

WAKE-Profiilin kehitys. Jatkettu sivulta 23 eteenpäin

Lisätty Andrjukovin WAKEn tyvi-, keski- ja kärkiprofiilit sekä kehitetty uusi WAKE-profiili, "EHWR.PRX" ja tehty profiilien suoritusarvovertailu paraiden WAKE-profiilien kesken

Tavoite: Kehittää alhaiselle Re-luvulle (40 000) profiili, joka käyttäytyy johdonmukaisesti laajalla kohtauskulma-alueella.

Toteutus: Lähtöprofiilina käytettiin Ossi Kilpeläisen "Oloikko 57"-profiilia, jonka koordinaatit saatiin piirustuksesta. Profiilista säilytettiin lähinnä paksuus ja kaarevuus. Profiilin kehityksessä käytettiin $Re = 40\,000$ ja sen polaarit laskettiin Re -alueelle $20\,000 - 100\,000$. Kehitettäessä oletettiin, että profiilin karheus riittää ohjaamaan yläpinnan transitio-pistettä¹ siten, ettei erillistä turbulaattoria tarvita. Liian sileä profiili aiheuttaa voimakasta ominaisuuksien muuttumista, mikä lennossa näkyy vaikeana trimmattavuutena. Ominaisuuksien muutokset johtuvat paljolti transitiopisteen äkillisestä siirtymisestä joko kohtauskulman tai Re -luvun muutoksen vuoksi. Mikäli tätä esiintyy, voi profiilin yläpinnalle lisätä turbulaattorin kohtaan 30% ja alapinnalle kohtaan 1 – 2%.

Profiili: Nimitys: OSSI-11.PRX
Paksuus: 10.53%
Kaarevuus: 6.47%
Jättöreunan paksuus: 1%
Koordinaatit: file: OSSI-11.PRX profiilin koordinaatit.txt

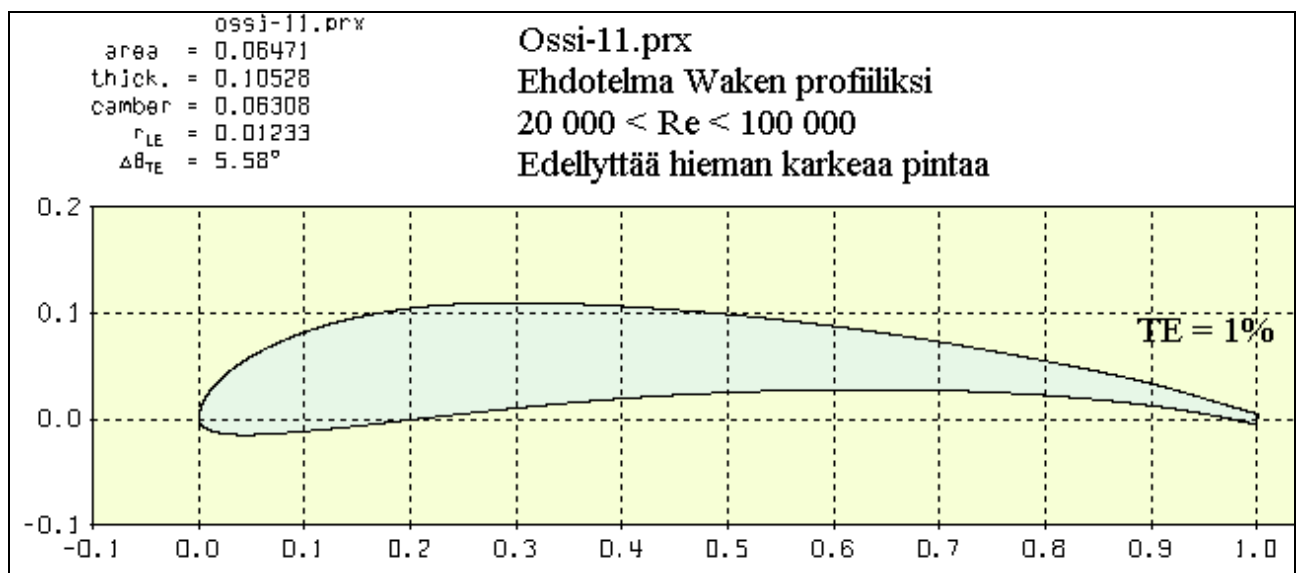


Figure 1 OSSI-11.PRX

Seuraavaksi esitetään profiilin ominaisuudet kuvin.

¹ Transitio-piste osoittaa paikan, jossa laminaarinen virtaus muuttuu turbulentsiksi

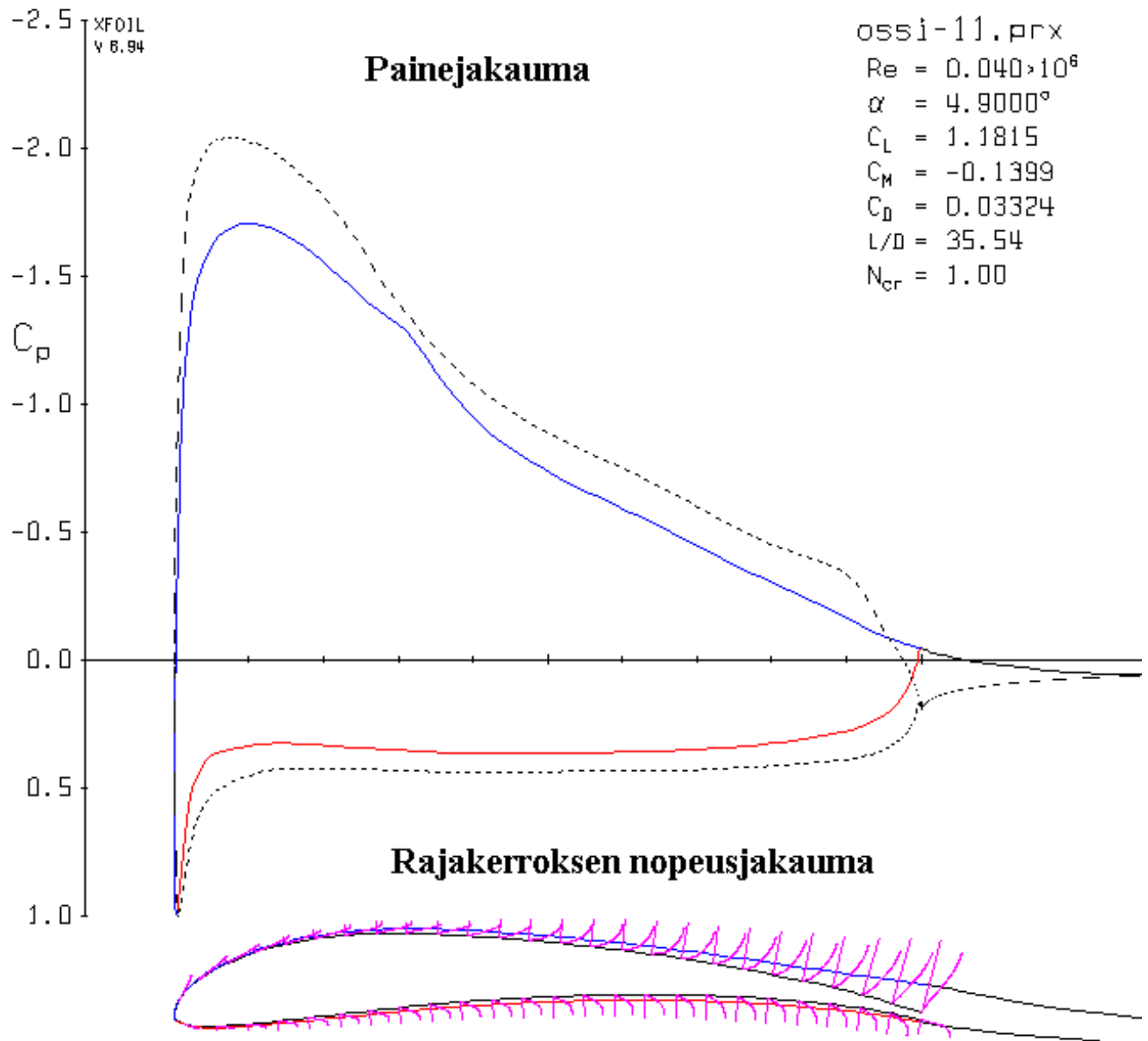


Figure 2 Suunnittelupisteen painejakauma ja rajakerroksen nopeusjakauma. Tässä pisteessä liitosuhde on parhaimmillaan. Pienin vajoaminen saavutetaan hieman suuremmalla kohtauskulmalla.

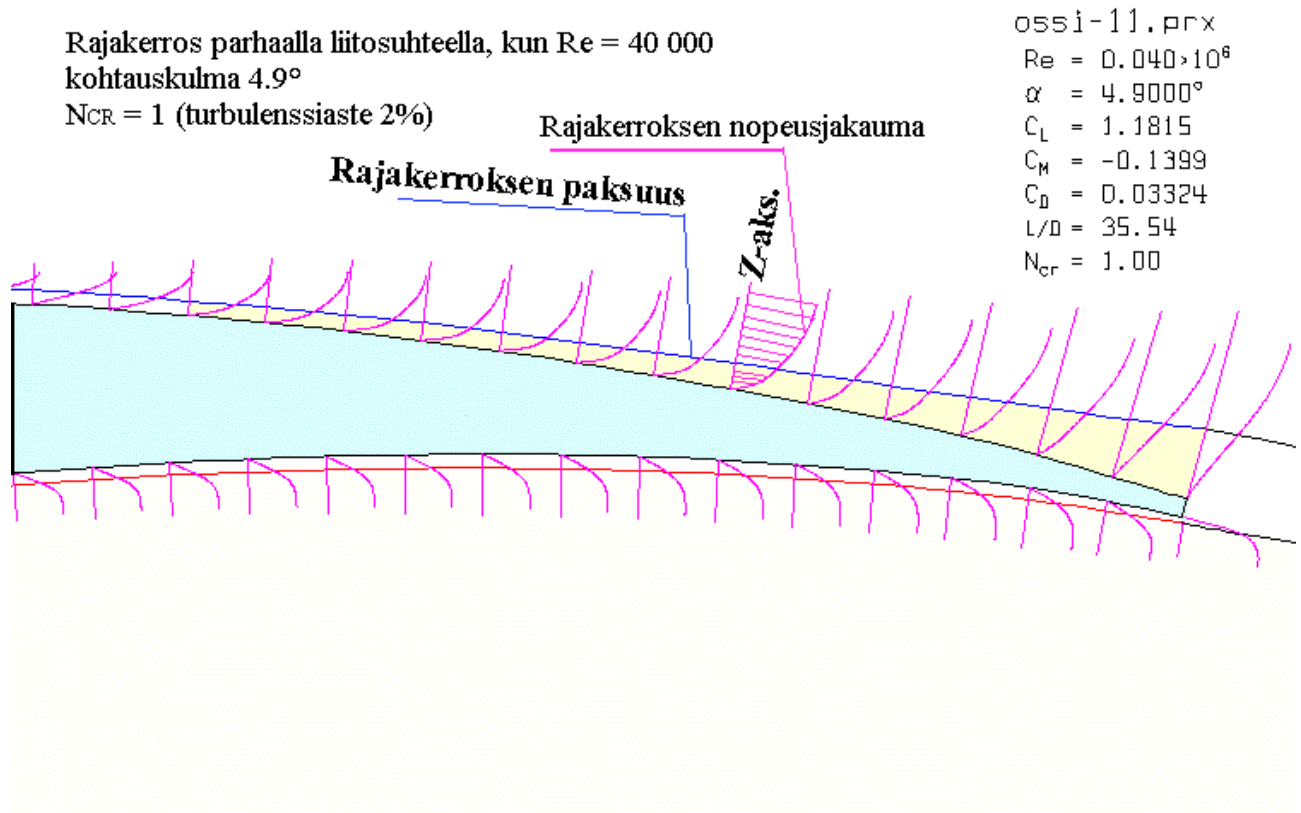


Figure 3 Jättöreunan läheisen rajakerroksen nopeusjakauma. Jättöreunan voimakas kaareutuminen noin 90% kohdalla aiheuttaa voimakasta rajakerroksen paksuntumista sekä lisää momenttia. Mitä paksumpi rajakerros jättöreunassa sitä suurempi on profiilin vastus.

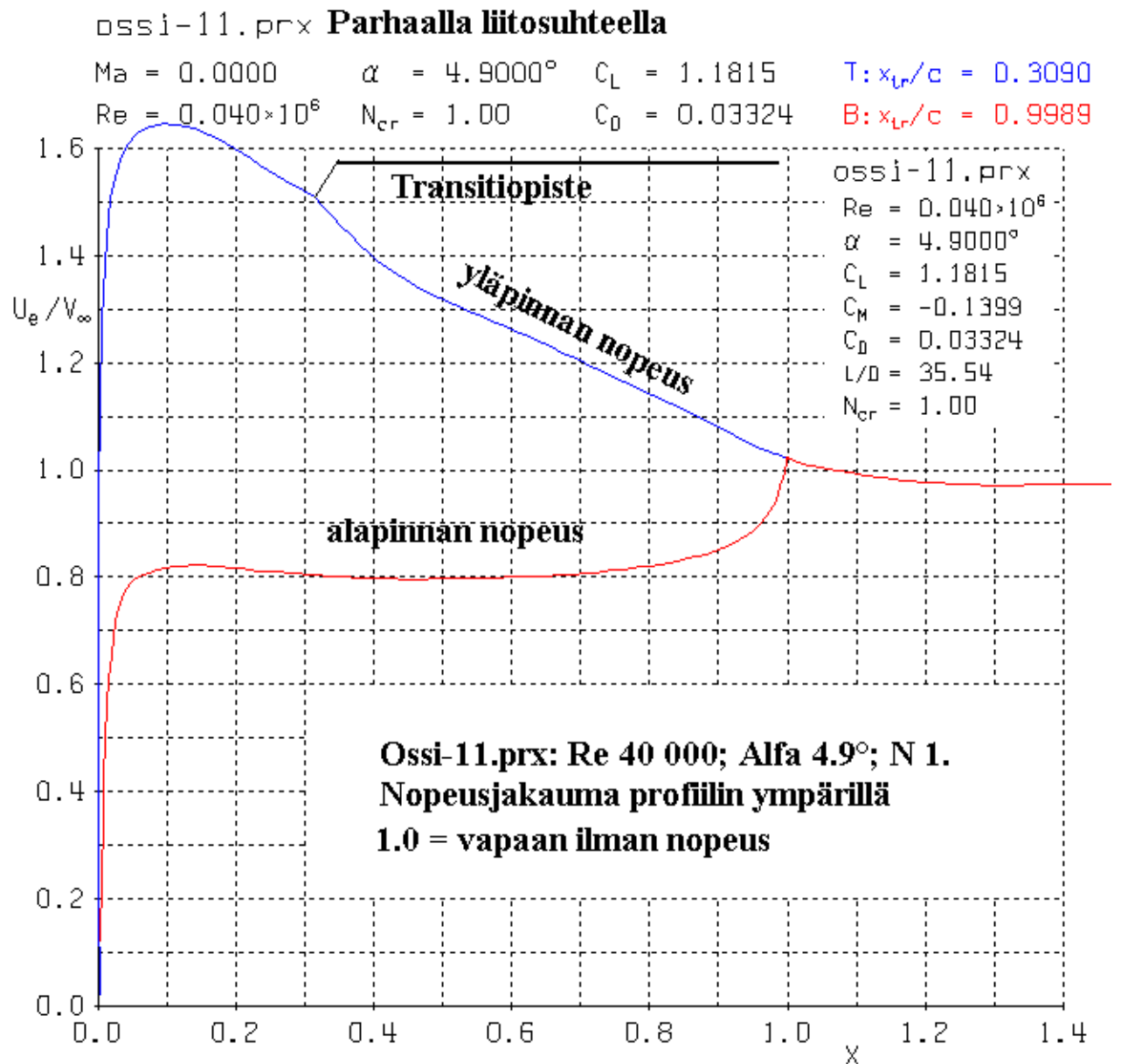


Figure 4 Virtauksen nopeusjakauma profiilin ympärillä, juuri rajakerroksen yläpuolella.

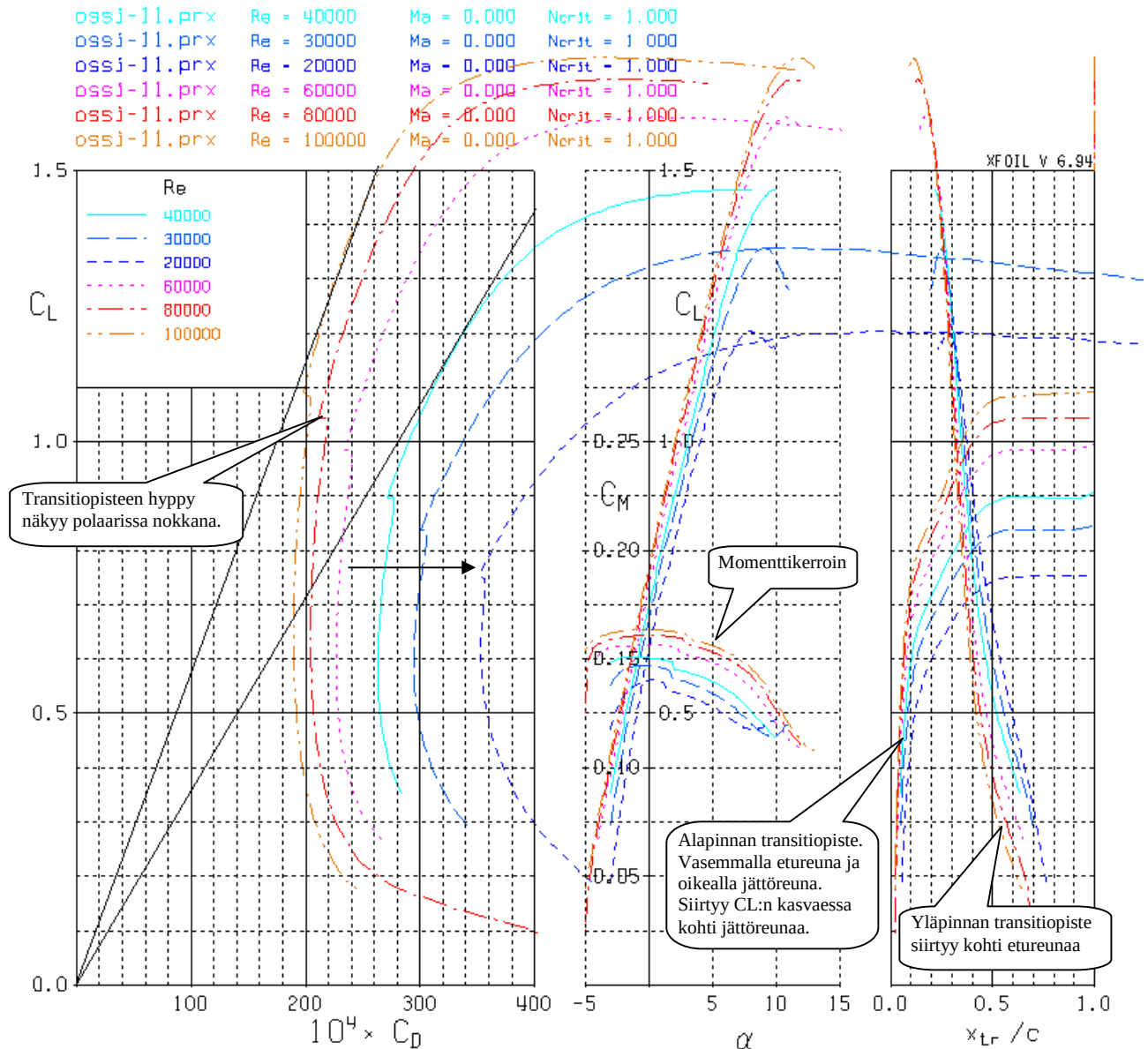


Figure 5 Polaarit, CL(Alfa), CM(Alfa) Re = 20 k, 30k, 40k, 60k, 80k ja 100k. Polaarissa esiintyy ”nokka”, jonka saa pois lisäämällä turbulaattorit yläpinnalle kohtaan 30% ja alapinnalla mahdollisimman eteen 1-2%:iin.

