> Verjetno stare civilizacije še niso znale optimalno pluti v veter, tj. izkoriščati dinamični vzgon, so pa to perfektno obvladali že v 18. in 19. stol. (t.i. Clipperji).

<sup>3</sup> Nazorna izpeljava s slikami se nahaja v zapiskih predavanj Aerodynamisches Institute Aachen, na naslovu: <http://www.aia.rwth-aachen.de/index.php?id=134&L=0>, pod temo Inkompressible Strömung über Profile (teil 3).

<sup>4</sup> Kot zanimivost omenimo, da je ta efekt še posebno občuten v jadralnem letalstvu, saj ko letalo pristaja je krilo tik pred pristankom oddaljeno samo za dober meter od zemlje, tako se delno zapre odprtina, ki omogoča nastanek vrtinca na koncu krila, posledica je redukcija vrtinca na manjšo velikost in povečanje vzgona. Tako se pilotu novincu dozdeva, da letalo še nekaj metrov noče pristati.

<sup>5</sup> Eulerjeva enačba:  $\rho \left( \frac{\partial v}{\partial t} + (v \cdot \nabla) v \right) = -\nabla p$ .

<sup>6</sup> Sašo Knez, Airfoil boundary layer, 2005.

<sup>7</sup> En od načinov je ta, da vzamemo numerično kodo za linearno mejno plast, pogledamo do katere dolžine ta deluje, nato pa se poslužimo kode za turbulentno mejno plast.

<sup>8</sup>  $\frac{\partial v'}{\partial t'} + (v' \cdot \nabla') v' = -\nabla' p' + \frac{1}{Re} \nabla'^2 v'$ , kjer smo brezdimenzijske količine označili s črtico.

<sup>9</sup> NACA - National Advisory Committee for Aeronautics, ustanovljen leta 1915, 1958 ga nasledi vesoljska agencija NASA.

<sup>10</sup> Turbulatorji se že več let redno uporabljajo v letalstvu in hidrodinamiki plovil, v področje jader pa (če se ne motim) še niso zašli.

<sup>11</sup> Naj bo sila enkrat za spremembo zapisana v najsplošnejši obliki, namreč količnik vzgona  $C_x$  je funkcija vseh možnih količin, Reynolds ga določa pod vodo, na gladini je pomembno t.i. Froudovo število (ki pove kako se širi lastni val...itd), A opisuje geometrijske lastnosti – aspect ratio – ta ki upliva na induciran upor...itd. Vendar enkrat ko imamo  $C_x$  imamo vse, smola je samo da je tako 'živ'.

<sup>12</sup> Hitrost deplasmanjskih plovil (tj. izpodrivnih, ta ki vodo izpodrivajo pod sabo) je določena z dolžino vodne linije. Tega nismo omenili, vendar si lahko tako predstavljamo, da na premcu nastane val, oz. neka motnja ki se širi po morju. Hitrost širjenja je odvisna od tež. pospeška in kako hitro ustvarjamo motno – torej naše hitrosti. Pri neki hitrosti nam nato pade krma v dolino vala in vozimo dobesedno v hrib. To se zgodi jadnici, ko se približa teoretični hitrosti trupa. Takrat naraste upor za priblj. 3x. Ta pojav je opisan v seminarju Kelvin ship waves (Ksenja Maver, 2004).

<sup>13</sup> Za zmagovalca najfamozejše regate Americas cup velja, da bo zmagal tisti, ki bo že v laboratoriju najbolje ocenil vetrovne pogoje na dan regate. Zato so bila letos v Valenciji plovila rahlo drugačna kot pred leti v Novi Zelandiji, ker prevladujejo šibkejši vetrovi (+valovi). Zato ni čudno, da ekipe že 2 leti pred regato sicerajo raznorazne pogoje prireditve.

<sup>14</sup> Podobno se zgodi, ko letalo pade v vrt (spirala ali kovit), takrat ne pomaga če vzpostavimo stanje pred zlomom, komande je potrebno dati v točno predpisan položaj in omogočiti krilu da ga oblije laminarna plast zraka.