

A large, gnarled tree stands on a grassy hill under a cloudy sky. The tree is the central focus, with its thick trunk and spreading branches. The background shows a vast, open landscape with rolling hills and a bright, overcast sky. The overall tone is soft and natural.

Profiilin kehitys laskemalla

2/26/2020

Tuulitaito

Profiililaskennan perusolettamukset

- Käytetään Navier Stokesin virtausyhtälöitä
- Aloitetaan kitkattomasta potentiaalivirtauksesta
- Lisätään rajakerroksen vaikutus ja käyttäen
 - Jatkuvuusyhtälöä
 - Energiayhtälöä
 - Impulssiyhtälöä
- Reunaehdot
 - Nopeus pinnassa nolla
 - Rajakerroksen ulkoreunalla on potentiaalivirtauksen nopeus

XFOIL-ohjelma

- Seuraavat esimerkit on laskettu XFOIL-ohjelmalla
- Mark Drela & Al. kehittäneet vuodesta 1986 alkaen
- Ohjelma on avoimesti saatavissa internetistä
- Laskee koordinaatteina annetun profiilin aerodynaamiset parametrit $C_L(\alpha)$, $C_D(\alpha)$, $C_M(\alpha)$
- Virtauksen nopeus- ja painejakauman
- Rajakerroksen ominaisuudet
- Ohjelman toimivuus on testattu laajoilla tuulitunnelikokeilla

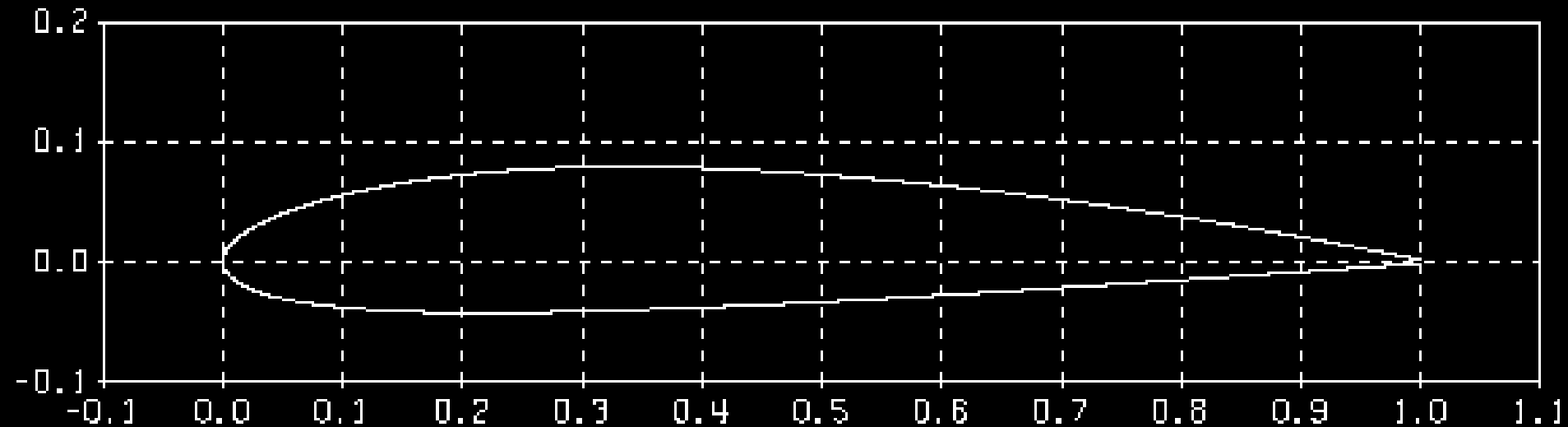
Annetun profiilin laskentamenetelmä

- Lasketaan kitkattoman virtauksen eli potentiaalivirtauksen nopeus- ja painejakauma profiilin ympärillä
- Lasketaan rajakerros edelliselle virtaukselle
- Tarkistetaan potentiaalivirtaus ottamalla huomioon rajakerroksen vaikutus
- Iterointia jatketaan, kunnes laskenta suppenee

Esimerkki profiilin laskennasta

- Annetaan profiilin koordinaatit, x,y
 - NACA 2412

```
NACA 2412
area - 0.08220
thick. - 0.12003
camber - 0.02000
 $\Gamma_{LE}$  - 0.01573
 $\Delta\theta_{TE}$  - 15.91°
```