Oikeassa reunassa olevassa kuvassa on transitiopisteen sijaintia osoittava kuvaaja. Transitiopisteen vasemmalla eli etureunan puolella virtaus on laminaarinen ja oikealla puolella turbulenttinen. Transitiopiste siirtyy alapinnalla kohtauskulman kasvaessa kohti jättöreunaa ja yläpinnalla kohti etureunaa. Mikäli tapahtuu äkillinen hyppy, mikä on hyvin yleistä esimerkiksi koverille alapinnoille, tämä näkyy polaarissa terävänä nokkana.

HUOM 1.! Kaikki polaari ovat 2D-virtaukselle, jota oikean siiven sivusuhte ja kierto muuttavat. Profiilien keskinäiseen vertailuun nämä ovat aivan OK! Koko lennokin arvot vaativat paljon laskentaa.

HUOM 2. Momenttikertoimen CM muutokset Re-luvun ja kohtauskulman muuttuessa vaikuttavat keskeisesti koneen trimmattavuuteen. Mikäli osaat sanoa jotain näiden ominaisuuksien haluttavista arvoista, voin muuttaa profiilia haluttuun suuntaan.

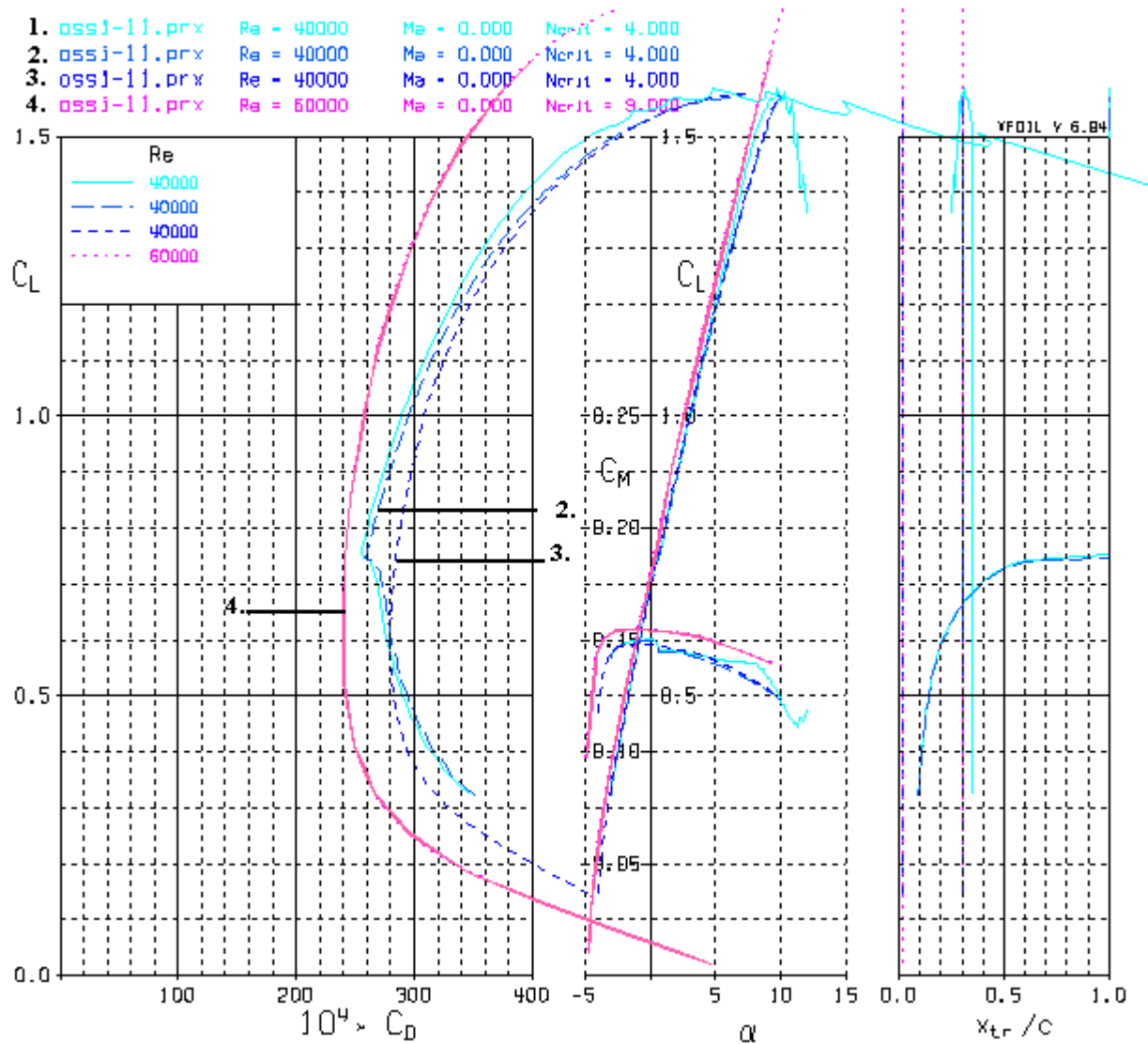
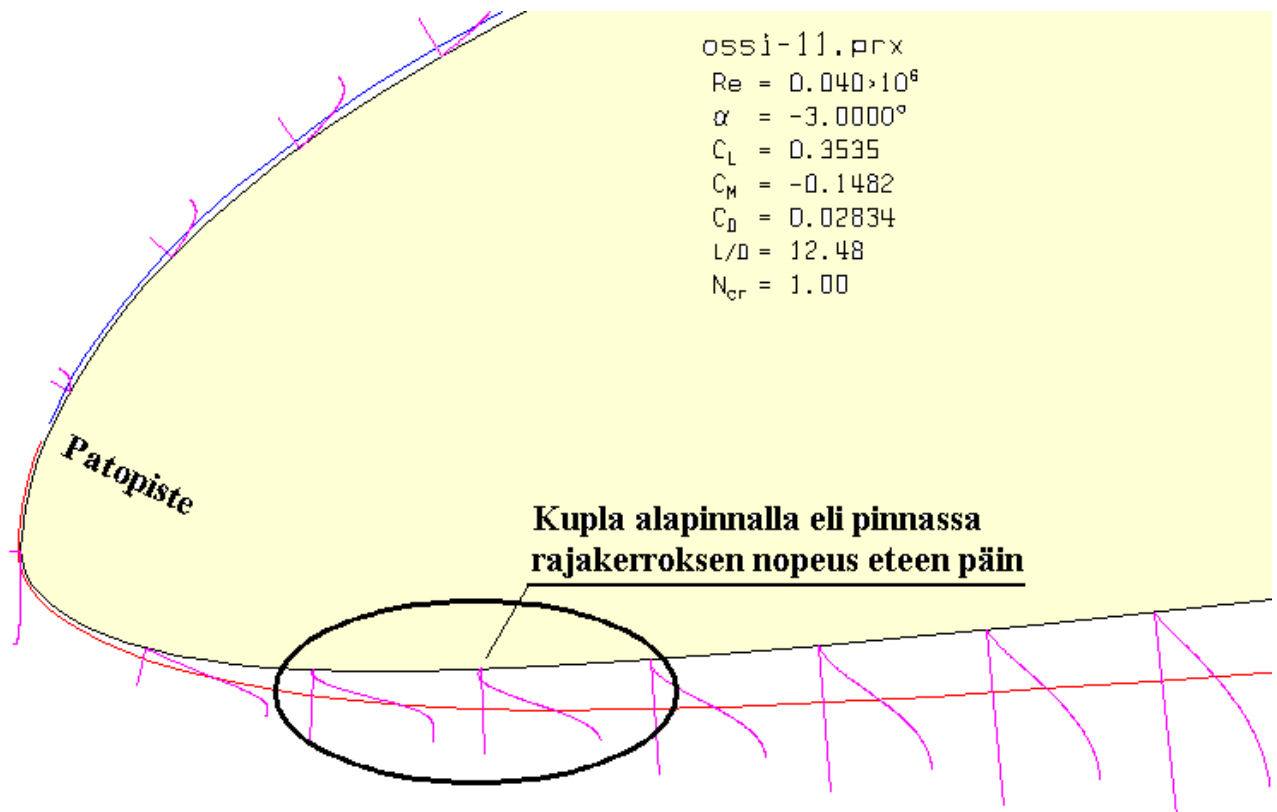


Figure 6 Turbulaattoreiden vaikutus polaariin. Arvot on laskettu aiempia kuvajia sileämmälle profiilille. Aiemmin käytetty $N = 1$ on näistä karhein. $N = 4$ vastaa kohtuullisen hyvää tuulutunnelia ja $N = 9$ varsin sileää profiilia. Sileä profiili vaatii turbulaattorin, jollaiset on lisätty. XtripT on yläpinnan turbulaattorin etäisyys etureunasta ja XtripB on alapinnan turbulaattorin etäisyys. Turbulaattorit lisäävät vastusta mutta saavat profiilin käyttäytymään siistimmin nopeuden tai kohtauskulman muuttuessa. Erityisesti nopeassa nousussa, jolloin kohtauskulma on pieni ja nostovoimakertoimen alhainen alapinnan turbulaattori saattaa osoittautua aiheelliseksi. Käyrä 4., jolla $Re = 60000$ ja $N = 9$ osoittaa, miten pienin vastus saavutetaan, kun $CL = 0,6 - 0,7$.

airfoil file	Re	Mach	Ncrit	XtripT	XtripB
1. ossi-11.prx	4.000e4	0.000	4.00	0.350	1.000
2. ossi-11.prx	4.000e4	0.000	4.00	0.300	1.000
3. ossi-11.prx	4.000e4	0.000	4.00	0.300	0.020
4. ossi-11.prx	6.000e4	0.000	9.00	0.300	0.020



Negatiivisilla kohtauskulmilla alapinnan transitiopiste siirtyy etureunaan ja kun kulma on alle -3° alkaa alapintaan muodostua laminarikupla, joka muuttaa virtauksen turbulenttiseksi ja aiheuttaa kulman kasvaessa virtauksen irtoamisen

Figure 7 Etareunakupla, kun $\alpha = -3^\circ$. Kupla muodostuu, kun virtausnopeus rajakerroksessa kääntyy takaperoiseksi. Tämä johtuu liian jyrkästä mutkasta, jonka terävä etareuna aiheuttaa. Patopiste on etareunan yläpuolella ja sen kierrettyä virtaus hidastuu nopeasti. Kuplan takana virtaus tarttuu uudestaan kiinni, mutta muuttuu turbulenttiseksi aiheuttaen vastusta. Kupla muuttaa myös profiilin muodon dynaamista muutosta ja tästä syntyy mutkia C_L (Alfaan) ja C_D (Alfaan) sekä etenkin liitosuhteeseen eli C_L/C_D :hen. Kuplan voi estää asettamalla etareunaan turbulaattorin.

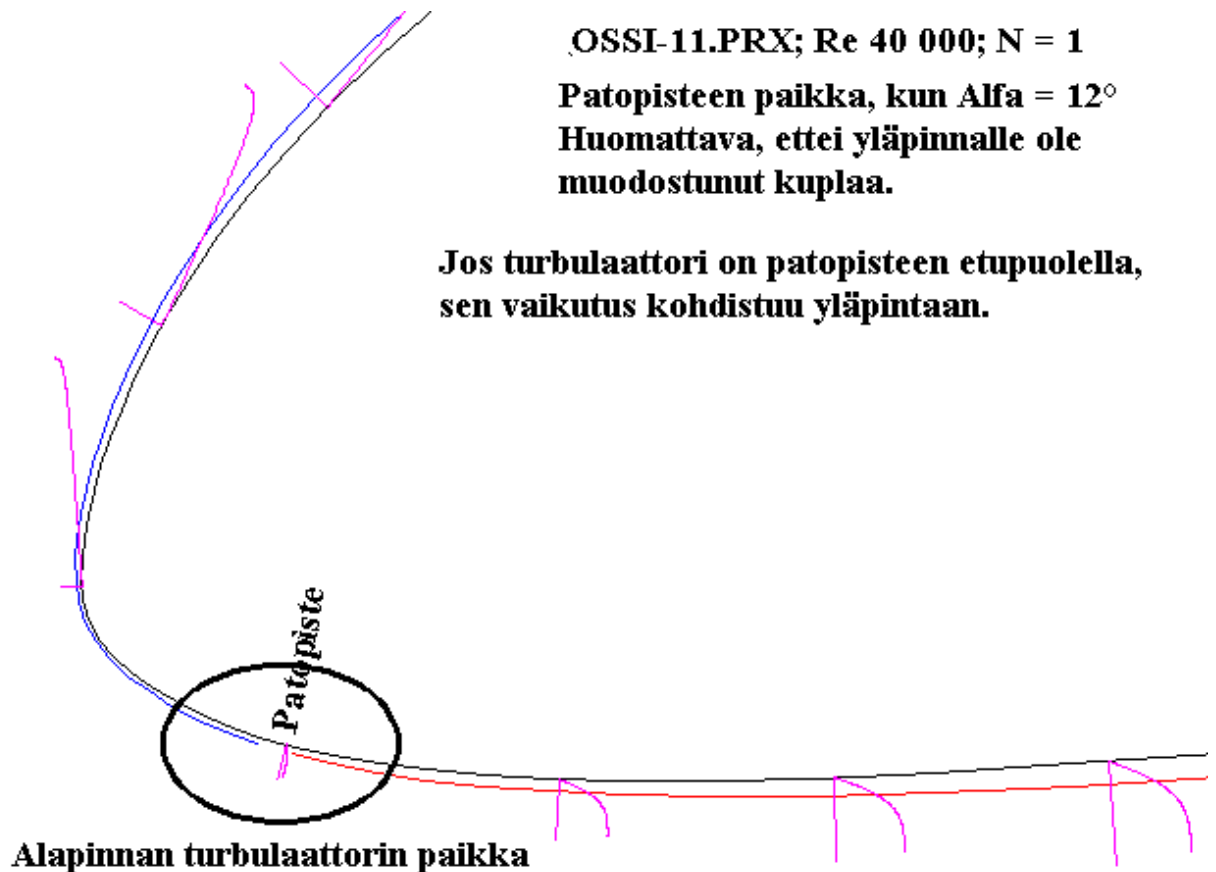


Figure 8 Patopiste, kun Alfa = 12°. Alapinnan turbulaattoria sijoitettaessa on huomioitava, että mikäli se on patopisteen edessä, sen vaikutus kohdistuu yläpintaan eikä alapintaan, kuten on tarkoitus. Tämä ei oikeasti ole ongelma, koska turbulaattoria tarvitaan alapinnalla, kun $CL < 0,7$ (Nykämä polaarissa on raja-arvo) ja $\alpha < -1$. Tätä suuremmilla CL-arvoilla alapinta on kauttaaltaan laminaarinen eikä kuplasta ole vaaraa. Alle 5° kohtauskulmalla patopiste on niin lähellä etureunaa, että turbulaattorille jää tilaa. Mikäli turbulaattori on liian takana, luonnollinen transitiopiste on sen etupuolella ja turbulaattorista ei ole apua silloin, kun sitä tarvitaan vaan ainoastaan haitat eli kasvanut vastus.

Turbulaattorista saatava etu

Turbulaattori parantaa yleensä koneen trimmattavuutta. Se saattaa myös pienentää vastusta, jos se on sijoitettu oikein. Vastuksen pieneneminen perustuu siihen, että turbulaattorin ansiosta saadaan virtauksen irtoaminen eli osasakkaus siirtymään myöhemmäksi tai estetyksi kokonaan. Hyötyä ei synny, mikäli osasakkauksen, kuplan tai muun ongelman esiintymisvaaraa ei ole.

WAKElle ei korkeasta liitosuhteesta ole juuri apua vaan sen tulisi pysyä ilmassa mahdollisimman kauan. Tämä edellyttää hyvää tehokkuutta profiililta, joka on kuvattu kuvassa 9.

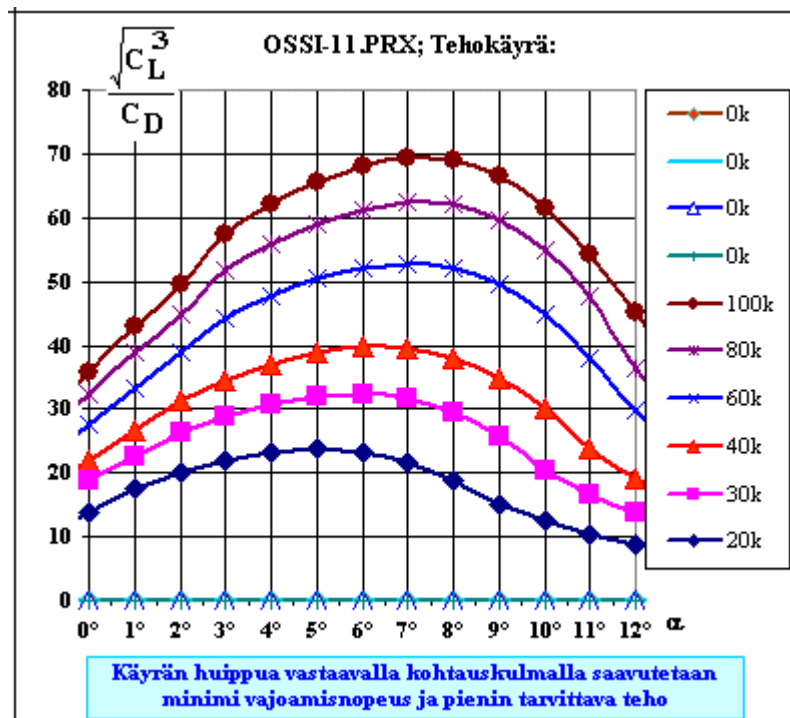


Figure 9 OSSI-11.PRX profiilin tehokäyrät alueella Re 20k - 100k. N = 1. Tehokäyrän huiput osoittavat kullakin Re-luvulla parhaan kohtauskulman, jolla saavutetaan minimi vajoamisnopeus.