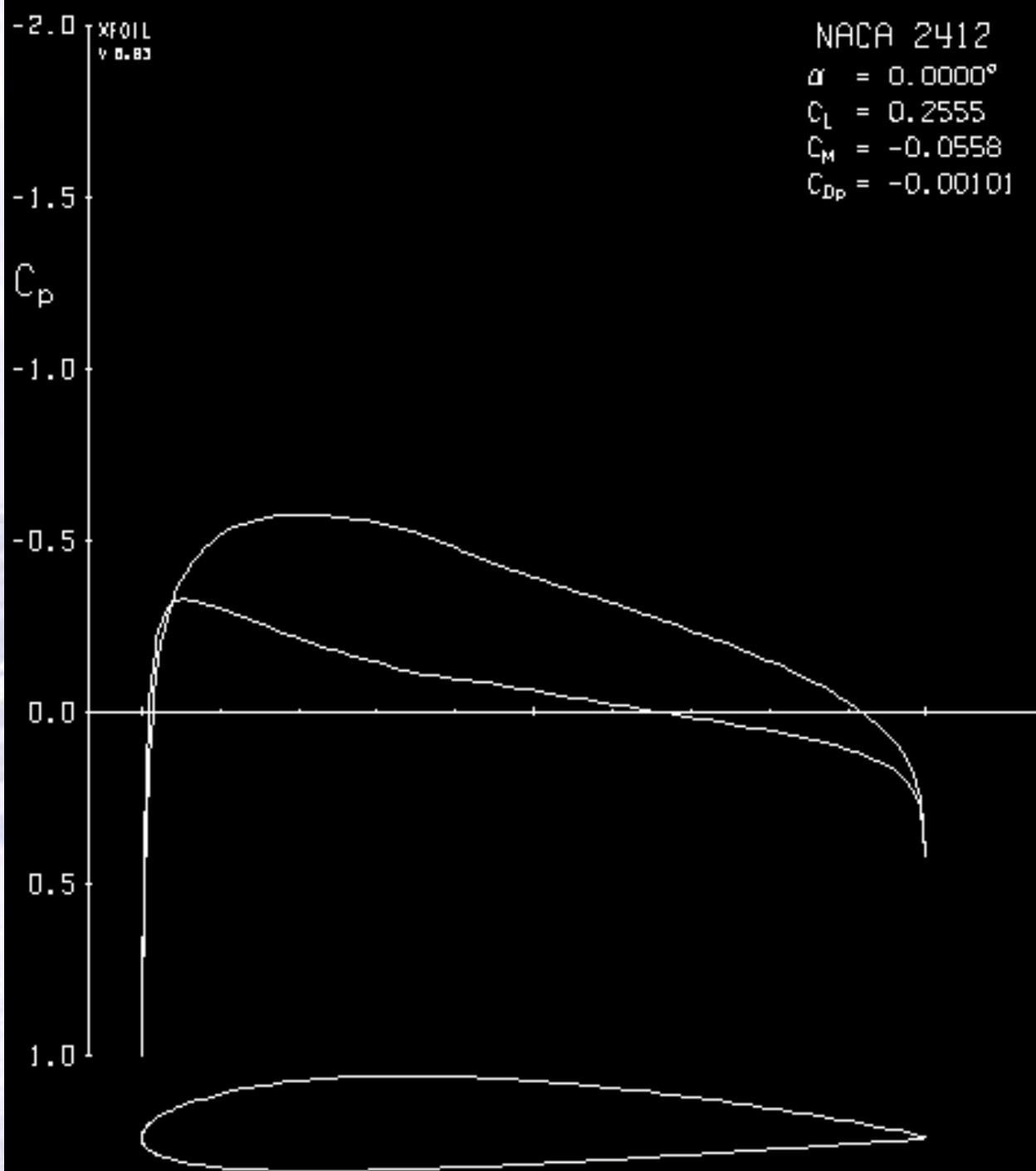


Lasketaan potentiaali- virtauksen painejakaum

a

NACA 2412

Alfa = 0°



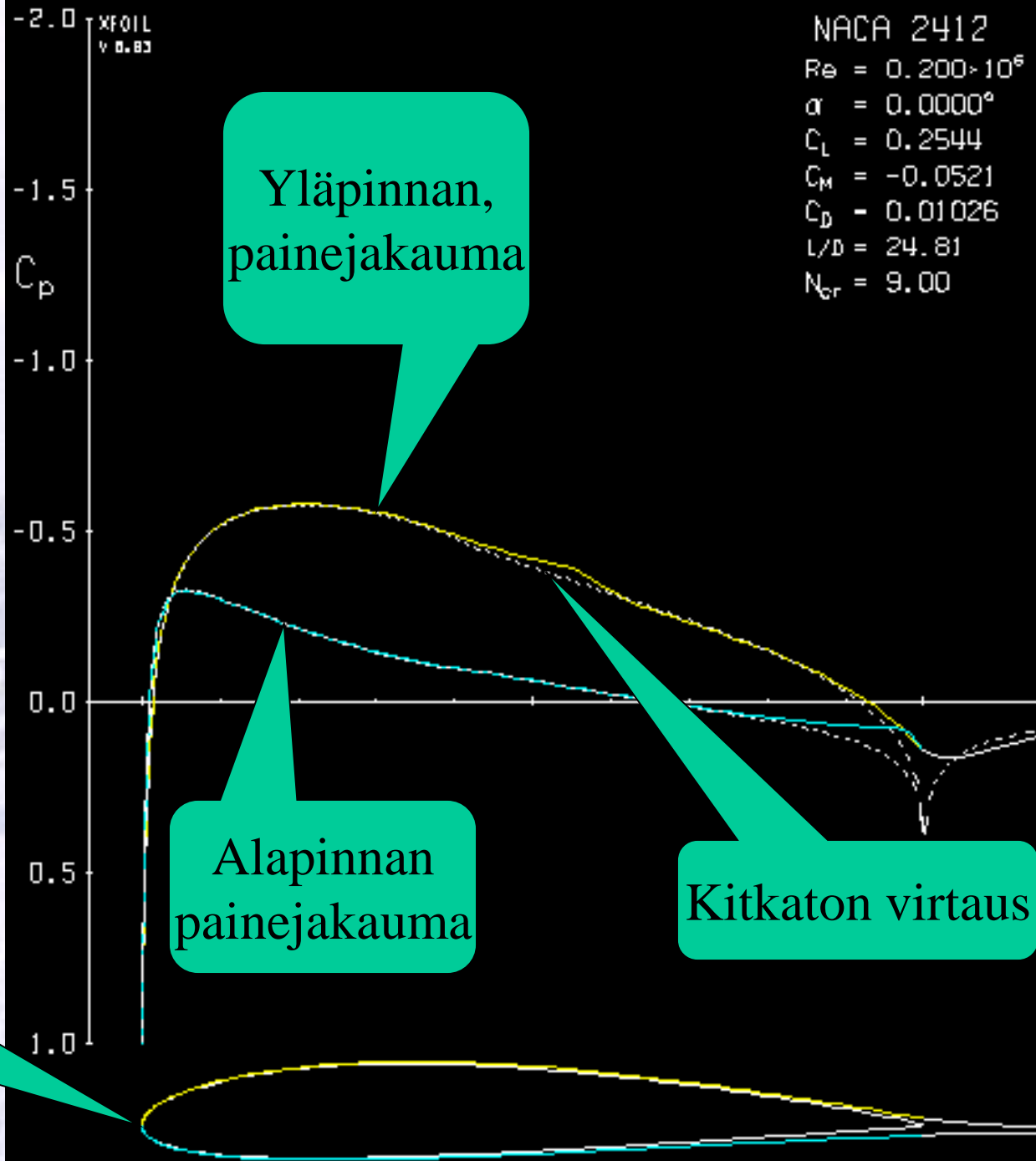
Ja kitkallisen virtauksen painejakauma

NACA2412

Alfa = 0°

Patopiste/
patopaine
Nopeus = 0

XFOIL
v 0.83



Yläpinnan,
painejakauma

Alapinnan
painejakauma

Kitkaton virtaus

NACA 2412
 $Re = 0.200 \cdot 10^6$
 $\alpha = 0.0000^\circ$
 $C_L = 0.2544$
 $C_M = -0.0521$
 $C_D = 0.01026$
 $L/D = 24.81$
 $N_{cr} = 9.00$

Osasakkaus

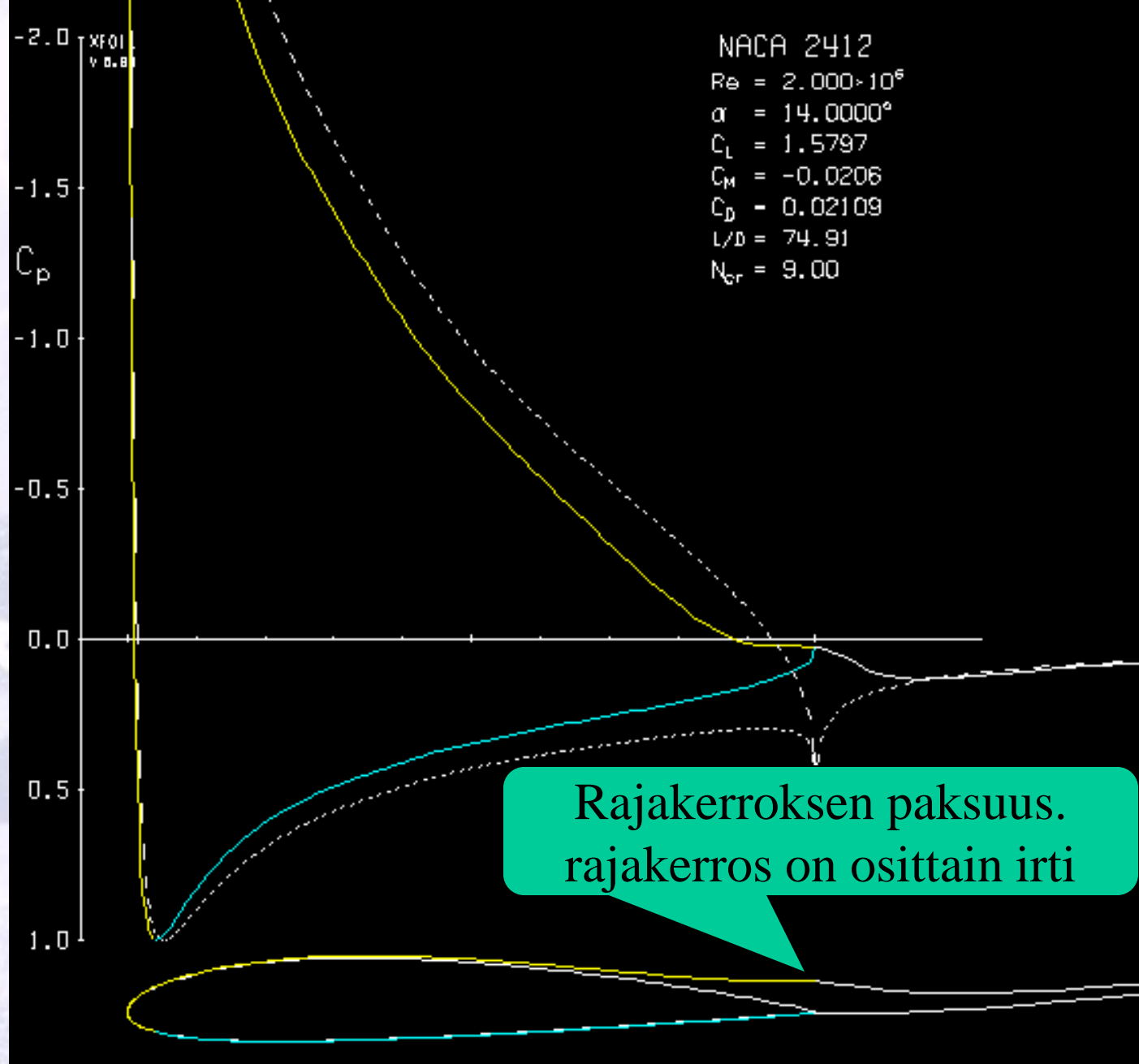
NACA2412

Alfa = 14°

Re = 2M

Rajakerroksen
muoto ja paksuus

2/26/2020



Tuulitaito

NACA2412

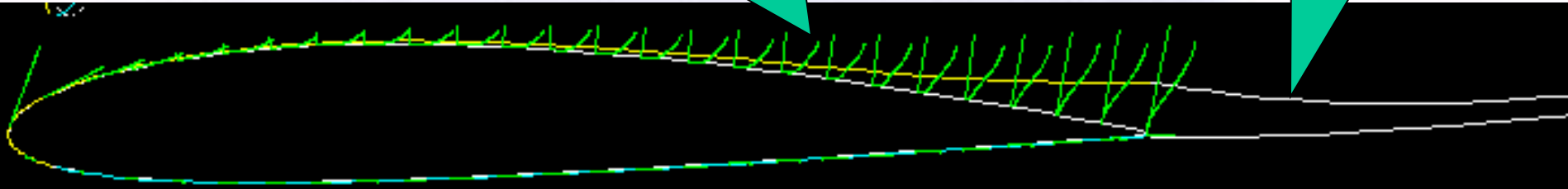
Rajakerros

Alfa 14°

Re 2M

Rajakerroksen
nopeusjakauma

Energiapaksuus

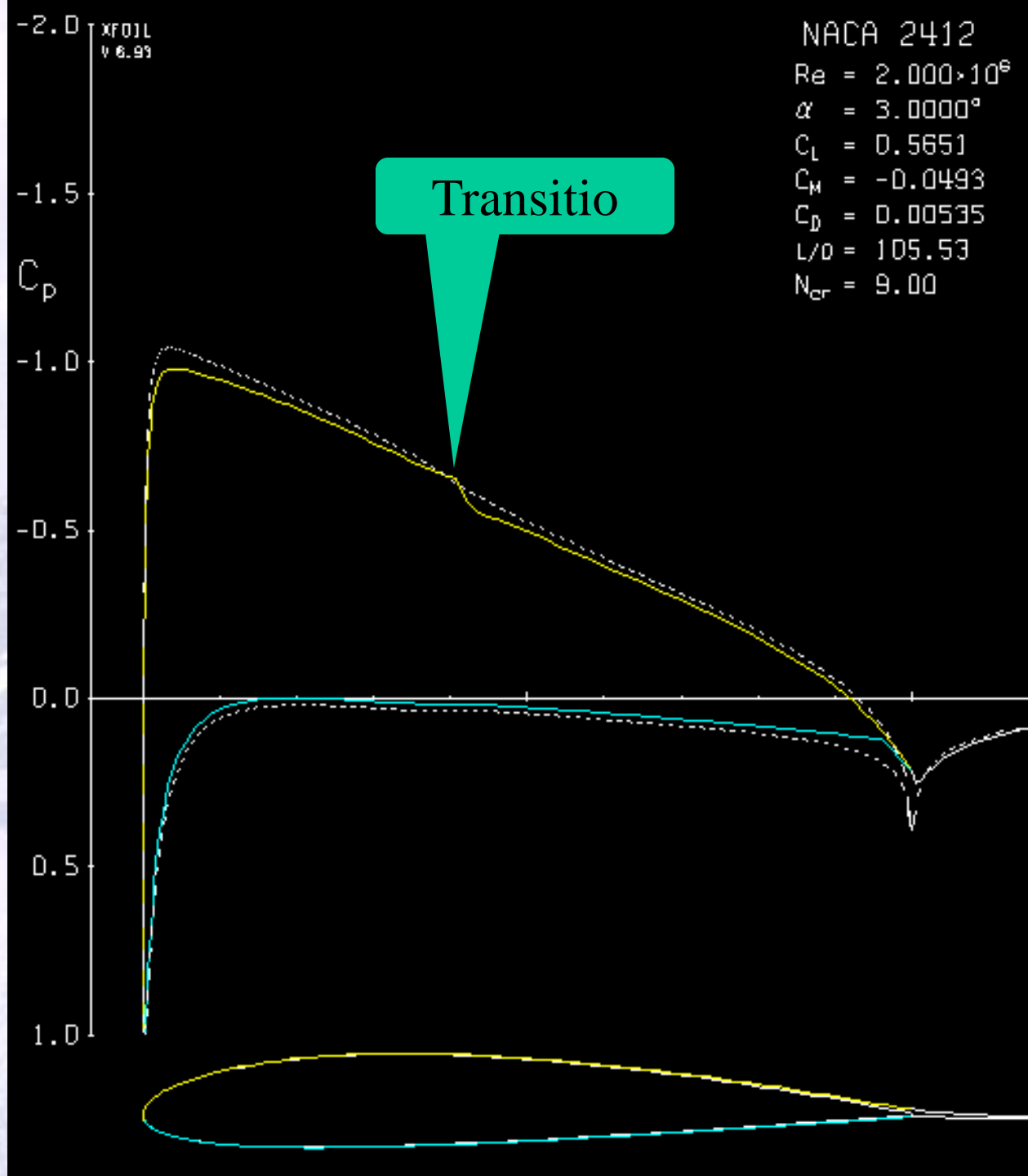


Transitiopiste

Virtaus muuttuu laminaarisesta turbulenttiseksi

NACA2412
Alfa 3, Re 2M

2/26/2020



Kitkakerroin

C_f

Kitkakerroin osoittaa pintakitkan vaikutuksen

$$C_f := \frac{\tau}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_0^2}$$

$\tau(x)$ = leikkausjännitys pinnassa
 V_0 = vapaan virtauksen nopeus

NACA2412

Alfa 3, Re 2M

2/26/2020

NACA 2412

$Ma = 0.0000$

$\alpha = 3.0000^\circ$

$C_L = 0.5651$

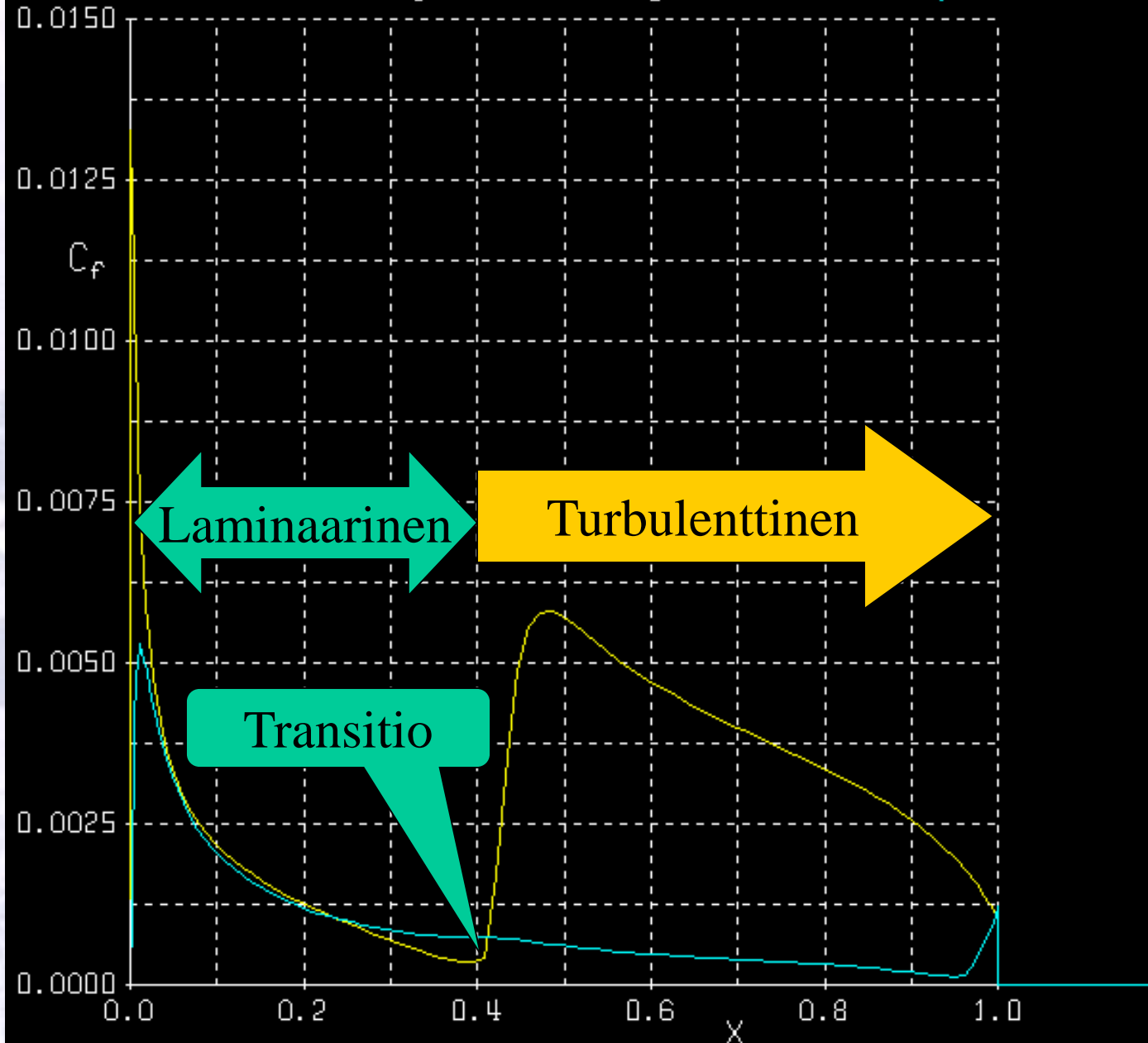
$T: x_{tr}/c = 0.4072$

$Re = 2.000 \times 10^6$

$N_{cr} = 9.00$

$C_D = 0.00535$

$B: x_{tr}/c = 0.9618$



Dissipaatio- kerroin

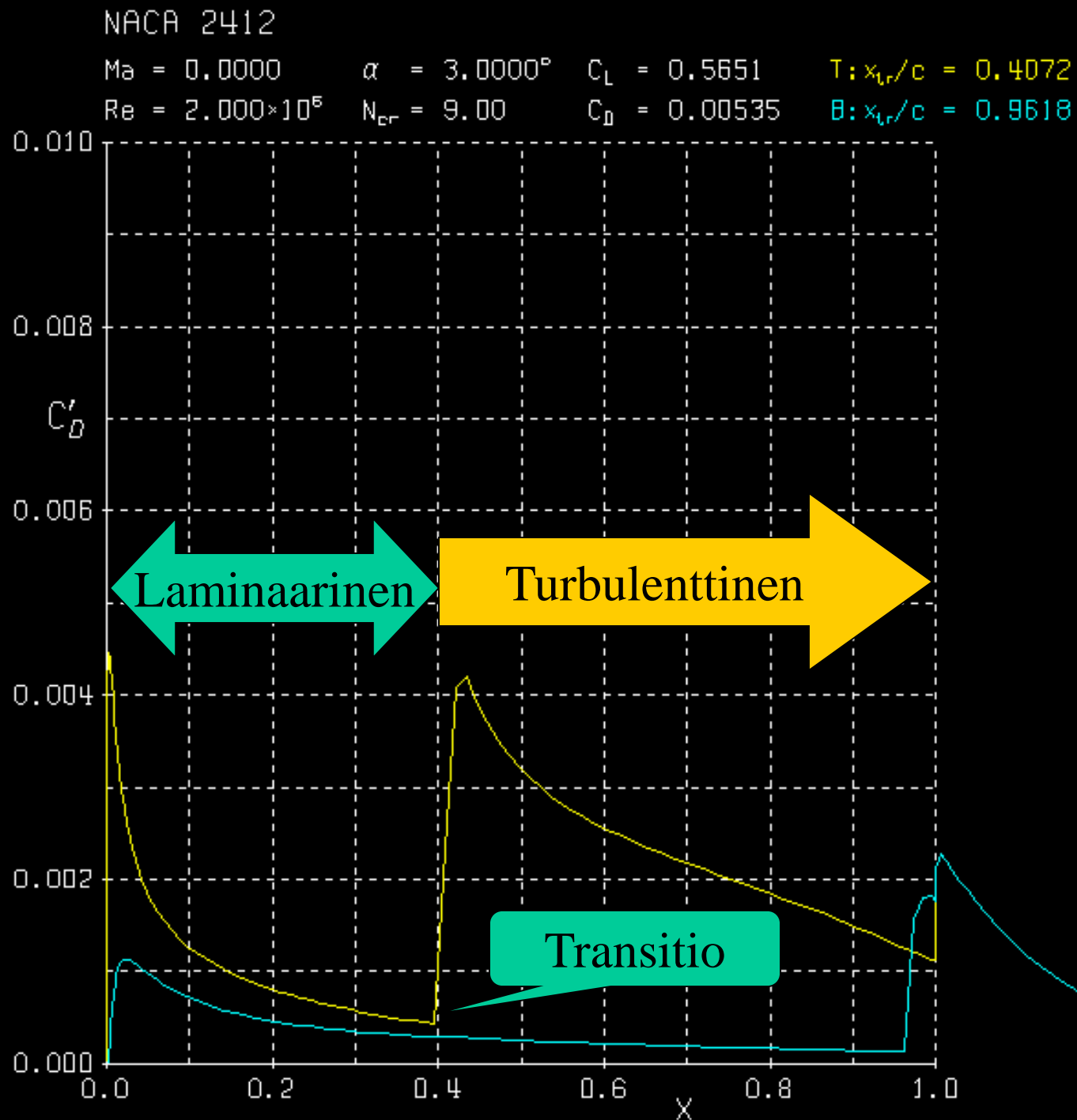
Huomioi kitkan ja
painevastuksen

Osoittaa, missä
profiilin osassa
vastus syntyy.
On työkalu opti-
moitaessa profiilia
tiettyyn käyttö-
tarkoitukseen