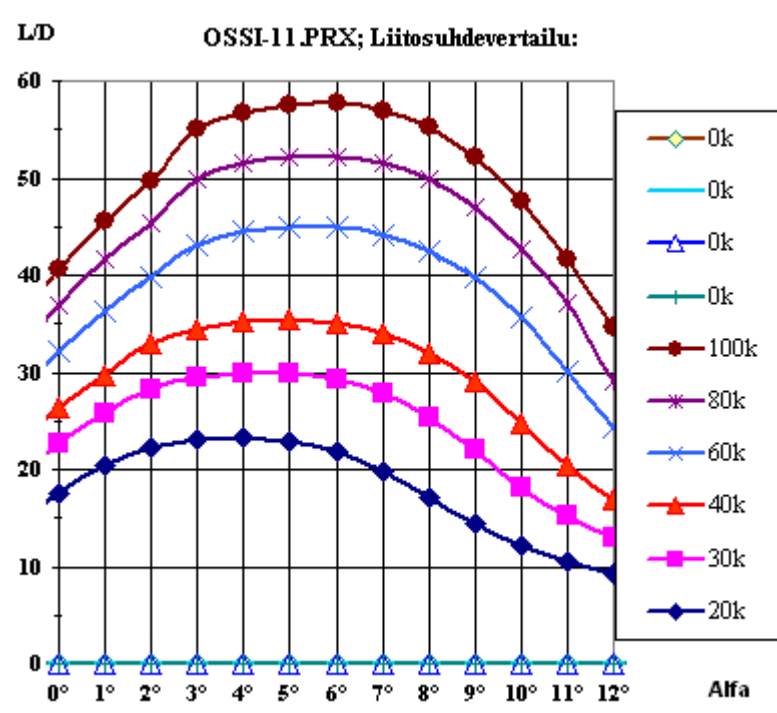


Figure 10 Liitosuhde L/D alueella Re = 20k - 100k. Hyvää liitosuhdetta tarvitaan esimerkiksi nousussa, jossa täytyisi päästä mahdollisimman korkealle. Tällöin ei tarvita paljon nostovoimaa, joten alhainen vastuskerroin pienillä CL-arvoilla on edullinen. Polaari on helpoin tapa arvioida tätä.

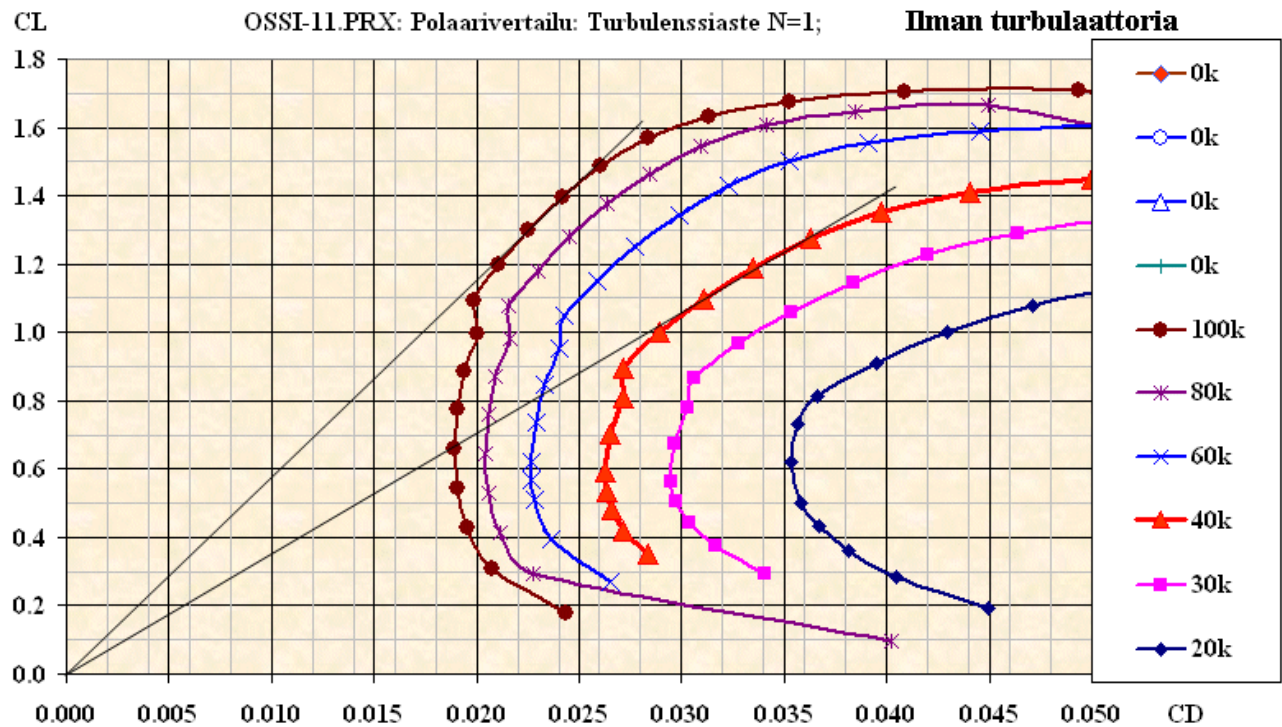


Figure 11 Polaarikäyrät alueella $Re = 20k - 100k$, $N = 1$. Polaareissa näkyy selvästi nykämät, jotka aiheutuvat alapinnalla tapahtuvasta transitiopisteen siirtymisestä ja kuplan muodostuksesta. Suoritusarvot ovat paremmat, ellei turbulaattoreita käytetä. Mikäli vastus halutaan pienemmäksi alhaisella CL-arvolla, on profiilin kaarevuutta pienennettävä. Tämä laskee CL_{MAX} arvoa ja pienentää liitosuhdetta.

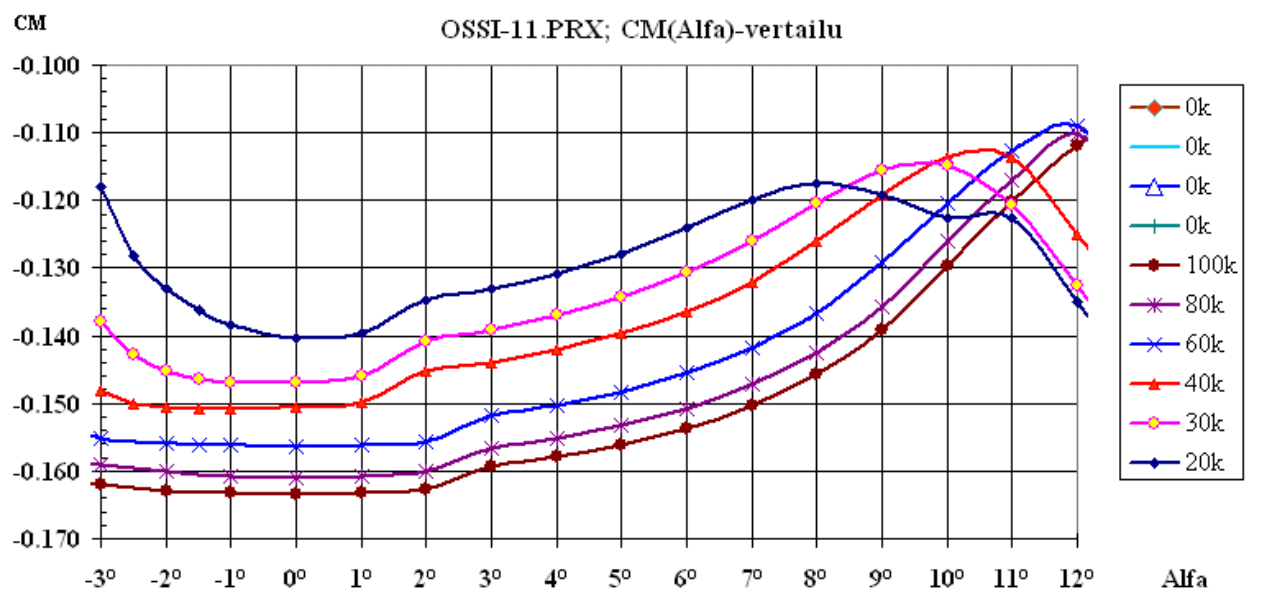


Figure 12 Momenttikertoimet kun $Re 20k - 100k$ ja $N = 1$. Momenttikertoimen muuttuminen vaikuttaa merkittävästi lennokin trimmattavuuteen. Polaarissa näkyvä nykäminen ilmenee myös momenttikertoimessa. Mikäli tämä muodostaa ongelman, on käytettävä turbulaattoria kuten aiemmin on mainittu. Momenttikerrointa voidaan pienentää muotoilemalla profiilia. Jos jättöreunan mutkaa alaspäin pienennetään, niin momenttikerroin pienenee. Samaan suuntaan vaikuttaa myös kaarevuuden pienentäminen.

Täydennystä:

Ossi Kilpeläisen Olokko-profiili sellaisena, kuin olen sen saanut ACAD-piirustuksesta. Etureunaan on laskentaohjelman vaatimuksesta laitettu pieni säde, ja korjattu pieniä mutkia, joita piirustuksessa esiintyy. Muuten profiili on piirustuksen mukainen. Laskennassa profiilille annettiin tiedostonimi "olokko.prx"

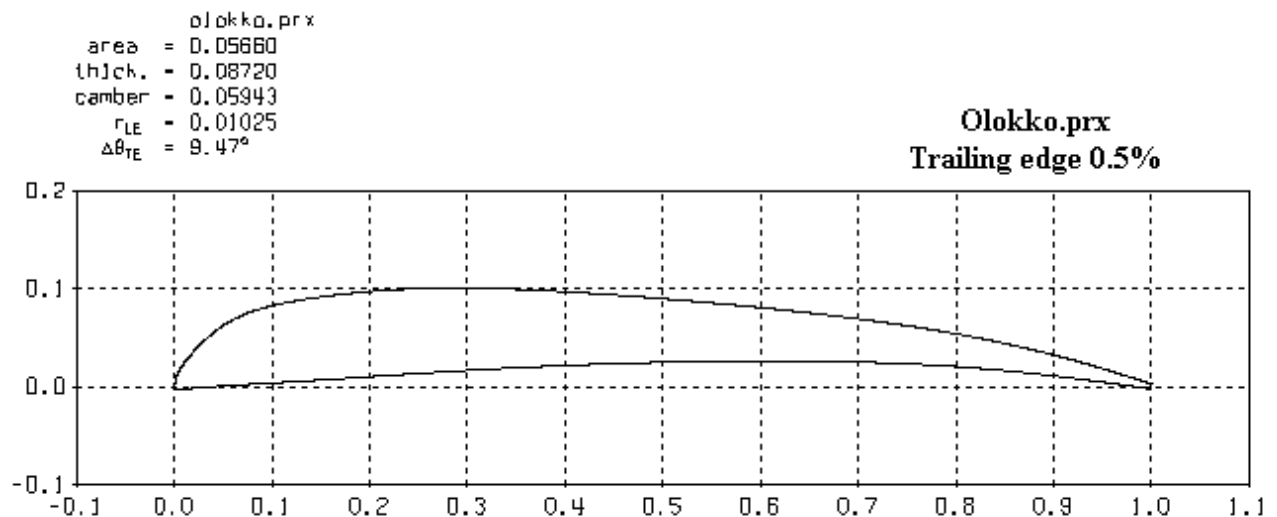


Figure 13 Olokon profiili tuotuna laskentaohjelmaan. Paksuus = 8.7%, kaarevuus = 5.9%, jättöreuna 0.5%.

Profiilin suoritusarvot laskettiin $Re = 40\,000$, kun turbulenssitekijä $N = 1$. Profiilin käyttäytymisen ymmärtämiseksi otettiin kuvia paine- tai nopeusjakaumasta eri kohtauskulmilla sekä rajakerroksesta silloin, kun siinä tapahtui jotain merkittävää.

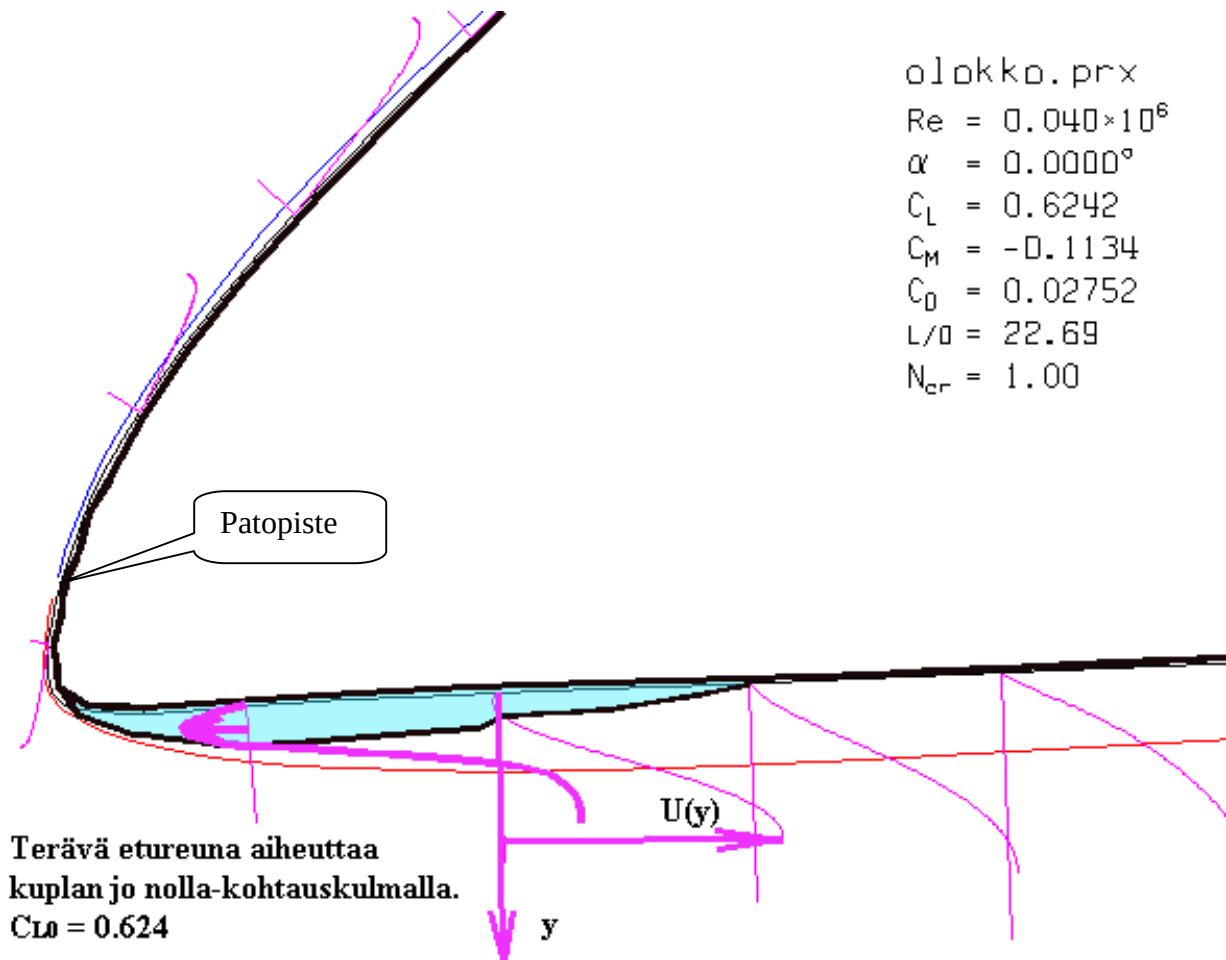


Figure 14 Profiilin keskeisin ongelma on alhaisella CL-arvolla etureunan alapuolelle syntyvä laminaarikupla, joka aiheuttaa huomattavan vastuksen lisän, nokan ilmestymisen polaariin sekä momenttikertoimen muutoksen.

Kuplan alueella virtaus irtoaa pinnasta ja kääntyy vastakkaiseen suuntaan. Kuplan jälkeen virtaus tarttuu uudestaan kiinni ja aiheuttaa turbulenttisen rajakerroksen koko profiilin loppuosalle. Tämä lisää vastusta. Kuplan muodostus loppuu, kun kohtauskulma kasvaa. Tällöin vastuskerroin pienenee hyppäyksen omaisesti, mikä näkyy polaarissa terävänä mutkana eli "nokkana".

Kuvassa violetit, pintaa vastaan kohtisuorat viivan pätkät ovat y-akseleita, joiden avulla kuvataan rajakerroksen virtausnopeutta eri etäisyyksillä pinnasta. Rajakerros on alue, jossa virtausnopeus on pinnan vaikutuksesta pienempi, kuin profiilin ympärillä oleva "kitkattoman virtauksen" nopeus, josta käytetään myös nimitystä "potentiaalivirtaus". Tämä nimitys tulee laskentamenetelmästä, jolla virtausta kuvataan matemaattisesti.

Jokaiseen y-akselin pätkään liittyy käyrä, jonka muoto esittää rajakerroksen nopeutta $U(y)$ eli y :n etäisyydellä pinnasta olevaa virtausnopeutta. Kuplan alueella osalla matkaa nopeus on etureunaa kohti kuten yllä olevassa kuvassa 14. Mitä paksumpi rajakerros sitä suurempi vastus profiililla. Rajakerros on yleensä hyvin ohut ja siitä syystä y-akselin suuntaan on käytettävä suurta kerrointa, jotta siitä saataisiin edes jonkinlainen kuva. Rajakerroksen paksuus torsio-osalla voi olla vain muutama millin sadas- tai kymmenesosa ja jättöreunassa millin luokkaa.

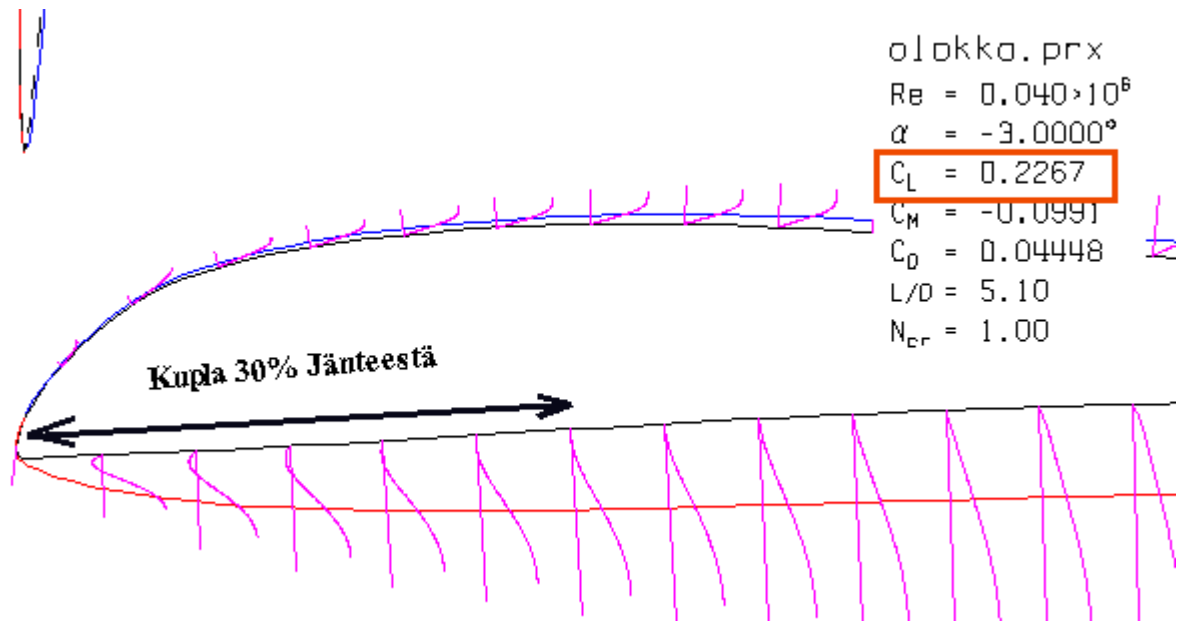


Figure 15 Kupla ulottuu jo 25% jänteestä, kun alfa on -3° ja C_L on silti vielä 0.2267. Tämä tarkoittaa esimerkiksi sitä, että nousun aikana on lennettävä hyvin hitaasti ja turhansuurella C_L -arvolla, jottei vastus kasvaisi kohtuuttomasti.