NACA2412

Alfa 3, Re 2M

2/26/2020



Mihin profiililaskenta soveltuu

- Eriolaisten profiilien paremmuusvertailuun
- Siiven mitoituksen vaatimien kertoimien laskentaan
- Polaarikäyrän laskentaan tilanteessa, jossa muuta tietoa ei ole käytettävissä
 - Reynolsin luku
 - Turbulenttinen ilma
- Profiilin muotovirheiden vaikutuksen arviointiin
- Pinnan karheuden vaikutuksen arviointi
- Turbulaattorin paikan optimointi ($RE < 500\ 000$)

Uuden profiilin kehitys

- Perinteiset profiilit on kehitetty pääsääntöisesti lentokoneita varten, joten niiden ominaisuudet on optimoitu tuulivoimalakäytöstä poikkeavaan käyttöön
- Tuulivoimalakäytössä haluttuja ominaisuuksia:
 - hyvä L/D eli liitosuhde
 - pehmeä sakkausikäyttäytyminen
 - sietää pinnan karheutta eli ikääntymistä
 - alhainen melutaso
 - tyviprofiili hyvin paksu lujuussyistä

Profiilin kehityksen vaiheet

- aloitetaan tunnetusta tehtävään sopivasta profiilista
- muutetaan sen nopeusjakaumaa ja lasketaan uudet suoritusarvot kunnes saadaan paras mahdollinen lopputulos
 - saattaa vaatia kymmeniä laskentakierroksia
 - CD ja CF-kertoimet osoittavat missä on korjattavaa
- Lopuksi lasketaan polaari eri Reynoldsin luvuille
 - Lasketaan uudestaan kunnes ollaan tyytyväisiä

Esimerkkisarja profiilin kehityksestä

- Tavoite tuulivoimalan profiili alueelle Re 200-500k, paksuus on 12%
 - L/D paras mahdollinen
 - keskilinjän kaarevuus voidaan valita vapaasti

Superpositiomenetelmä

Esimerkiksi haluttaessa hyvää liitosuhdetta lasketaan yhteen:

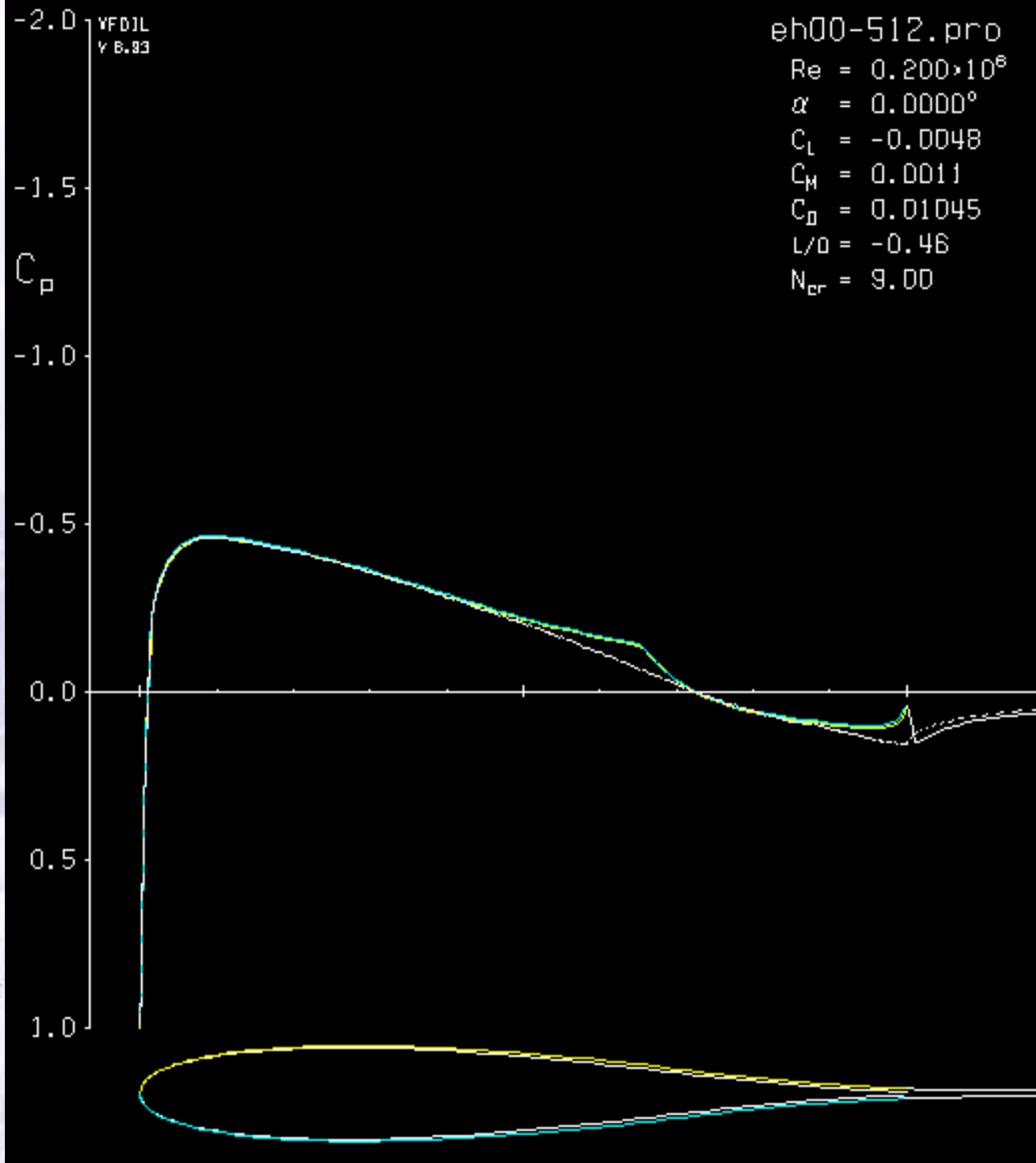
1. Symmetrisen profiilin painejakauma, jolla hyvät ominaisuudet halutulla Re -lukualueella
2. Keskilinjän painejakauma, joka antaa hyvän liitosuhteen halutulla kohtauskulmalla