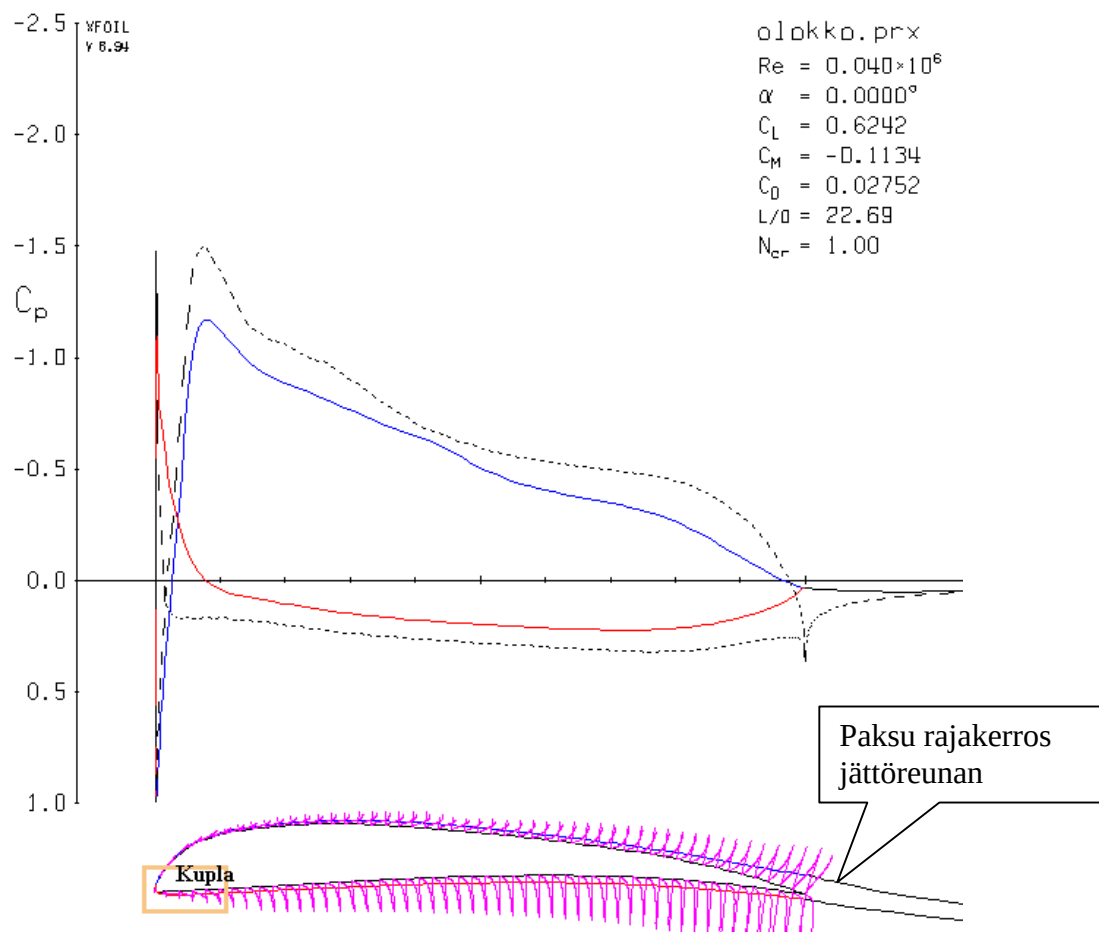


Figure 16. Painejakauma profiilin ympärillä, kun kohtauskulma = 0° . $C_L(0^\circ) = 0.6242$, joka on varsi suuri ja johtuu profiilin suuresta kaarevuudesta. Etureunassa on näytetty kohta, josta kuvan 14 suurennos on otettu.

Painejakauma osoittaa, missä nostovoima syntyy. Jokaiseen pintaelementtiin kohdistuva paine aiheuttaa pintaa vastaan kohtisuoran voiman, joiden kaikkien vektorisumma = nostovoima. Kun tähän vielä lisätään pintakitka, joka johtuu rajakerroksen aiheuttamasta nopeuden hidastumisesta, niin saadaan profiiliin vaikuttavat kokonaisvoimat, nostovoima ja vastus. Pinta-alkioihin vaikuttavien voimien momenttisuomasta syntyy momentti, jota kuvataan momenttikertoimella C_M . C_M on positiivinen silloin, kun momentti pyrkii kasvattamaan kohtauskulmaa eli nostamaan nokkaa. Koska todellinen syntyyvä momentti on kuitenkin nokkaa laskeva, momenttikertoimen arvo on negatiivinen tavallisille profiileille normaali tilanteissa.

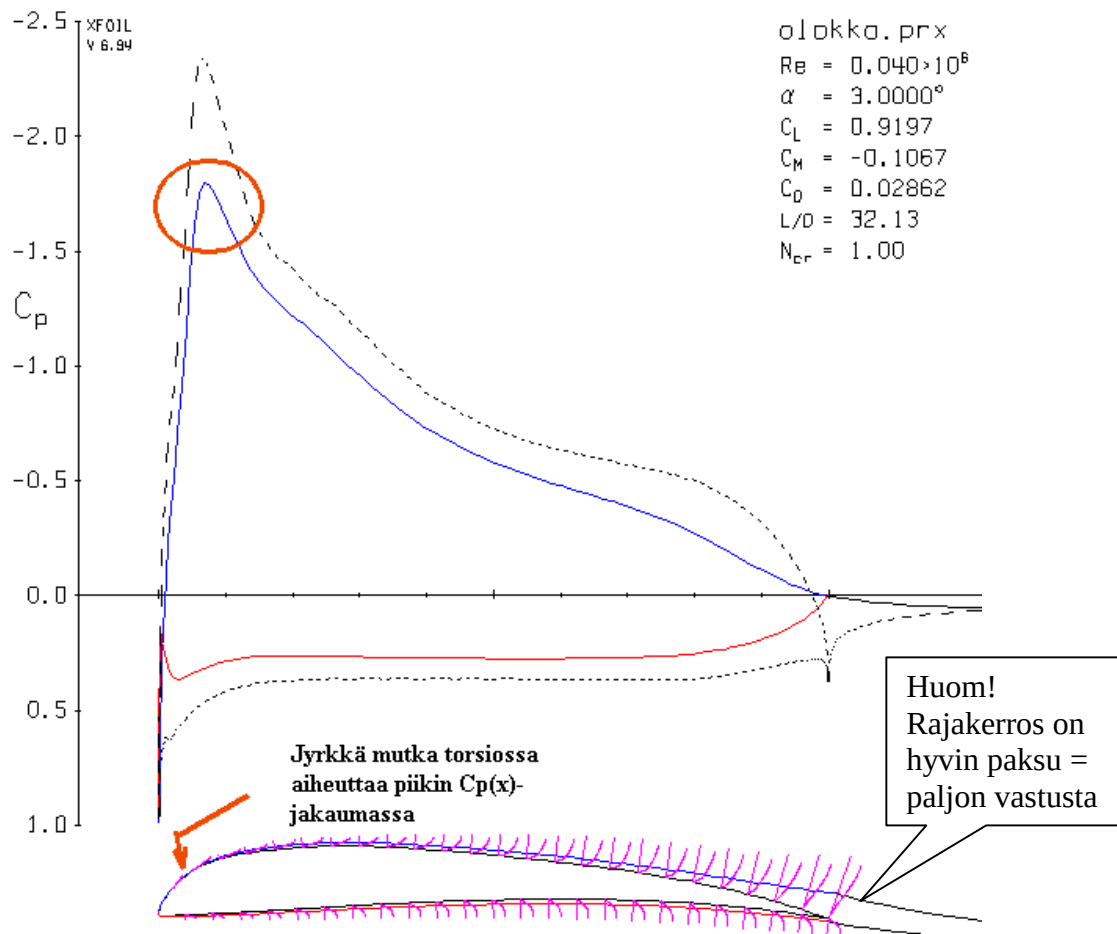


Figure 17 Kohtauskulma on kolme astetta. Painejakaumassa eli CP-jakaumassa on terävä piikki, joka aiheutuu torsioalueella olevasta voimakkaasta kaarevuudesta. Virtaus kiihtyy tällä alueella, jonka jälkeen se hidastuu koko loppumatkan. Jättöreuna-alueella on toinen samanlainen, liian jyrkkä mutka, joka aiheuttaa rajakerroksen nopean paksuuntumisen ja kohtauskulman kasvaessa irtautumisen. Alapinnalla ei enää ole kuplaa vaan virtaus käyttäytyy laminaarisesti jättöreunaan saakka.

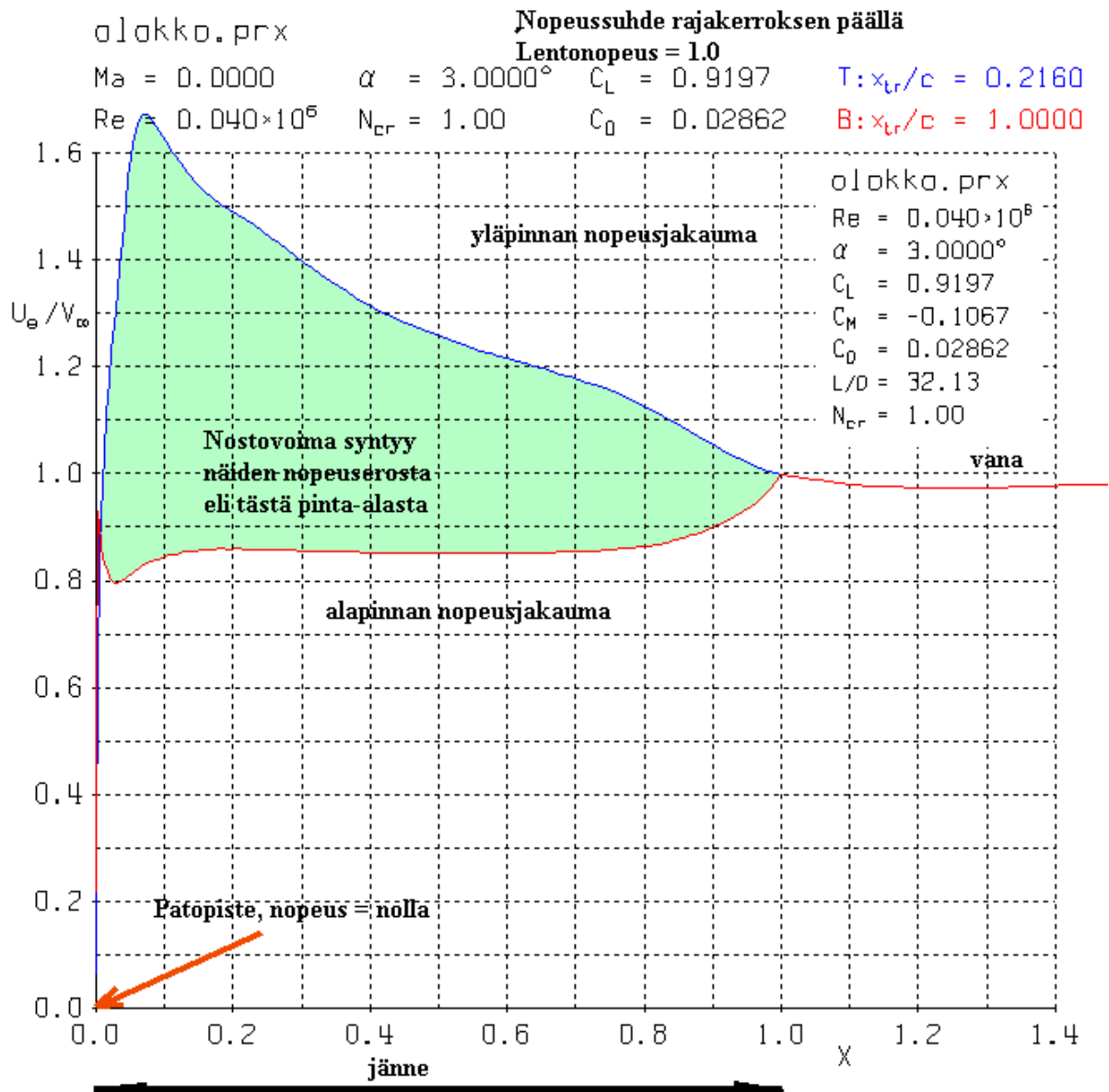


Figure 18 Tässä kuvassa on esitetty nopeusjakauma profiilin ylä- ja alapinnalta. Jakauman muoto on hyvin samankaltainen kuin painejakaumassa. Itseasiassa painejakauma saadaan nopeuseron neliöstä. Tässä on täsmälleen sama tilanne kuin kuvassa 17, esitystapa vain hieman toinen.

Profiilin suunnittelu lähtee siitä, että haetaan haluttua toimintaa varten siihen parhaiten sopiva nopeusjakauma, jossa otetaan huomioon myös rajakerroksen käyttäytyminen eri tilanteissa. Tästä jakaumasta lasketaan matemaattisesti takaperin, millainen profiili antaa halutun jakauman.

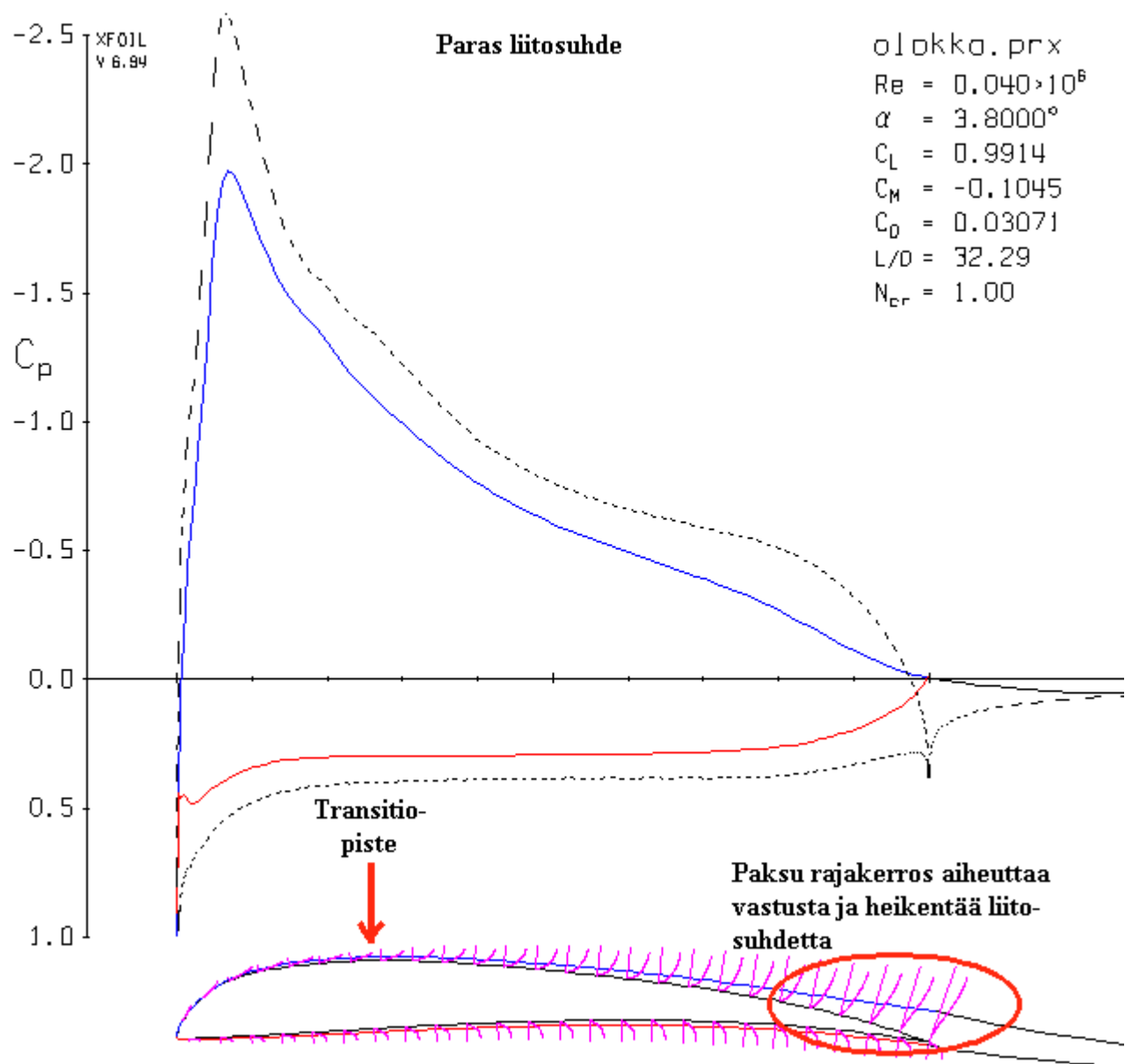


Figure 19 Paras liitosuhde saavutetaan, kun kohtauskulma $\alpha = 3.8^\circ$, jolloin $C_L = 0.9914$. Kuvassa esiintyvä transitiopiste osoittaa kohtaa, jossa laminaarinen virtaus muuttuu turbulenttiseksi.

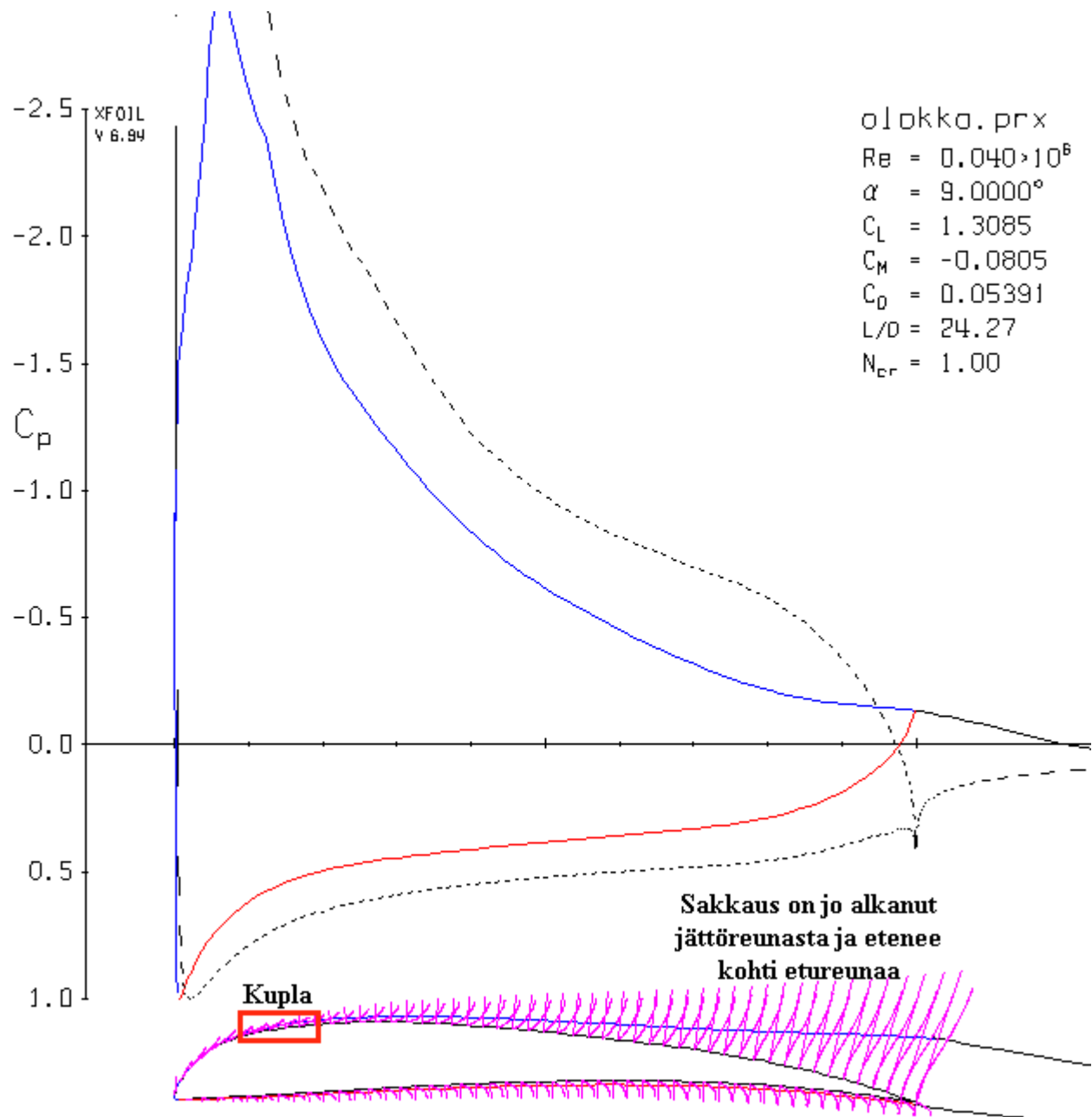


Figure 20 Kohtauskulmalla Alfa = 9° profiili on jo osasakkaustilassa. Torsion jyrkkä mutka aiheuttaa kuplan muodostusta, joka puolestaan lisää vastusta, mutta tällä kertaa sen keskeisin tehtävä on muuttaa virtaus turbulენტtiseksi ja tuoda paksumpaan rajakerrokseen energiaa, jonka avulla virtaus pysyy paremmin kiinni pinnassa ja siirtää sakkauksen alkamista myöhemmäksi. Tämä tekee myös profiilin käyttäytymisestä pehmeän, koska sakkaus tapahtuu pehmeästi. Virtaus irtaoo vähitellen takareunasta ja sitä enemmän mitä suurempi kohtauskulma. Tämä saattaa olla syy siihen, että pidät tätä profiilia hyvänä. Hintana on kuitenkin mielestäni surkeat nousuominaisuudet.

PERUSKYSYMYKS lienee, kuinka saadaan vastaavat pehmeät ominaisuudet profiilille, jolla on hyvät nousuominaisuudet.

Tämän kysymyksen vastauksessa on analysoitava niitä tarpeita, joita nousun aikana on. Mikä on nousukulma eli millä C_L -arvolla nousu tehdään. Mikä on nousunopeus suhteessa liidon aikaiseen vaakalentoonopeuteen. Paljonko potkurin veto ja vääntö aiheuttaa ongelmia ja ovatko ne

profiilin ominaisuuksille vaatimuksia aiheuttavia tekijöitä. Ennen näihin kysymyksiin syvällisempää paneutumista jatketaan hieman tähän hyväksi tunnettuun profiiliin syventymistä ja yritetään päätellä, miksi tämä on toimiva ja hyvä. Sen jälkeen yritetään säilyttää nämä hyvät ominaisuudet ja haetaan parannuksia sinne, missä ne parantavat profiilia entisestään. Hyvänä vertailuna olisi tietysti samanlainen vertailu Andrjukovin profiilista ja parista muusta hyväksi tunnetusta.

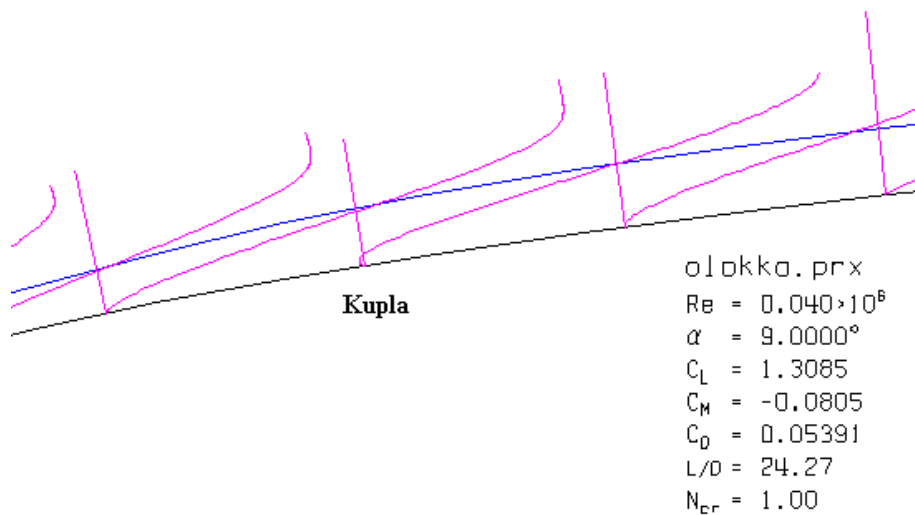


Figure 21 Edellisen kuvan kuplasta suurennos. Kuplan jälkeen virtaus tarttuu ensin kiinni laminaarisesti muuttuakseen välittömästi turbulenttiseksi. Turbulenssi lisää profiilin kitkavastusta, mutta estää sakkausta, jolloin kokonaisvastus jää pienemmäksi kuin ilman turbulenssia.

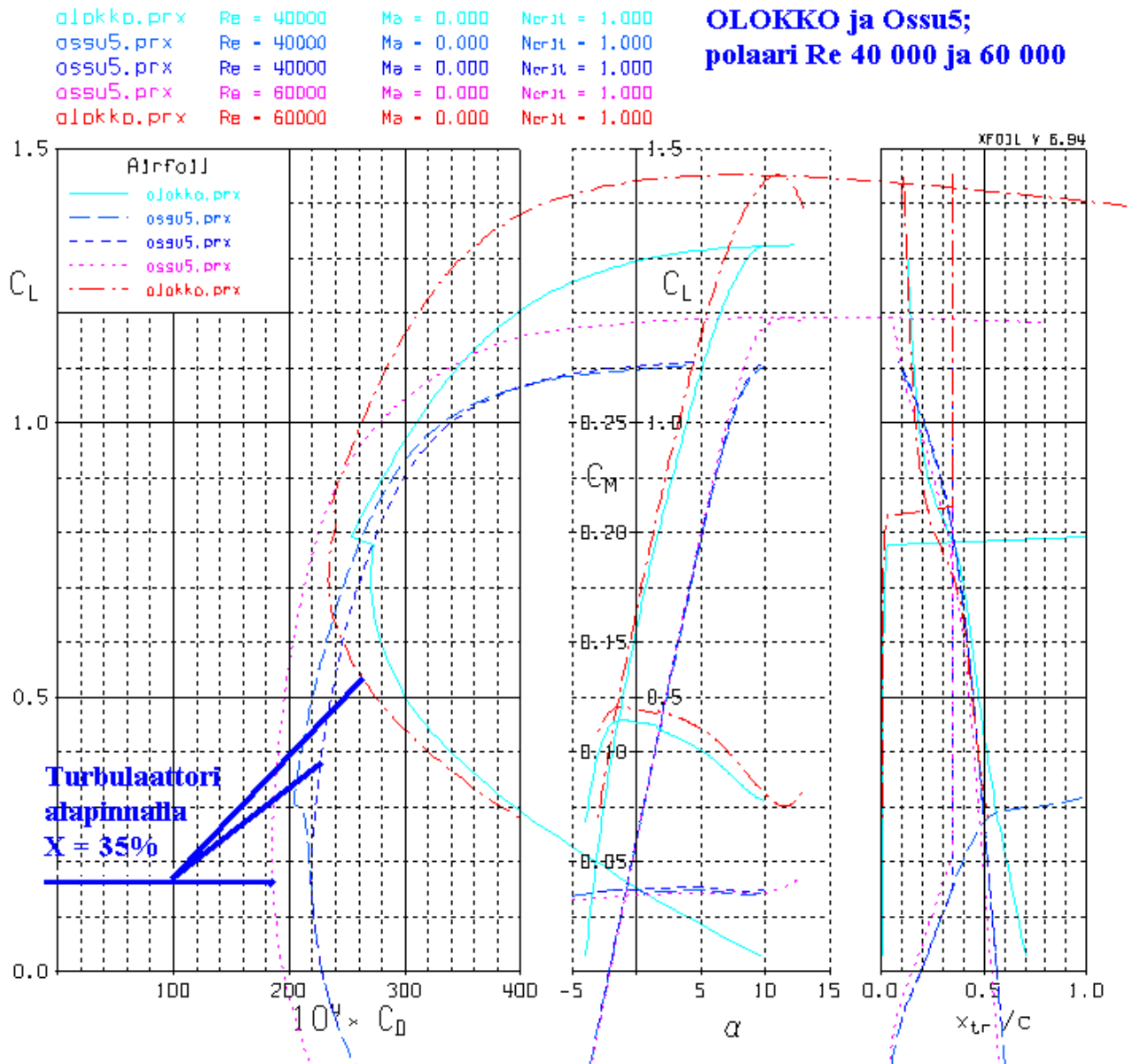


Figure 22 Olokon polaareja sekä parannetun profiilin "Ossu5.prx"-polaareja. Olokon profiilissa vastuksen kasvu pienellä kohtauskulmalla on huomattava. Profiililla on kuitenkin suuri C_{LMAX} , jota käsittääkseni ei erityisesti kuitenkaan tarvita. Olokon miellyttävä toiminta-alue on vain välillä $0.8 < CL < 1.2$, joka on erittäin suppea. Stabiliteteetin kannalta katsoisin, että jyrkät momenttikertoimen muutokset (keskimmäisen kuvan alemmat käyrät.) ovat vaikeita, koska momenttikerroin tulee vahvasti tilanneriippuvaiseksi. Momenttikerroin on myös hyvin suuri, suuruusluokkaa $CM = -0.13$

Turbulaattorin avulla myös Olokon polaarista saa poistettua "nokkaa". Turbulaattori on asetettu alapinnalle asemaan 35% etureunasta. Tämä on hyvä kompromissi. Vastus ei kasva kovin paljon, kun kohtauskulma on positiivinen, mutta profiili käyttäytyy juoheammin.

Vertailun vuoksi kuvassa on myös profiili, jonka kaarevuus on paljon pienempi kuin Olokossa, mikä pienentää momenttikertoimen tasolle $CM = -0.03$ eli neljäsnes siitä, mitä Olokossa. Momenttikerroin säilyy myös melkein vakiona koko toiminta-alueen, joka on nyt laajentunut käsittämään $0 < CL < 1.0$

Tällä profiililla voi nousulennossa käyttää mitä nopeutta tahansa, koska nopeuden lisääminen ei kasvata vastusta. Koska myös momenttikerroin säilyy lähes vakiona peräsinvoimat muuttuvat

johdonmukaisesti verrannollisena nopeuden neliöön kuten momenttikin. Tämän pitäisi parantaa trimmattavuutta, keventää peräsintä jne.
Olokkoa hieman pienempi C_{LMAX} ei pitäisi olla ongelma, koska muutaman prosentin lentonopeuden lisäys ajaa saman asian.

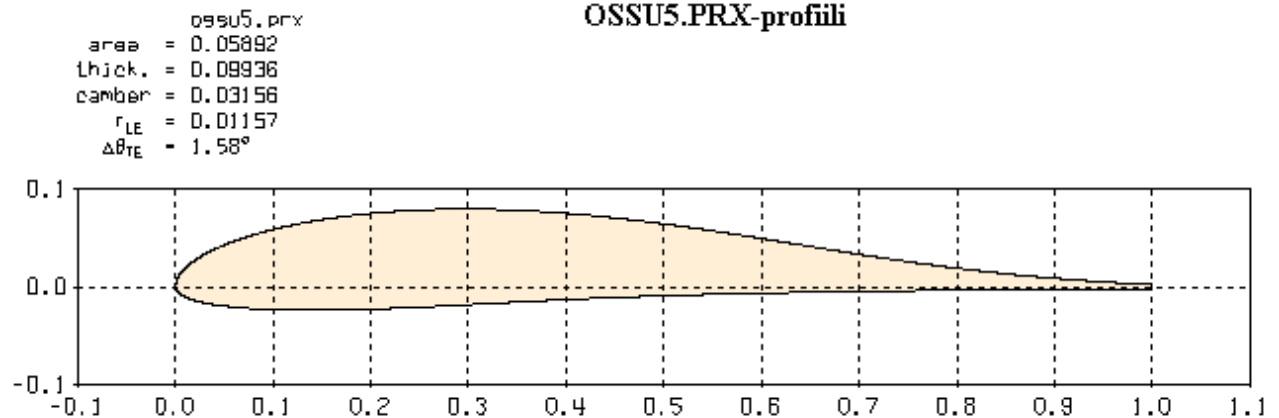


Figure 23 OSSU5.PRX-profiili, joka on kehitetty Re 40 000 alueelle. Tavoitteena on pieni CM-kerroin, juohea polaari sekä pieni vastus alhaisella nostovoimakertoimella. Polaari on esitetty kuvassa 22, kun

Re= 40 000 ja 60 000

OSSU5.PRX keskeiset ominaisuudet.

Paksuus 10%. Kaarevuus 3.1%. Jättöreunan paksuus 0.5%.

$C_{DMIN} = 0.00714$, kun $\alpha = 0.7^\circ$ ja $C_L = 0.318$ ja $C_M = -0.036$

$C_{LMAX} = 1.1$

Tämän artikkelin alkuosassa kehitetyt profiilit lähtivät ajatuksesta, ettei momenttikertoimella olisi väliä ja että suurta nostovoimakertoimista ihan oikeasti tarvittaisiin. OSSU5 puolestaan pyrkii mahdollisimman neutraaliin käyttäytymiseen koko alueella startista laskuun.

Seuraavassa kuvasarjassa on suoritettu vertailu Re 40k ja 60k alueilla edellä mainituille kolmelle eri profiilille:

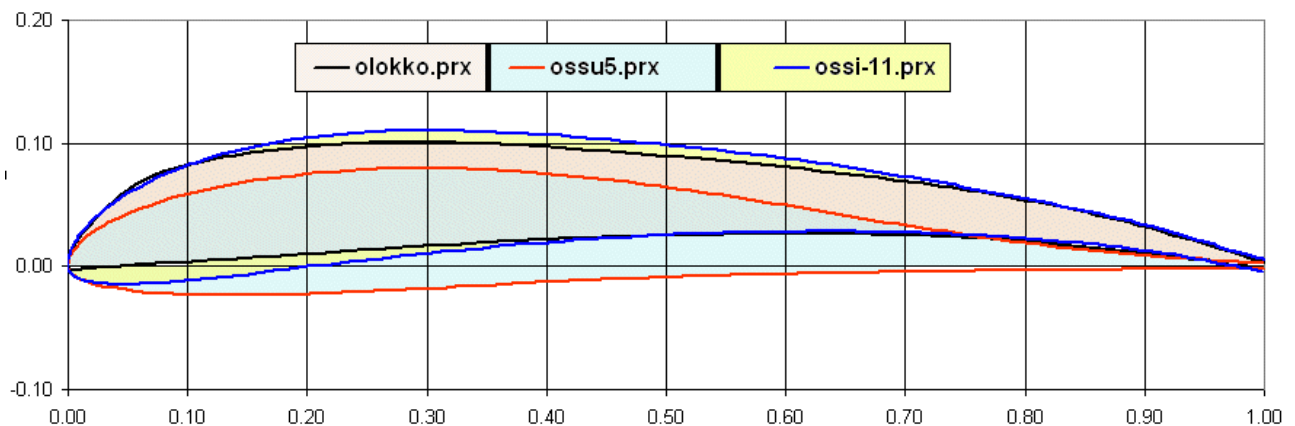


Figure 24 Profiilit perhekuvassa. Kun kuvan suurentaa tarpeeksi näkyy, miten oloikko puskee torsiossa kaikkia muita jyrkemmin 6% kohdalla.

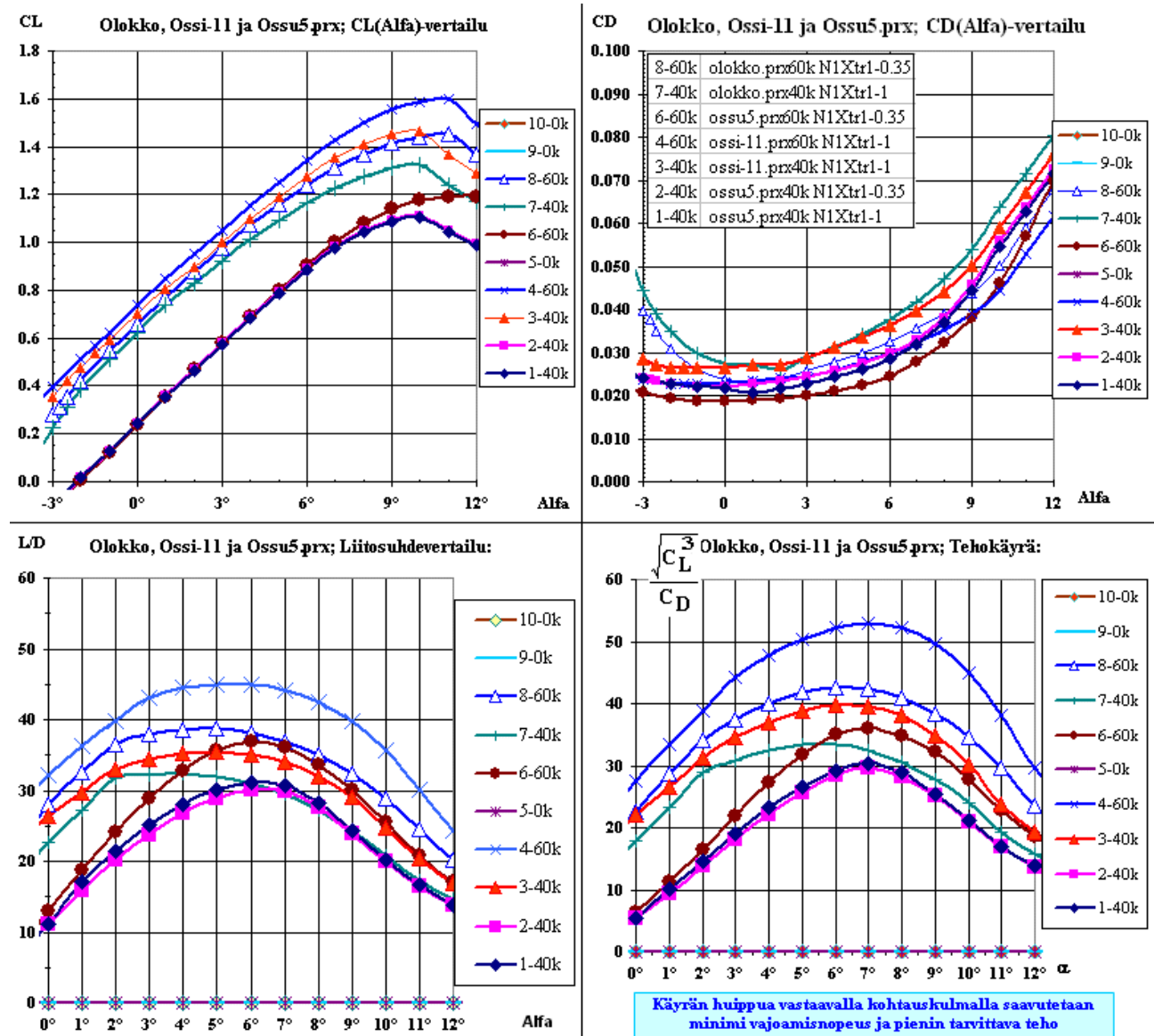


Figure 25 Kolmen profiilin suoritusarvojen vertailu. Merkinnoissä **1-40k ossu5.prx40k N1 Xtr-1** ensimmäinen numero 1 on profiilikäyrän järjestysnumero, 40k viittaa Re-lukuun 40 000. Sitten seuraa profiilin nimitys ja Re-luku, N1 viittaa turbulenssiasteeseen ja Xtr-1 turbulaattoriin.