Symmetrisen profiilin painejakauma

$t=12\%$

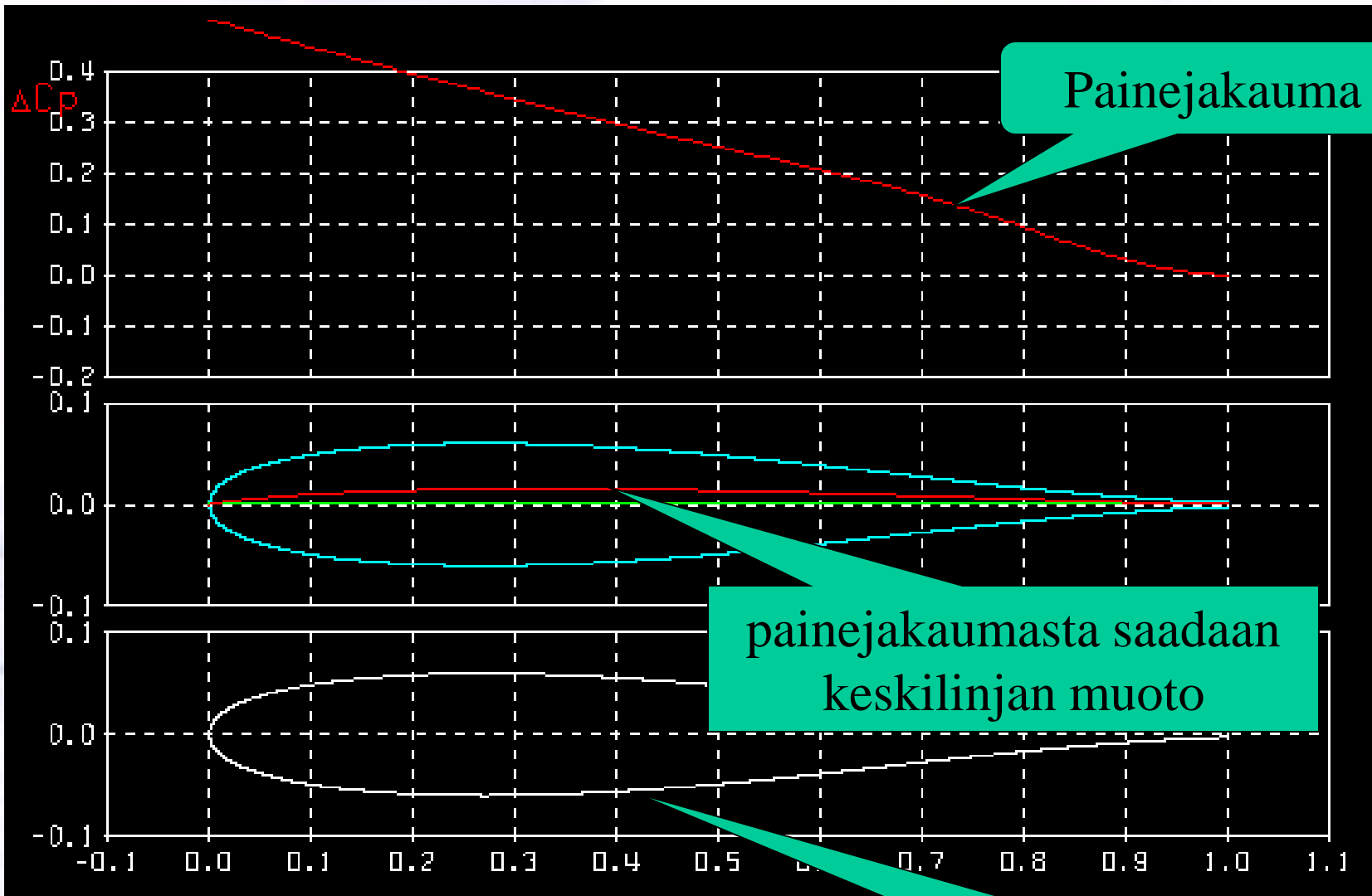
$X_{tr} = 0.65$

$C_D = 0.01045$

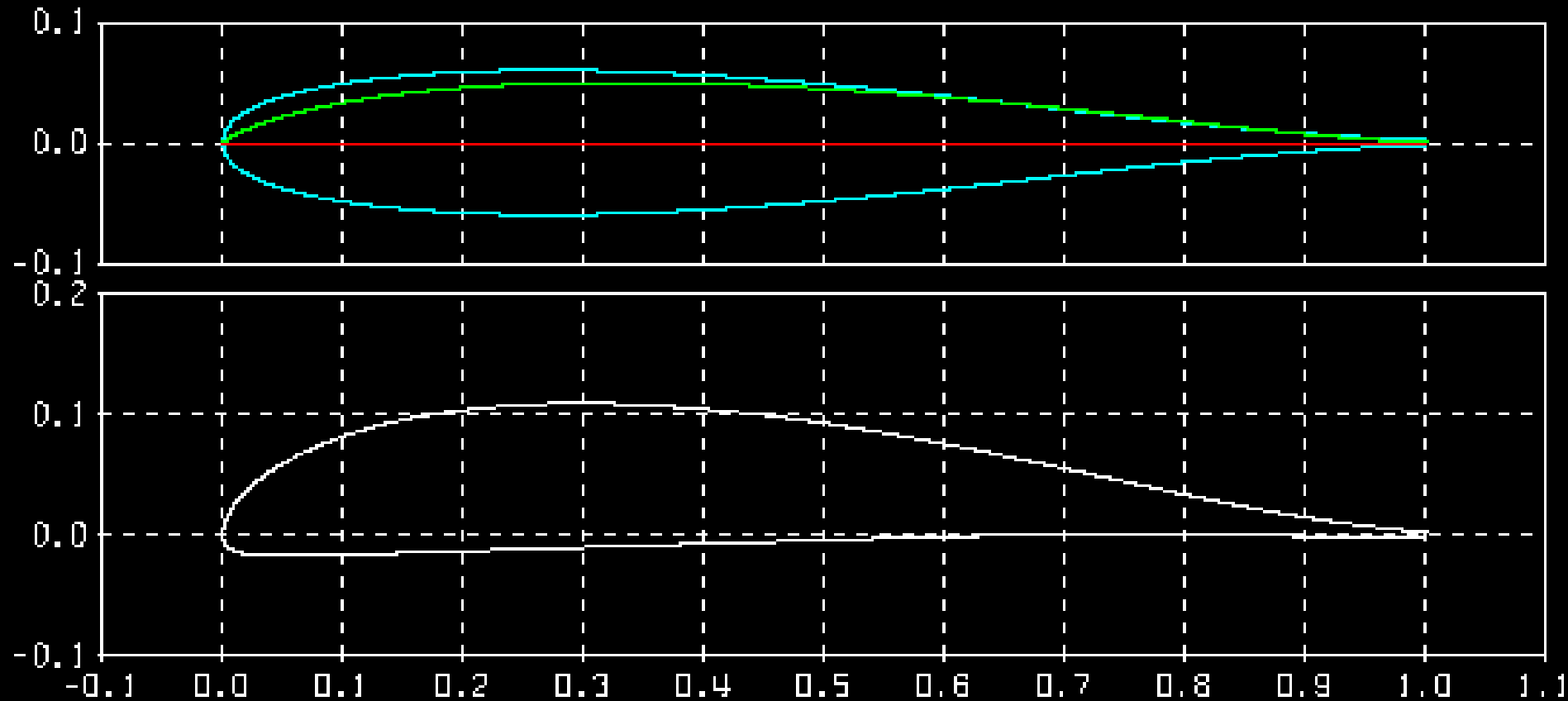


2/26/2020

ja keskilinjän lineaarinen painejakauma



Lasketaan jakaumat yhteen..



Profiilin paksuus ja keskilinjän kaarevuus voidaan valita uudelleen ennen yhteenlaskua ja vielä sen jälkeenkin

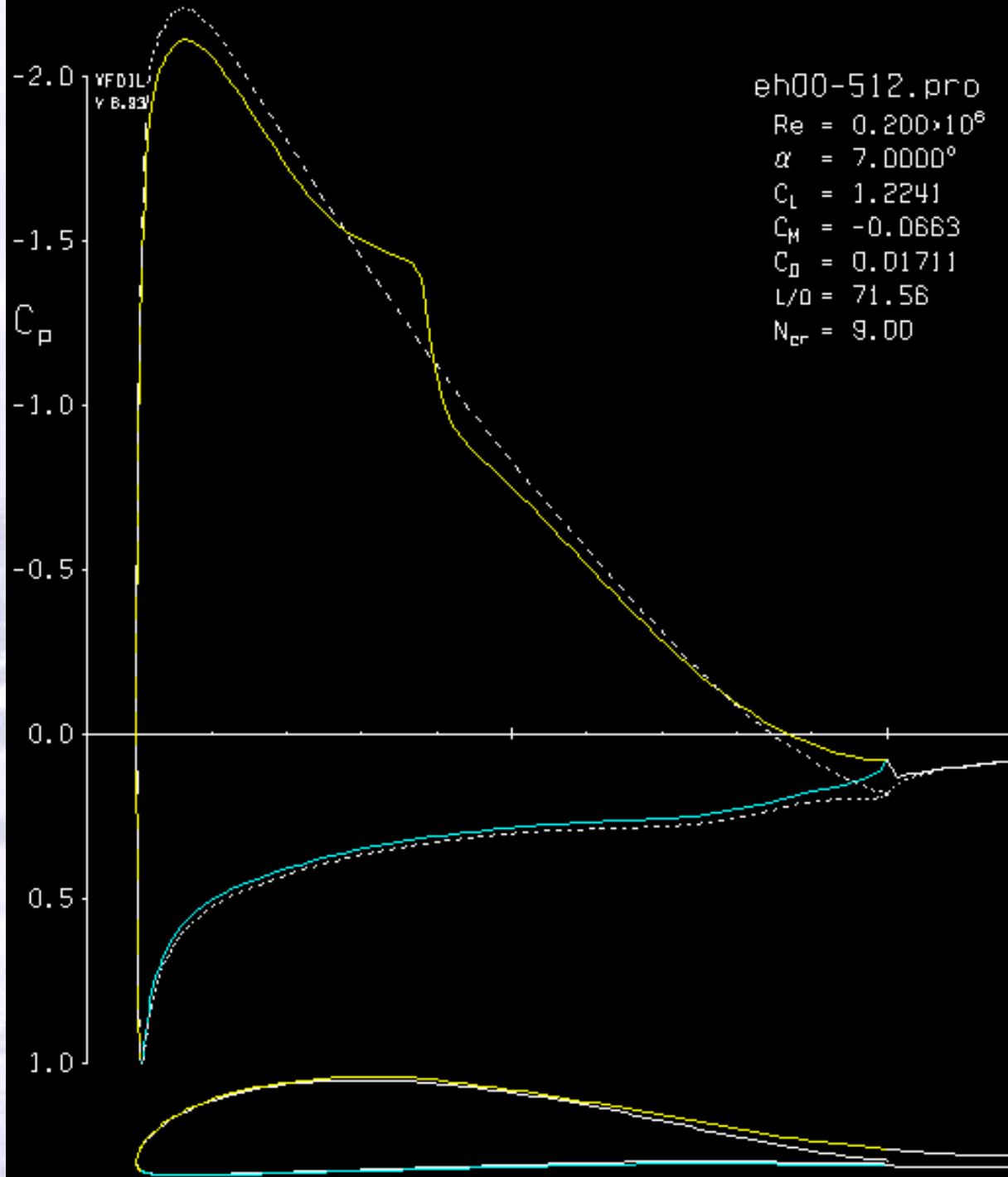
... ja saadaan optimi liitosuhteeksi

L/D optimi = **71.56**

alfa = 7°

CL = 1.224

CD = 0.01711



Tämä superpositiomenetelmä on

- ollut käytössä jo yli puoli vuosisataa
- perustuu ohuen siiven teoriaan, joka noudattaa lineaarista käyttäytymistä
- ei toimi hyvin suurilla kohtauskulman arvoilla
- Perinteisesti käytettäessä superponoidaan:
 - symmetrisen profiilin nopeusjakauma
 - kaarevuuden nopeusjakauma
 - kohtauskulman nopeusjakauma
 - lähdeteoksena yleensä Abbot & Doenhoff, "Theory of Wing Sections", 1949

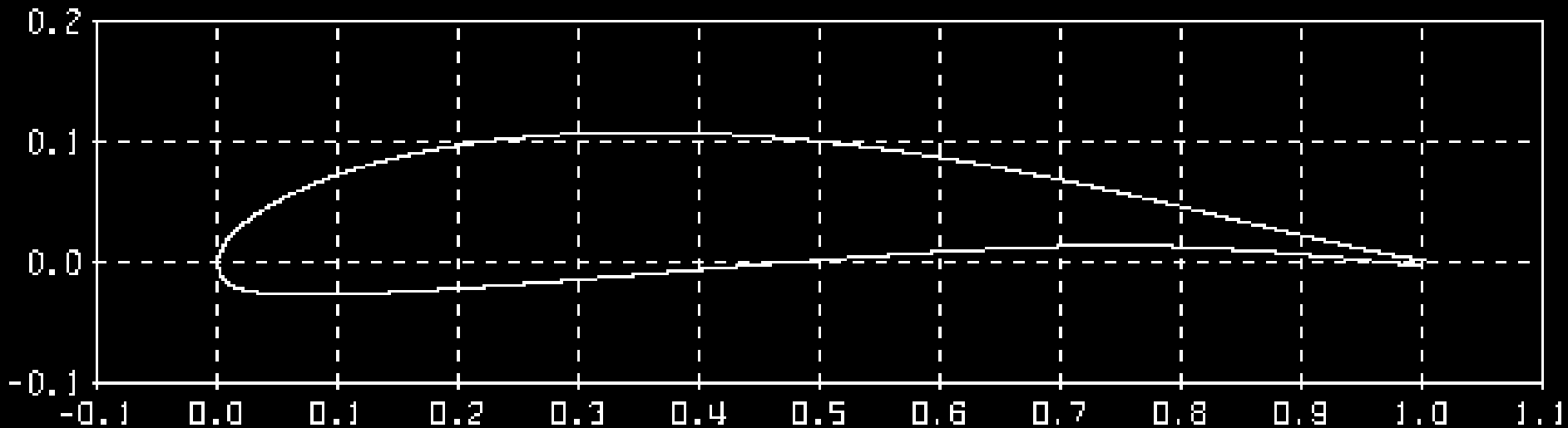
Profiilin kehitys alkaen nopeusjakaumasta