Turbulaattorin paikka käy ilmi profiilimerkinnoistä siten, että Xtr-0.35-0.65 esimerkiksi tarkoittaa, että yläpinnalla kohdassa 35% jäniteestä on turbulaattori ja seuraava lukusarja vastaavaa alapinnan paikkaa. Ellei turbulaattoria ole, merkintä on Xtr-1. Jos turbulaattori on vain alapinnalla, merkintä on Xtr-1-0.35.

Olokko erottuu kuvan 25 käyrien liitosuhde ja tehokäyristä siinä, että etenkin Re40k alueella (käyrä 7) käyrän laki on lähes tasainen välillä 2° - 6°. Tällä saattaa olla merkitystä profiilin hyvien ominaisuuksien kannalta. Ainakin se on selkeä ero muihin. Profiileista Ossi-11 on ehdottomasti teholtaan ja liitosuhteeltaan paras ja Olokko tulee seuraavana. Vastuskäyrässä Olokko erottuu alennolla-kohtauskulmalla voimakkaasta vastuksen kasvusta. Sen vastus on myös yli 6° kohtauskulmalla muita suurempi.

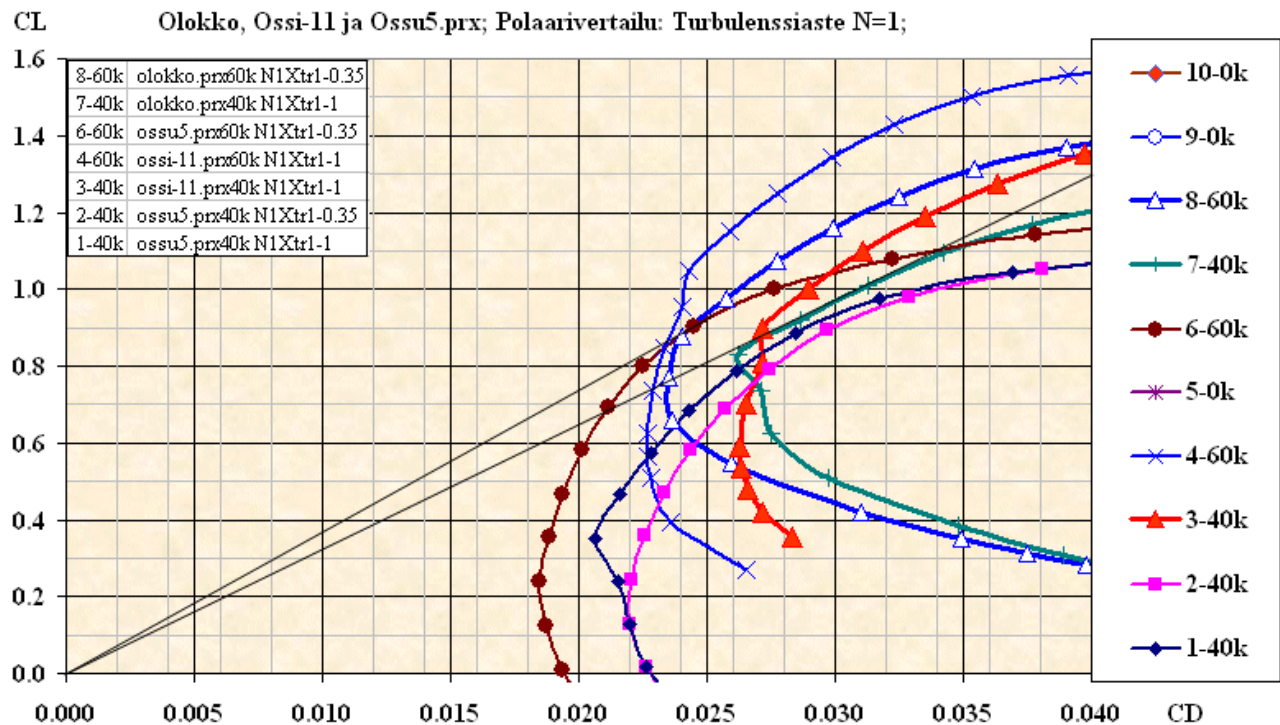


Figure 26 Polaarivertailu on aina havainnollinen työkalu profiilien vertailussa. Tämä tukee käsitystä, että Olokko on hyvä hyvin kapealla toiminta-alueella, joka vastaa varsinaista lento-osuutta. Nousun aikana tarvittaisiin aivan erilaisia ominaisuuksia, joita löytyy Ossu5-profiilista, jonka vastus alhaisilla CL-arvoilla on muita selvästi pienempi. Sekä Ossi-11:n että Ossu5:n toiminta-alue on huomattavasti laajempi, kuin Olokolla. Tämä ei voine olla profiilin lennettävyyttä heikentävä tekijä.

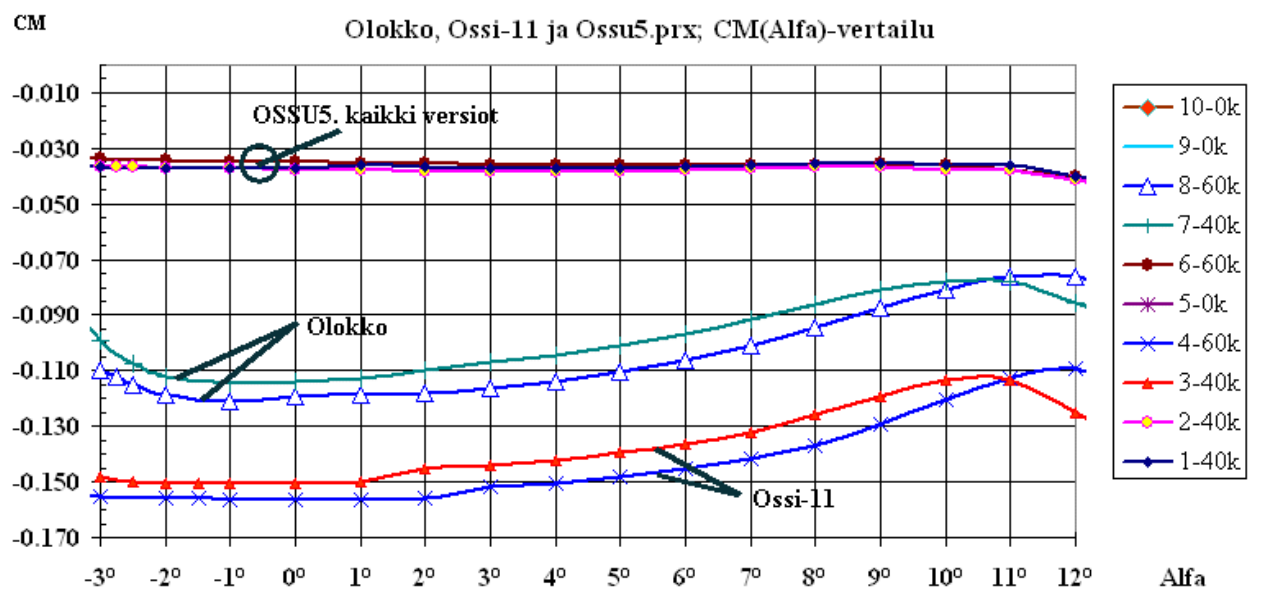


Figure 27 Tästä kuvasta käy selkeimmin ilmi, miksi Ossu5-profiilia kannattaa harkita. Sen momenttikerroin on vakio koko toiminta-alueella eikä näy muuttuvan edes Re-luvun vaikutuksesta. Koneen trimmaamisen kannalta tällainen ominaisuus on varmasti miellyttävä sillä se antaa hyvin johdonmukaisen käyttäytymisen. Kun momenttikerroin on alhainen, peräsinvoimat ovat pienet.

Uskoisin, että paras vaihtoehto löytyy hakemalla oikea kombinaatio, jossa momenttikerroin on mahdollisimman tasainen ja riittävän alhainen. Tehokkuutta ja liitosuhdetta voidaan nostaa

lisäämällä profiilin kaarevuutta. Tällöin momenttikerroin kasvaa väistämättä ja asettaa jossain vaiheessa rajan maksimi kaarevuudelle.

Andrjukovin profiilit

WAKE-maailman huoippunimi, Andrjukov käyttää WAKEssaan kolmea profiilia, jotka vaihtuvat tyvessä, niksauksessa ja kärjessä. Profiilit on merkitty tässä esityksessä seuraavin tunnuksin, jotka viittaavat käytetyn laskentatiedoston koordinaatteihin. Seuraavassa on kerätty koordinaatit taulukkoon.

Andrjukovin WAKE-profiilit					
aaroot.prx		aamid.prx		aatip.prx	
1.00000	0.00250	1.00000	0.00250	1.00000	0.00250
0.95988	0.01339	0.96447	0.01132	0.94683	0.01154
0.90258	0.02617	0.90992	0.02294	0.88833	0.01979
0.80183	0.04408	0.80734	0.03970	0.79321	0.03024
0.69920	0.05773	0.70170	0.05248	0.69702	0.03843
0.59525	0.06878	0.59502	0.06254	0.60055	0.04519
0.50425	0.07623	0.50149	0.06924	0.51607	0.04987
0.40051	0.08212	0.39513	0.07418	0.41958	0.05379
0.29894	0.08363	0.29048	0.07494	0.32381	0.05549
0.20035	0.07792	0.18892	0.06944	0.22922	0.05349
0.15289	0.07152	0.14040	0.06357	0.18254	0.05056
0.09678	0.05945	0.08487	0.05233	0.12551	0.04452
0.05735	0.04634	0.04817	0.04029	0.08169	0.03698
0.02795	0.03175	0.02392	0.02832	0.04162	0.02666
0.01481	0.02248	0.01332	0.02072	0.01990	0.01838
0.00723	0.01521	0.00670	0.01435	0.00862	0.01198
0.00293	0.00922	0.00267	0.00881	0.00301	0.00695
0.00064	0.00414	0.00054	0.00382	0.00041	0.00256
0.00002	-0.00029	0.00002	-0.00070	0.00015	-0.00143
0.00137	-0.00443	0.00131	-0.00500	0.00265	-0.00493
0.00517	-0.00767	0.00486	-0.00855	0.00788	-0.00743
0.01110	-0.00968	0.01037	-0.01095	0.01692	-0.00887
0.02375	-0.01030	0.02136	-0.01223	0.04477	-0.00812
0.05004	-0.00764	0.04137	-0.01058	0.09109	-0.00449
0.11078	0.00040	0.09641	-0.00382	0.15146	0.00057
0.15006	0.00545	0.13647	0.00115	0.18759	0.00335
0.20236	0.01193	0.18984	0.00738	0.23586	0.00673
0.30582	0.02296	0.29637	0.01785	0.33249	0.01253
0.40894	0.03027	0.40216	0.02488	0.42891	0.01679
0.49955	0.03370	0.49522	0.02822	0.51312	0.01889
0.60314	0.03430	0.60126	0.02867	0.60936	0.01924
0.70654	0.03126	0.70743	0.02543	0.70552	0.01739
0.80907	0.02424	0.81338	0.01871	0.80152	0.01317
0.91004	0.01226	0.91828	0.00822	0.89756	0.00661
0.95764	0.00474	0.96311	0.00259	0.94544	0.00261
0.98887	-0.00055	0.98929	-0.00098	0.98835	-0.00136
1.00004	-0.00250	1.00000	-0.00250	1.00000	-0.00250

Taulukko , Andrjukovin WAKE-profiilit.

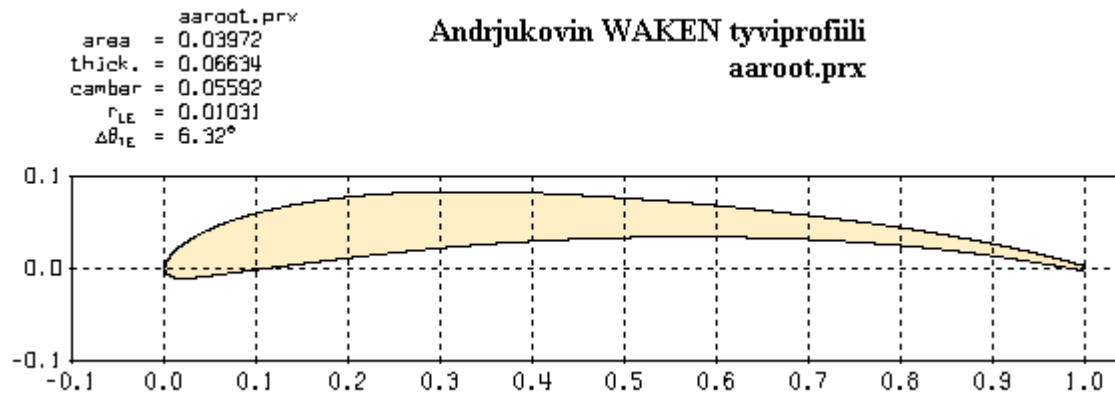


Figure 28 Andrjukovin tyviprofiili. Paksuus = 6,634% ja kaarevuus = 5,592%.

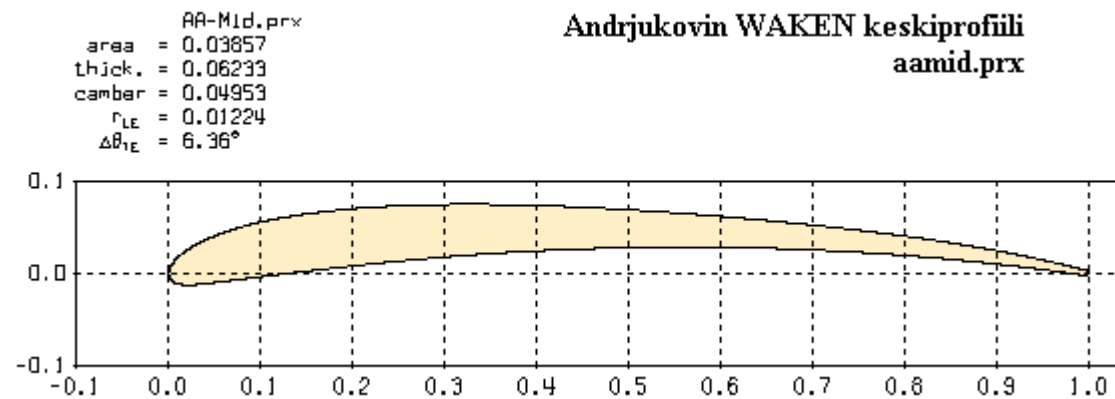


Figure 29 Andrjukovin keskiprofiili. Paksuus = 6,233 % ja kaarevuus = 4,953%.

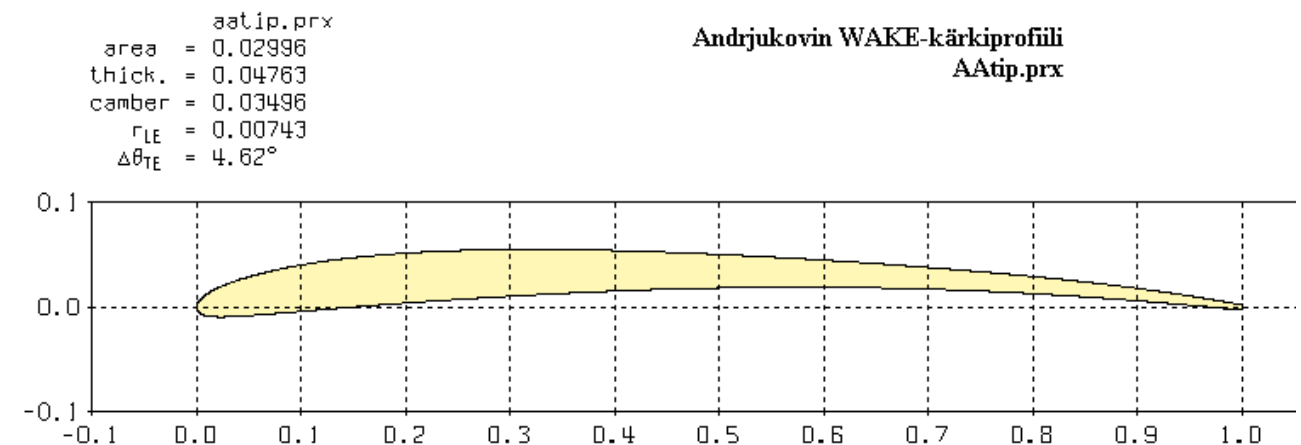


Figure 30 Andrjukovin kärkiprofiili. Paksuus = 4,763 % ja kaarevuus = 3,496%.

Rakenteelliset syyt puoltavat paksumman profiilin käyttöä tyvässä. Nostovoiman jakauman ja kärkisakkauksen vuoksi on valittava kärkiprofiili ja sen haritus huolella ja testattava käytännössä. Seuraavassa kuvassa on esitetty kaikki profiilit päällekkäin. Y-akselia on liioiteltu, jotta erot näkyisivät selvemmin.

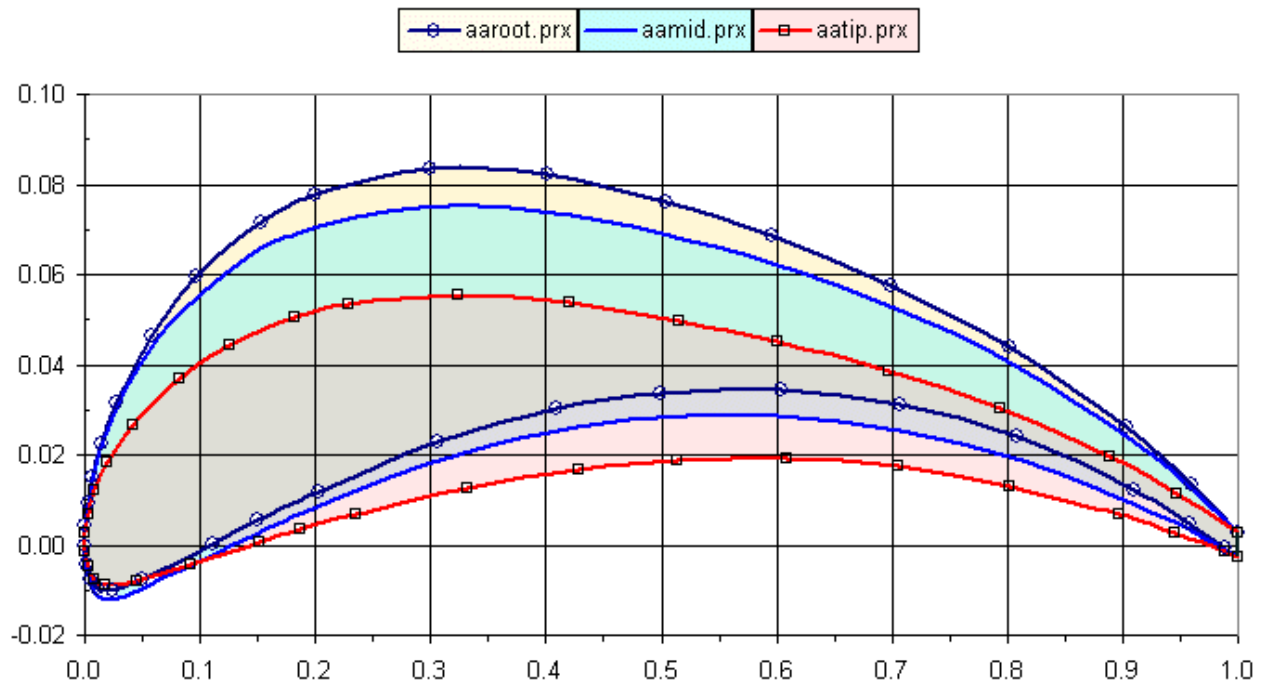


Figure 31 Andriukovin profiilit vertailussa. Y-akseli on liioiteltu.

Seuraavaksi tarkastellaan kunkin profiilin ominaisuuksia ja toivottavasti siitä oppii jotain.

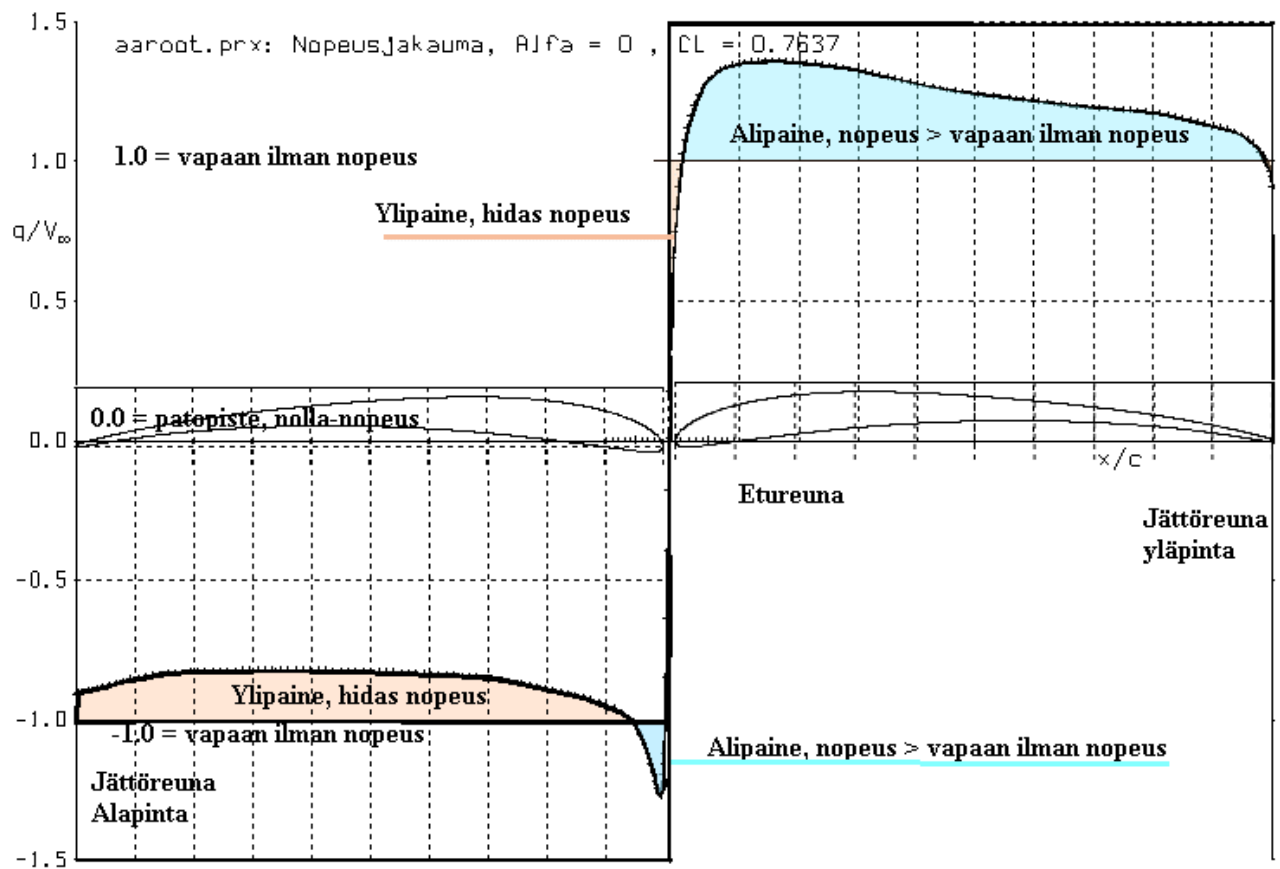


Figure 32 Aaroot.prx-profiilin nopeusjakauma, kun kohtauskulma = 0 ja nostovoimakertoimen = 0,7637.

Ensimmäinen arvio ominaisuuksista voidaan tehdä polaarin avulla. Seuraavassa kuvassa on laskettu polaarit alueelle $Re = 20\,000 - 200\,000$. Turbulenssiaste $N = 1$. Etureunan alapuolella on turbulaattori asemassa 3% eli mahdollisimman edessä. Turbulaattorin tehtävänä on estää polaariin muodostuvan nokan eli epäjatkuvuuskohdan syntyminen. Nokka syntyy, kun pienellä kohtauskulma etureunan alle syntyy kupla, joka muuttaa virtauksen mielestä profiilin muotoa paksummaksi. Tämä parantaa kyllä nostovoimaa ja kuplan jälkeinen turbulenssi pienentää vastusta. Hintana on kuitenkin stabiliteetin kannalta epämiellyttävä loikkaus aina, kun kriittinen kohtauskulma on ylitetty tai se alitetaan.

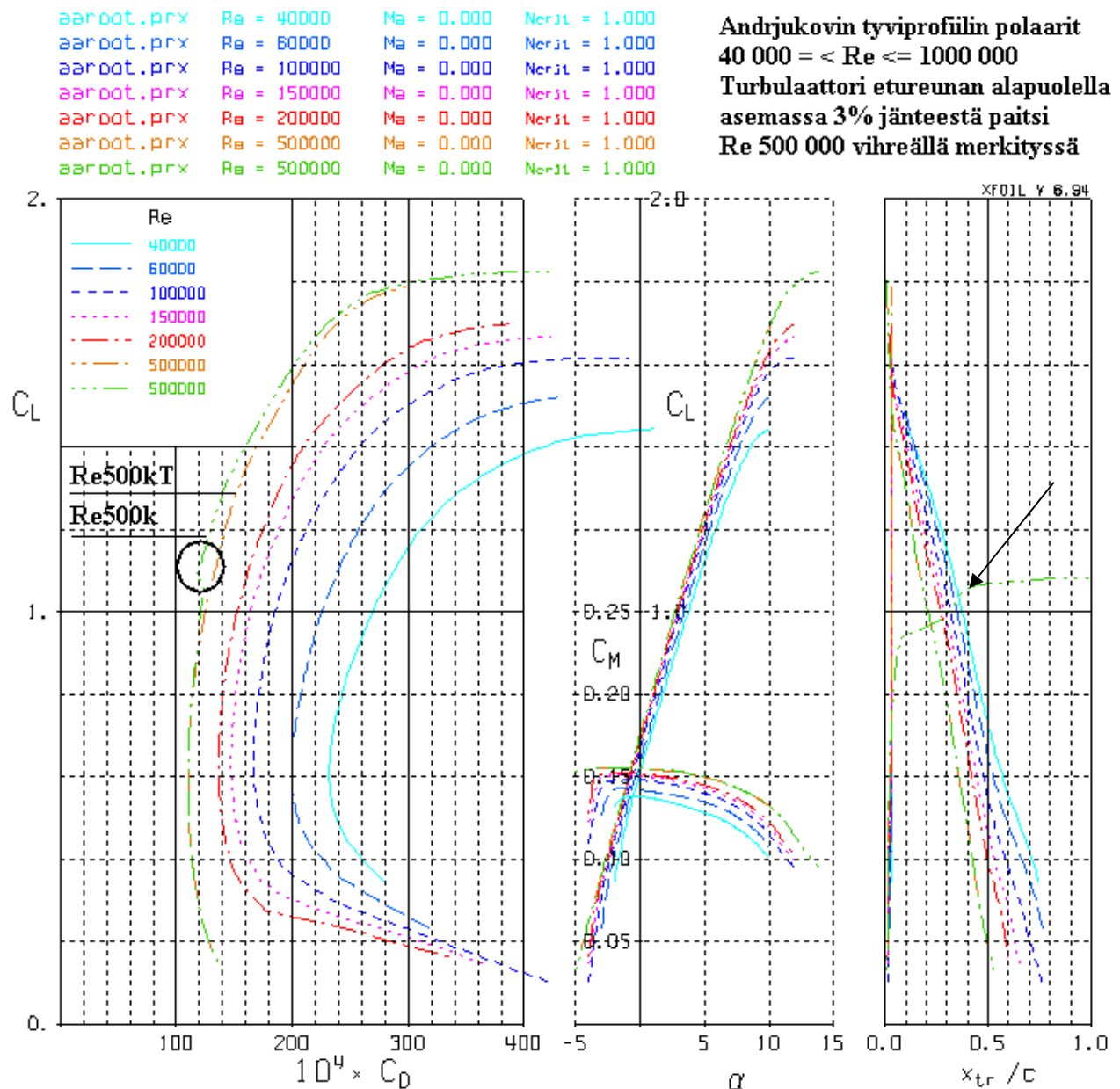


Figure 33 Andrjukovin tyviprofiilin polaarit.

Turbulaattorin avulla kuvan 33 käyrät ovat kauniin tasaisia. Momenttikäyrä osoittaa voimakasta kohtauskulmariippuvuutta ja kohtuullista Re -riippuvuutta. Molemmat ovat kuitenkin hyvin johdonmukaisia, joten korkeusperäsimen toimintaehdot on helppo täyttää. $Re\ 500\,000$:lle on laskettu käyrä sekä turbulaattorilla että ilman. Ympyrällä on merkitty nokan kohta, joka syntyy $CL = 1.1$ eli erittäin pahalla kohdalla ajatellen lentotehtävää. Syntyyn vaikuttava tekijä näkyy

oikeanpuoleisesta ruudusta, jossa on ylä- ja alapinnan transitiopisteen riippuvuus CL:stä. Nuoli osoittaa ilman turbulaattoria olevaa alapinnan transitiokäyrää. Alle $CL=0,95$ transitiopiste on hyvin lähellä etureunaa, josta se siirtyy nopeasti jättöreunaan, kun nostovoimakertoimen kasvaa 1,05:een. Tämä osoittaa selvästi, että *alapinnalla tarvitaan turbulaattori*. Samassa oikeanpuoleisessa kuvassa on vasemmalta ylhäältä alkava viuhka, joka esittää yläpinnan transitiopisteen liikkumista nostovoimakertoimen ja Re-luvun muuttuessa. Tämä käyttäytyminen on hyvin johdomukaista ja osoittaa, että *yläpinnalla ei tarvita turbulaattoria*.

Keskiprofiili, "aamid.prx"

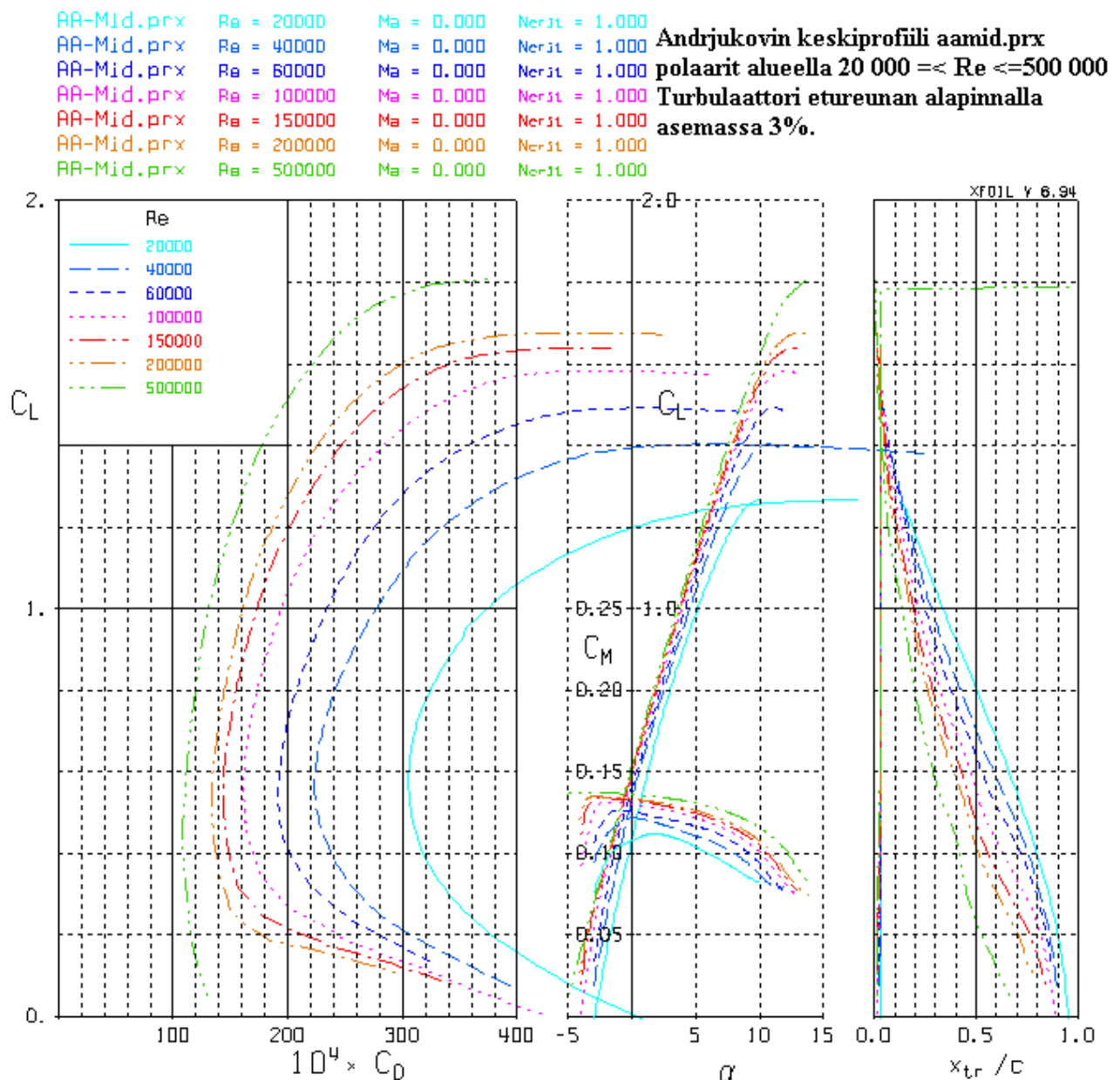


Figure 34 Andrjukovin keskiprofiilin polaarit alueella 20 000 =< Re <= 500 000. Kaikki polaarit on laskettu turbulaattorin kanssa. Turbulaattori on etureunasta 3% ja vain alapinnalla. Yläpinta ei tarvitse turbulaattoria.

Mitään uutta, jota en aiemmin olisi jo maininnut, ei näistä käyristä tule mieleen.

Kärkiprofiili, "aatip.prx"

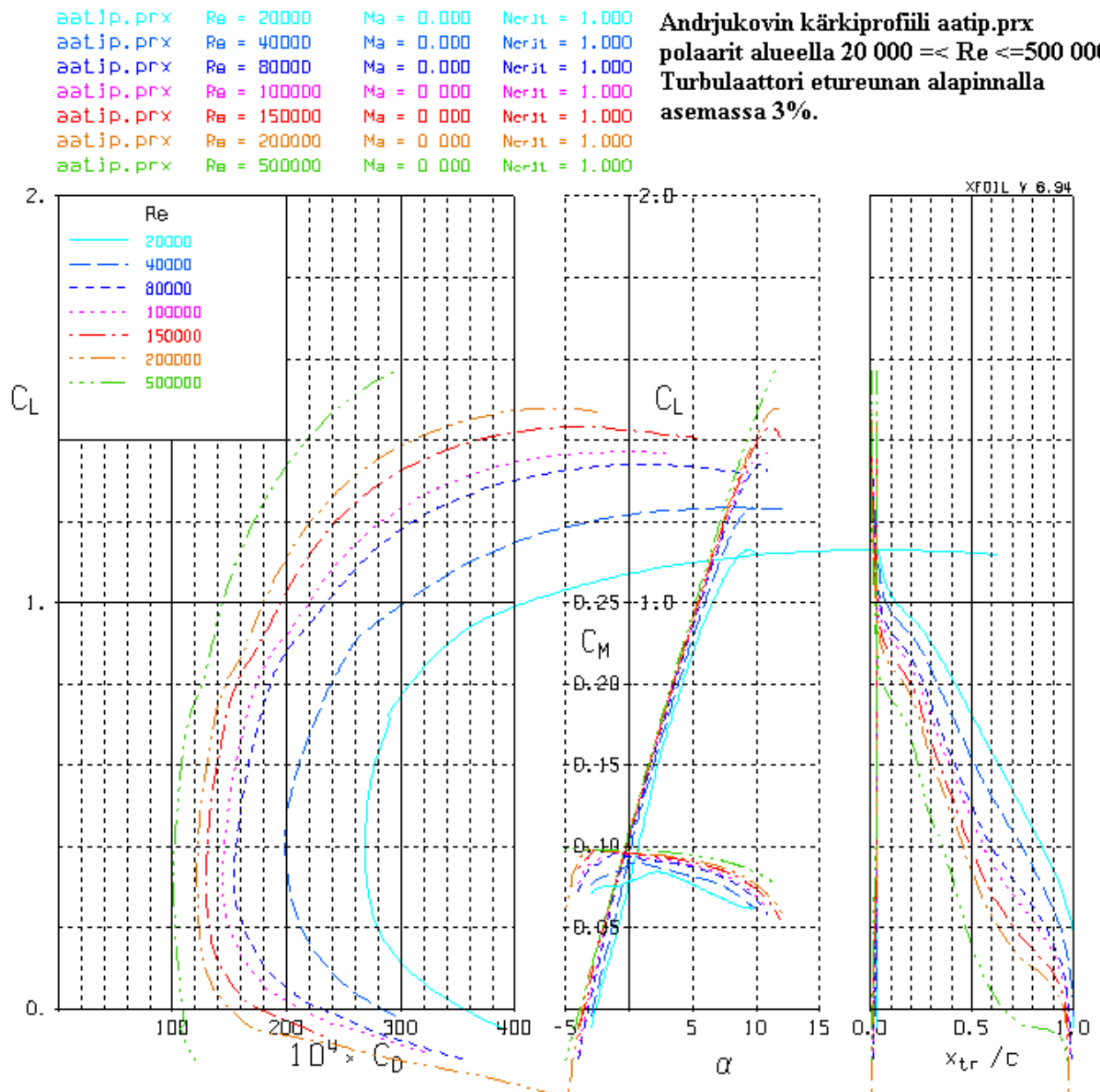


Figure 35 Andrjukovin kärkiprofiili, aatip.prx. Profiilin ohuudesta johten sen toiminta-alue on selvästi pienempi, kuin edellisten.