- Nopeusjakauman muoto määrittelee profiilin ominaisuudet ja suunnittelu voidaan aloittaa siitä.
- Valitaan alustavasti sopivan tuntuinen profiili, jonka nopeusjakauma lasketaan.
- Nopeusjakaumaa muutetaan pienin muutoksin haluttuun suuntaan ja lasketaan mikä profiilin muoto tuottaa halutun nopeusjakauman.
- Laskentaa jatketaan pienin muutoksin, kunnes haluttu nopeusjakauma on saavutettu.
- Lopuksi lasketaan profiilin ominaisuudet

L/D-optimoitu profiili, Re=200 000

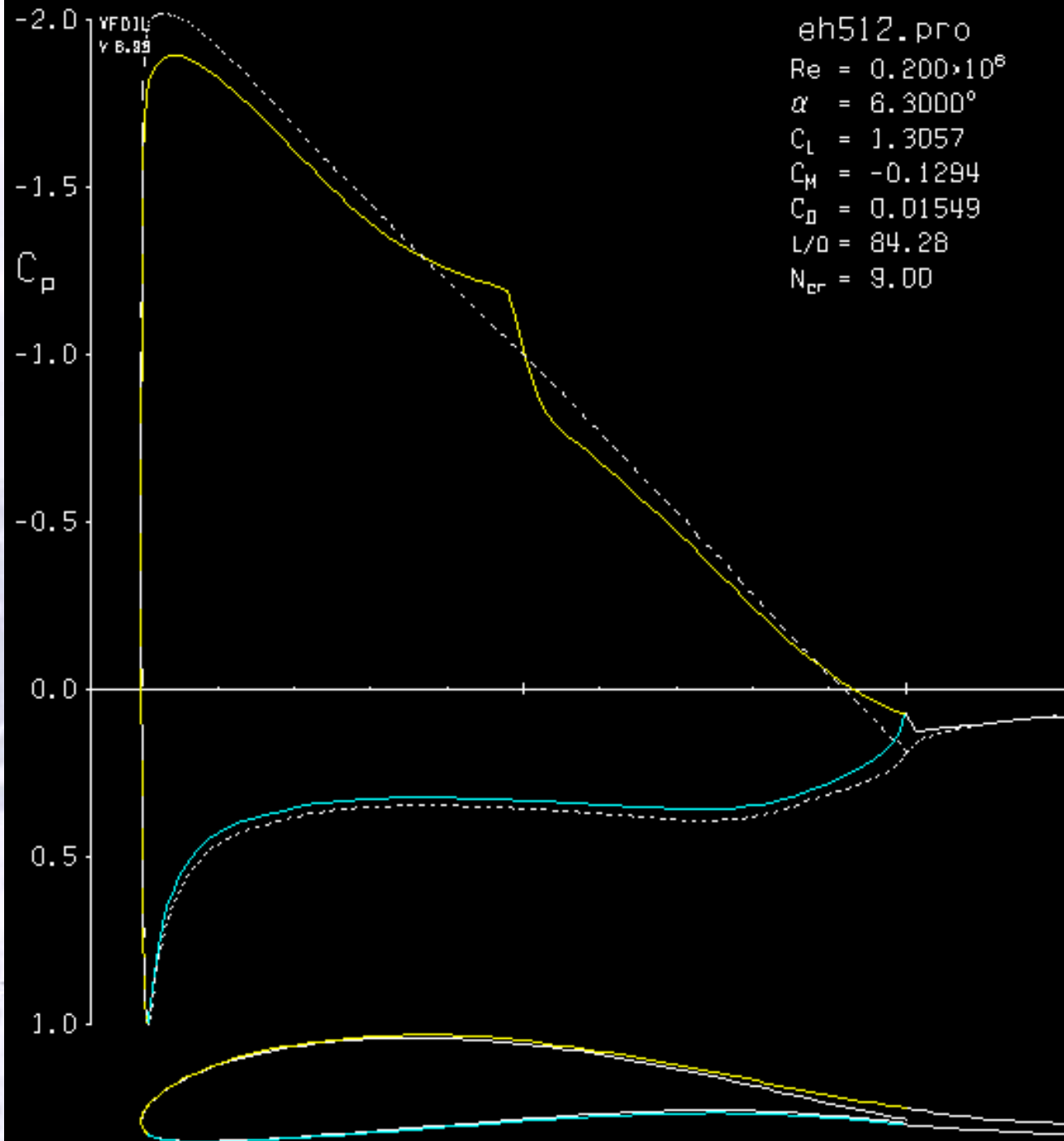
Edellistä profiilia on viilattu, kunnes lopputuloksena on profiili EH512.pro, jolla on erinomainen L/D

```
eh512.pro  
area   = 0.07604  
thick. = 0.12160  
camber = 0.05201  
   $\Gamma_{LE}$  = 0.02090  
   $\Delta\theta_{LE}$  = 1.48^\circ
```



EH512.pro painejakauma

Muuttamalla nopeus-
jakaumaa on saatu
liitosuhteeksi **84.28**
eli 17.7% parempi
kuin edellä
superponointi-
menetelmällä saatu
($L/D = 71.56$)



Vanha sotaratsu NACA 4412

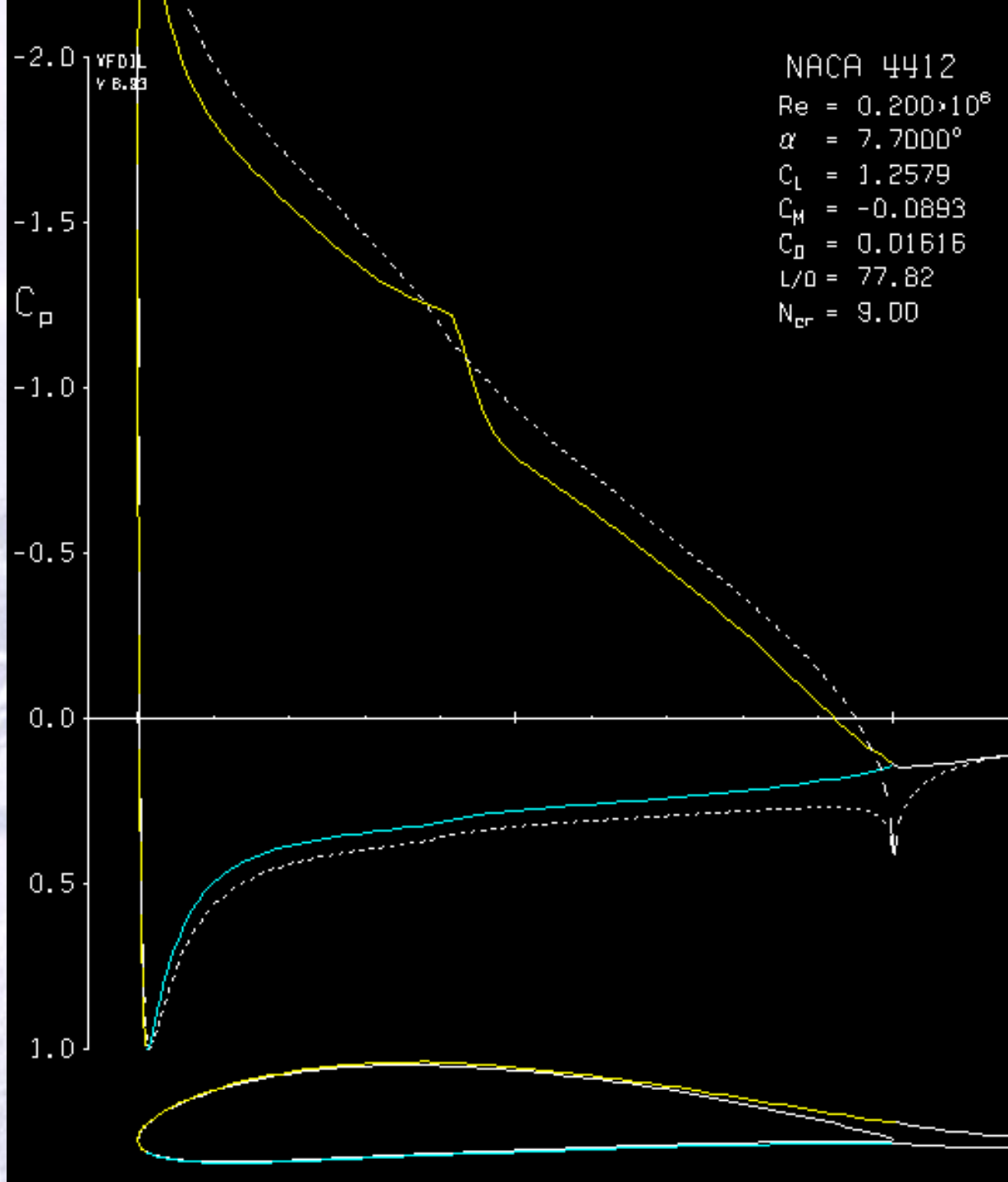
Alfa = 7.7°

L/D = 77.82

vain 7.6 % huonompi
kuin optimoimalla
saatu tulos

NACA 4412 oli
aikoinaan paljon
käytetty profiili

2/26/2020



Tämä esimerkki osoittaa, että:

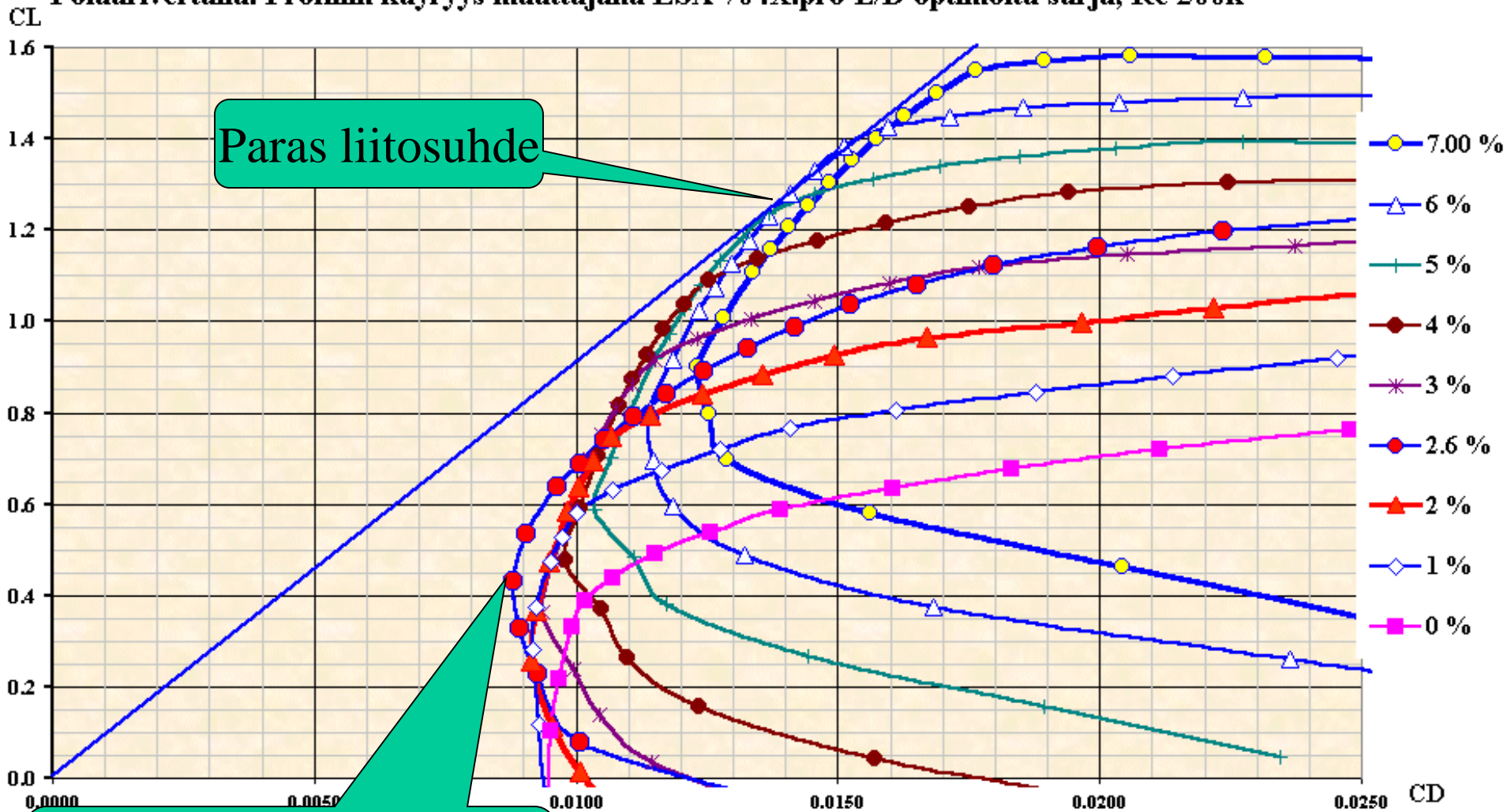
- Tuulivoimalan aerodynamiikassa on uusien työvälineiden avulla saavutettavissa parannusta
- Uudet työvälineet mahdollistavat erilaisten vaihtoehtojen vertailun työpöydän ääressä, jolloin kalliita testejä voidaan tehdä etukäteen toimiviksi arvioituille ja muihin verrattuna parhaille profiileille
- Voimalan lavat voidaan jopa räätälöidä asiakkaan tarpeiden mukaisesti tuottamaan parhaan mahdollisen tuoton.

Profiilin ominaisuuksien vertailu, $Re = 200k$

- Seuraavassa esitetään 12% paksun profiilin ominaisuudet kaarevuuden vaihdellessa välillä $0^\circ - 7^\circ$
- Kaikki muut profiilit on optimoitu L/D:n suhteen paitsi 2.6%:n profiili, joka on optimoitu minimi vastuskertoimen suhteen, kun $CL = 0.45$
- Vertailukäyrästöjä ovat polaarin lisäksi:
 - Liitosuhde L/D
 - Tehokäyrä
 - $CL(\text{Alfa})$
 - $CD(\text{Alfa})$

Polaari: Re 200k kaarevuus muuttujana

Polaarivertailu. Profilin käyryys muuttujana ESA 704X.pro-L/D optimoitu sarja, Re 200k



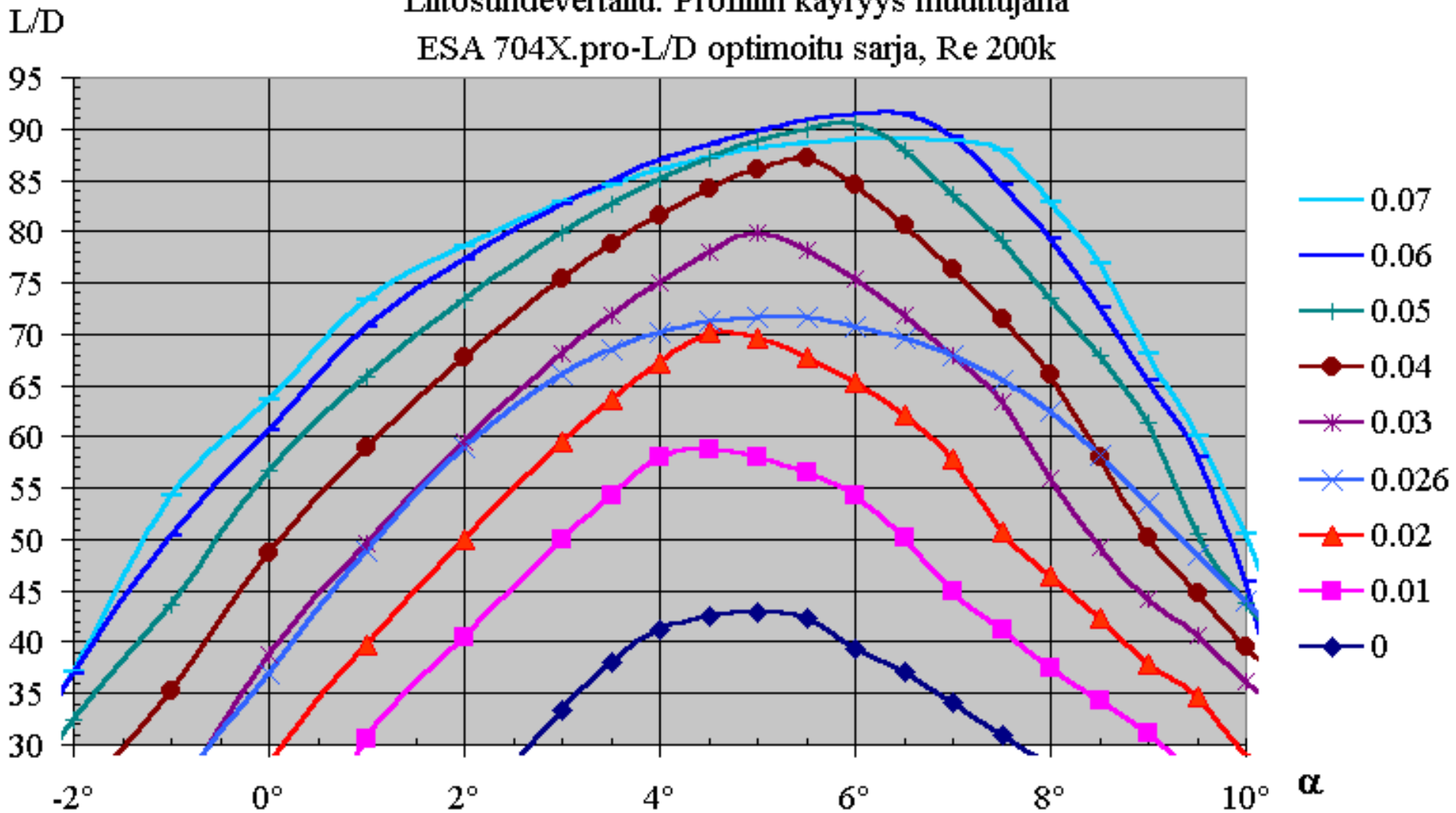
Paras liitosuhde

Minimi vastukselle
optimoitu 2.6%:n profiili

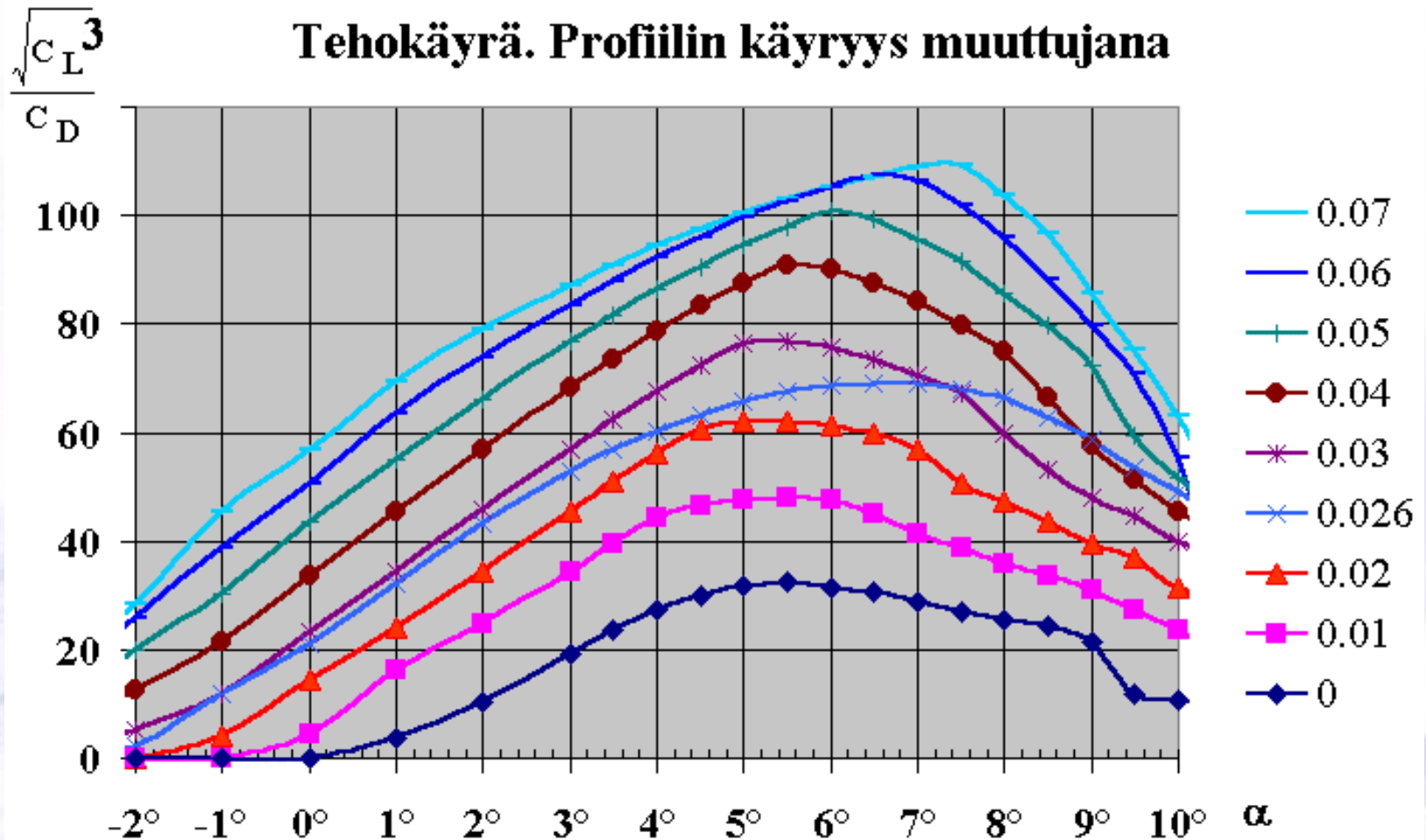
Tuulitaito

Liitosuhde

Liitosuhdevertailu. Profilin käyryys muuttujana
ESA 704X.pro-L/D optimoitu sarja, Re 200k

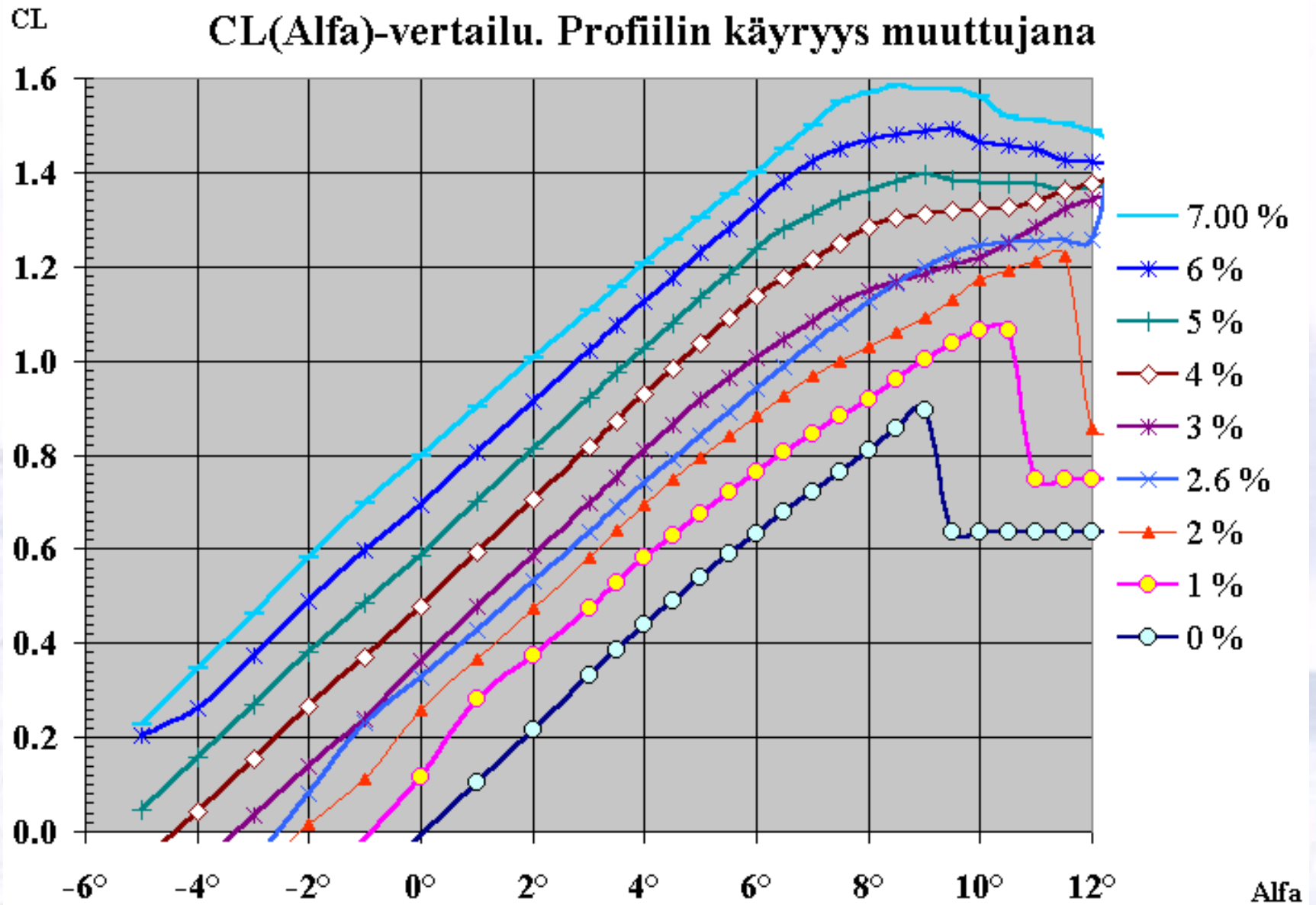


Tehovertailu, minimi tehonkulutus

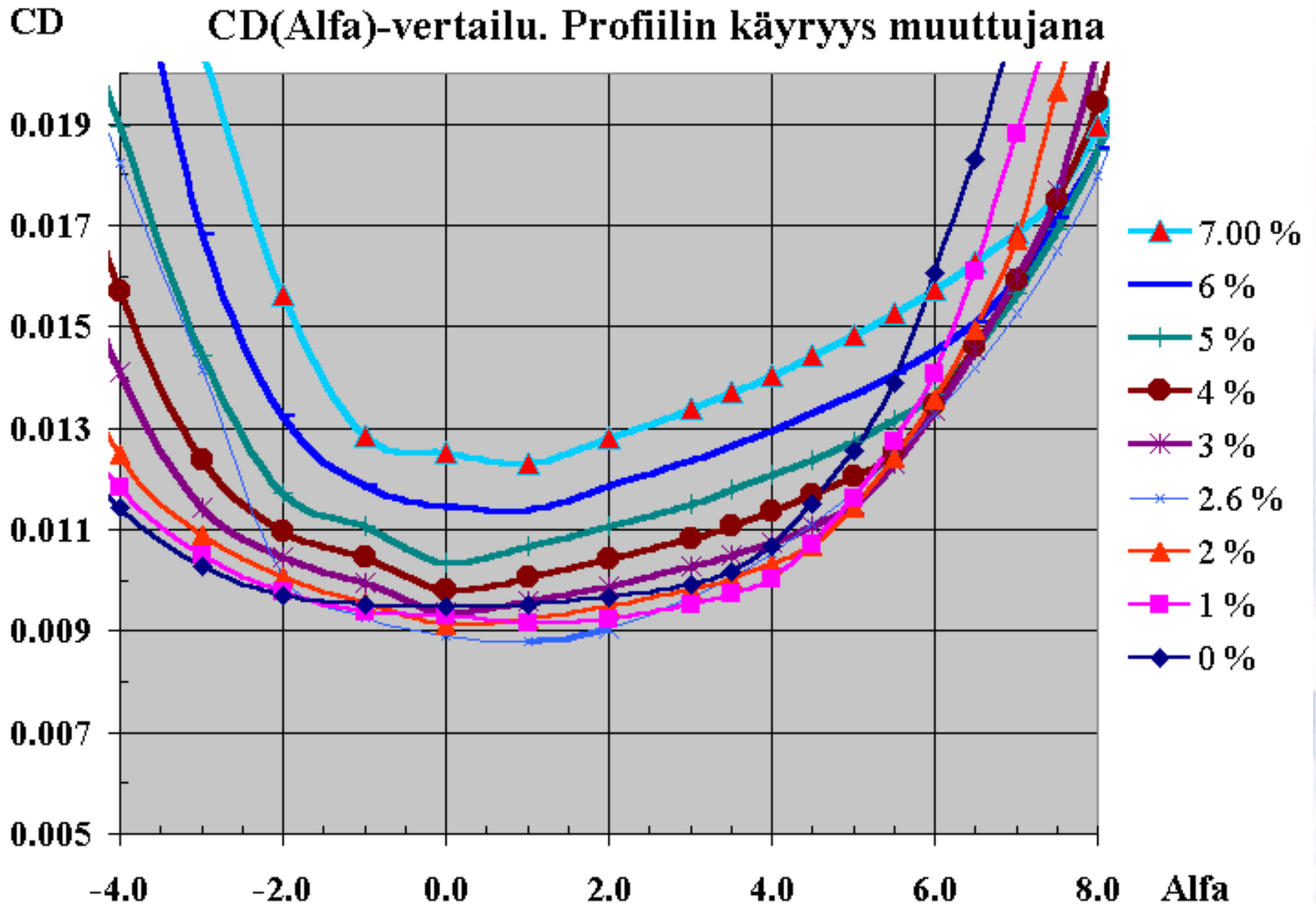


Käyrän huippua vastaavalla kohtauskulmalla saavutetaan
minimi vajoamisnopeus ja pienin tarvittava teho

CL(Alfa)



CD(Alfa)





Kiitos tarkkaavaisuudesta

2/26/2020

Tuulitaito