Kärkiprofiilina on hyvin ohut ja lievästi kaareva profiili. Kuva 35:n oikeanpuoleisesta kuvaajasta nähdään, ettei yläpinnan transitio käyttyä yhtä lineaarisesti kuin kahdella edellisellä profiililla. Myös momenttikäyrissä alin eli $Re\ 20\,000$ osoittaa erilaista momentin vaihtelua kohtauskulman muuttuessa kuin muut saman profiilin käyrät suuremmilla e -luvuilla. Koska kärjessä Re -luku on muutenkin pienempi kuin keskellä ja tyvessä, on kärjen mahdollista joutua tälle Re -alueelle. On myös huomattava, että lentonopeuden hidastuessa Re -luku pienenee ja siitä aiheutuu ominaisuuksien muutoksia kuten C_{Lstall} pieneneminen, momentin muutos jne. Näillä muutoksilla on merkittävä vaikutus, ei vain dynaamiseen vaan jopa staattiseen vakavuuteen.

Suoritusarvovertailu Re -alueella $20\,000 \leq Re \leq 500\,000$

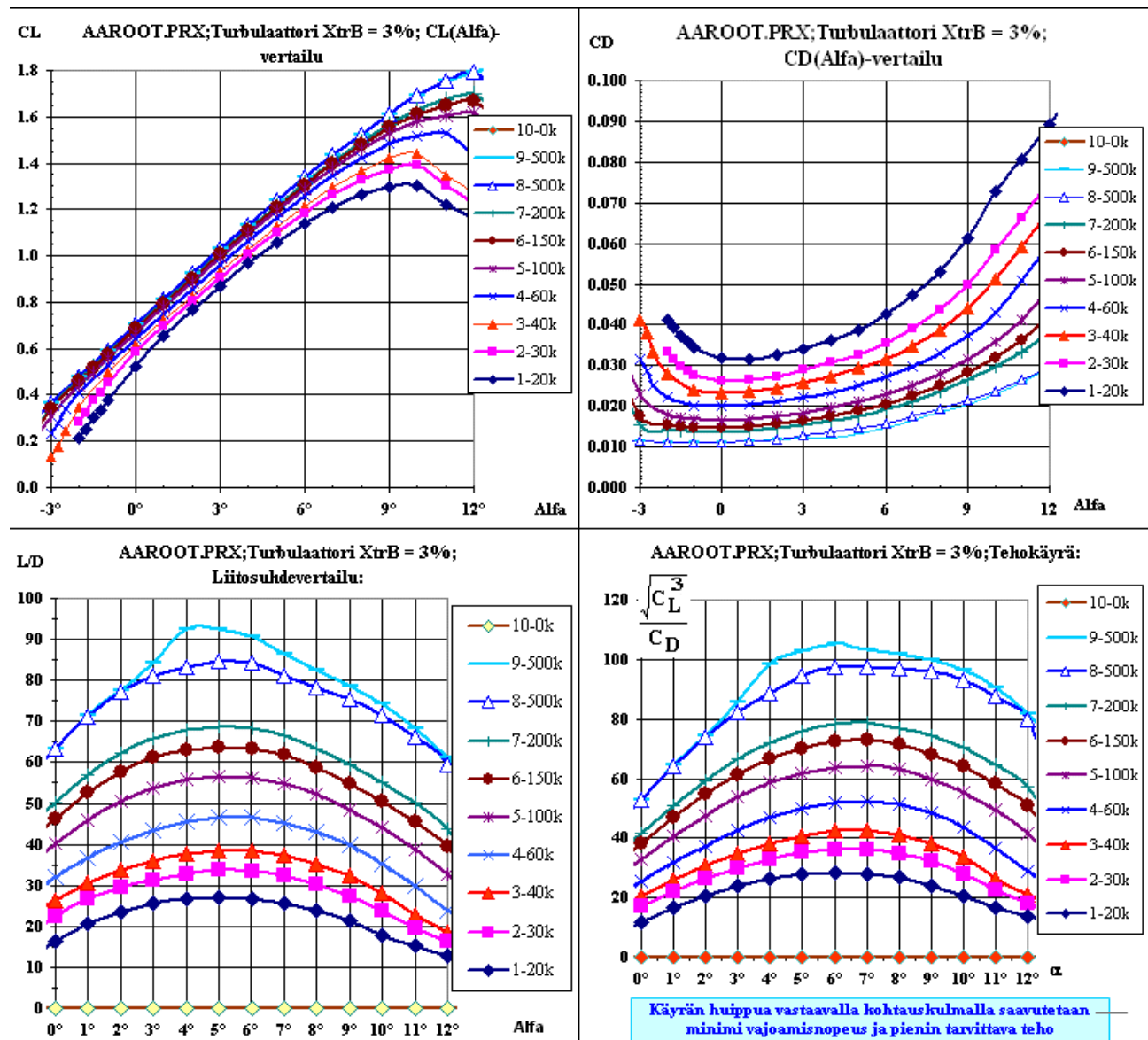


Figure 36 Andrjukovin tyviprofiilin suoritusarvot.

Käyrä 9-500k on paljaalle profiililla mutta kaikissa muissa on turbulaattori etureunan alapinnalla asemassa 3%. Suoritusarvojen kannalta paljas profiili olisi hyvä, mutta stabiileetin kannalta käyttäytymien tulee epäjohtonmukaiseksi ja vaikeasti hallittavaksi.

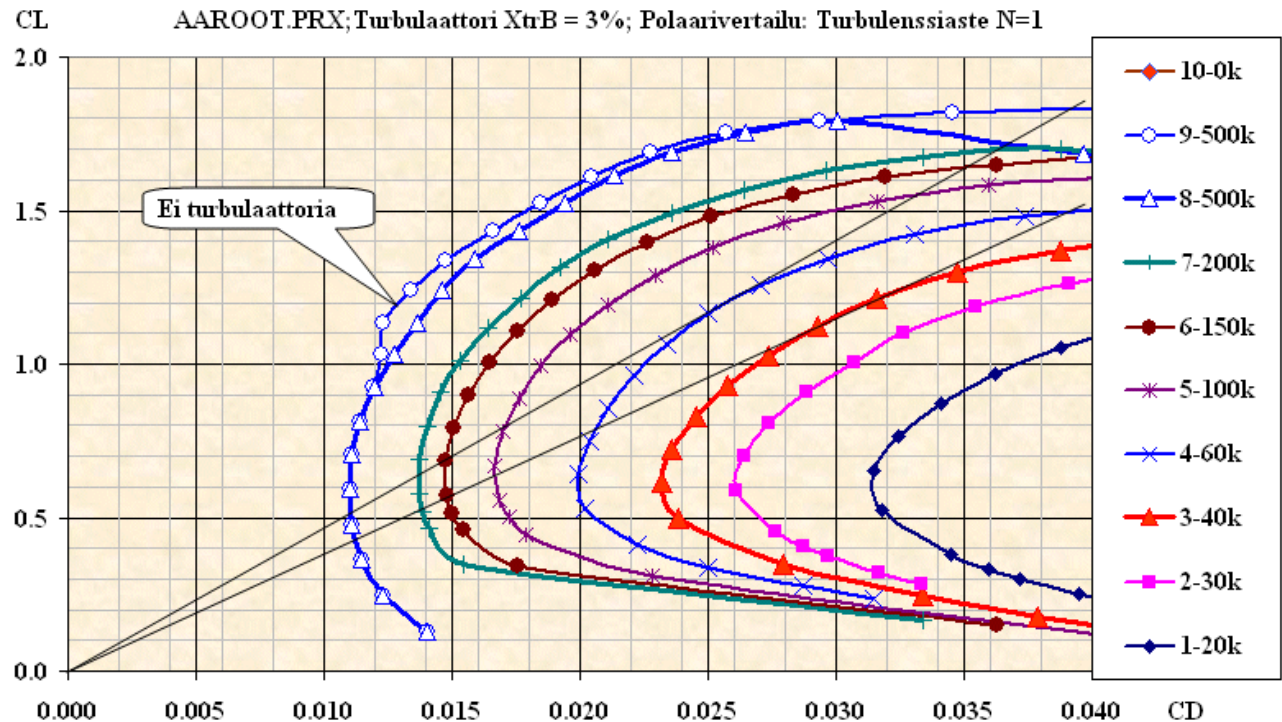


Figure 37 Andriukovin tyviprofiilin polaarit. Pienin vastus on CL alueella 0,6 -0,7. Tämä on nousun kannalta kohtuullisen hyvä valinta. Ilman turbulaattoria polaarin nokka sattuu lähelle parasta liitosuhdetta ja tehoa parantaen kumpaakin.

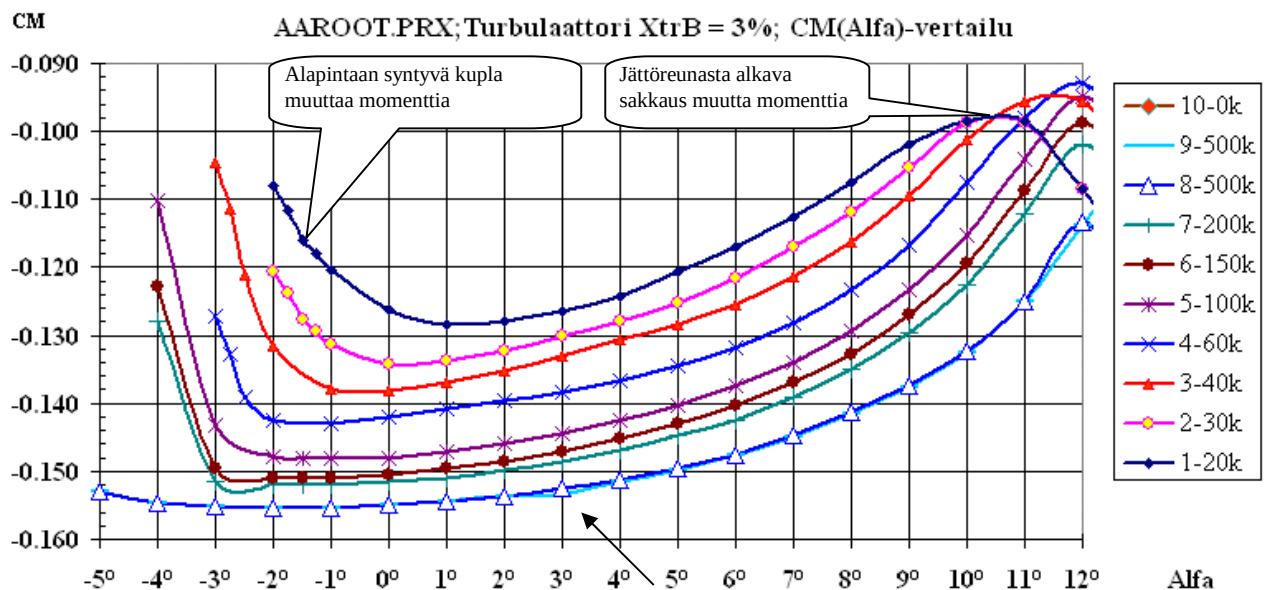


Figure 38 Andriukovin tyviprofiilin momenttikäyrät. Momentissa on melko voimakas muutos juuri nousualueella - $2^\circ < \text{Alfa} < 2^\circ$. Merkille pantavaa on kuitenkin, että käyrä 9-500k ja 8-500k (turbulaattorilla) ovat lähes identtiset. Ainoa ero on 3° kohdalla ja sekin vain hädin tuskin havaittavissa. Tässä tapauksessa turbulaattoria ei tarvittaisi, mikäli profiilia käytettäisiin vain $\text{Re} > 500\text{k}$ alueella. Havainto on mielenkiintoinen ja testattaessa hyvä pitää mielessä, että tällaisinkin saattaa esiintyä. Syytä ei aerodynmiikkaa kutsuta mystiikaksi.

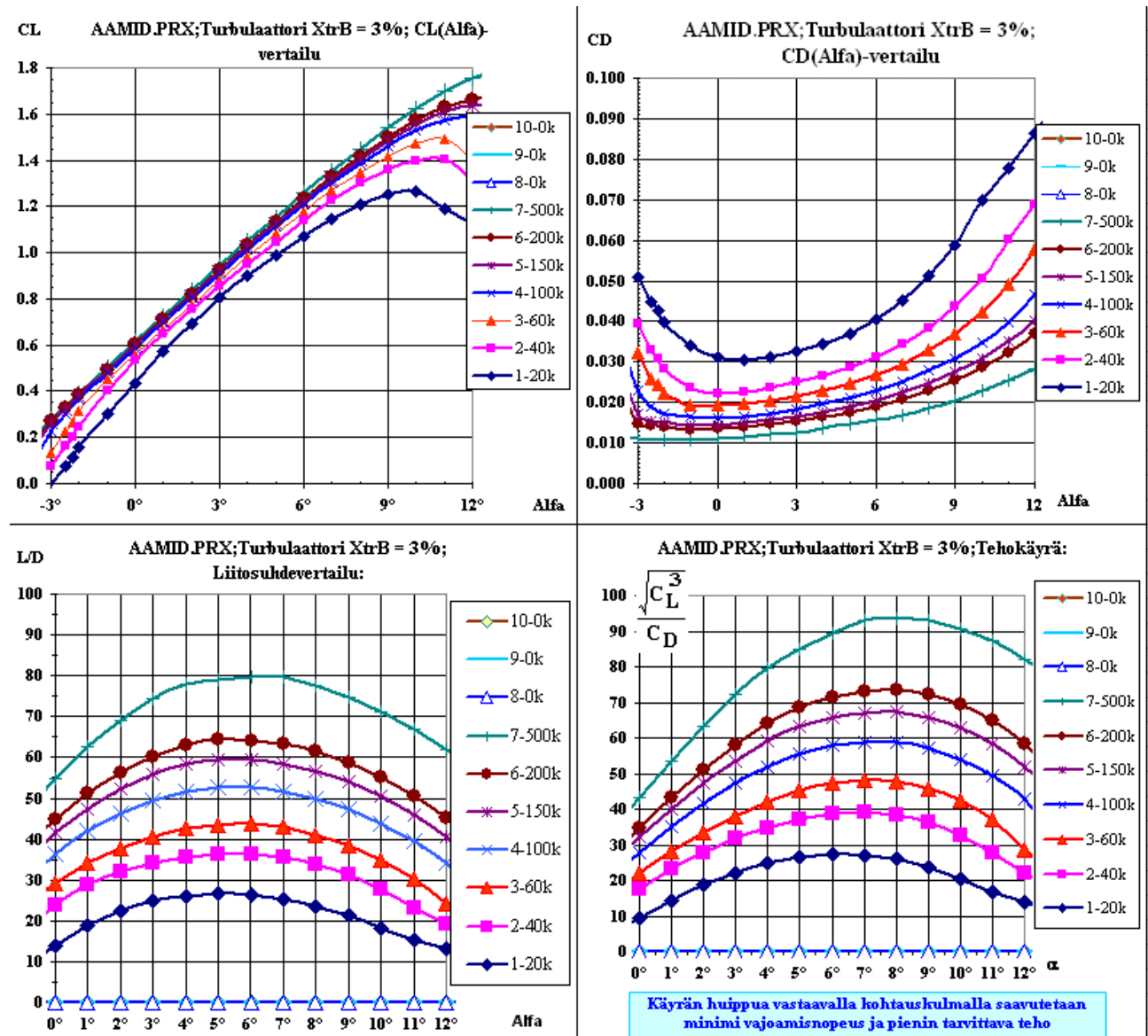


Figure 39 Andrjukovin keskiprofiilin suoritusarvot. Kaikki käyrät turbulaattorilla, joka on etureunan alapuolella asemassa 3%. Huomaa, että paras teho eli pienin vajoamisnopeus saavutetaan noin yhtä astetta suuremmalla kohtauskulmalla kuin paras liitosuhde. Kummankin optimiarvo vaeltelee hieman Re-luvun muuttuessa.

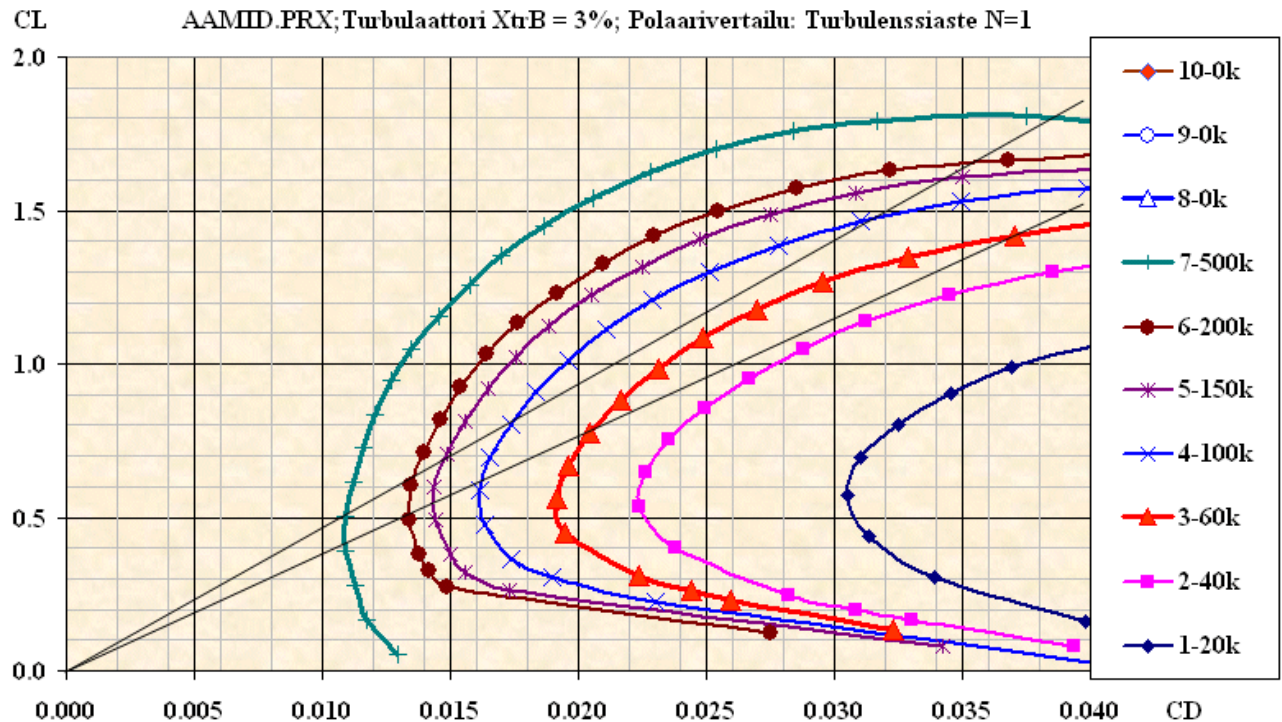


Figure 40 Andrjukovin keskiprofiilin polaarit. Kaikki käyrät turbulaattorilla, joka on etureunan alapuolella asemassa 3%. Tyviprofiiliin verrattuna pienimmän vastuksen alue on CL:n kymmenystä pienempi kuin tyvessä.

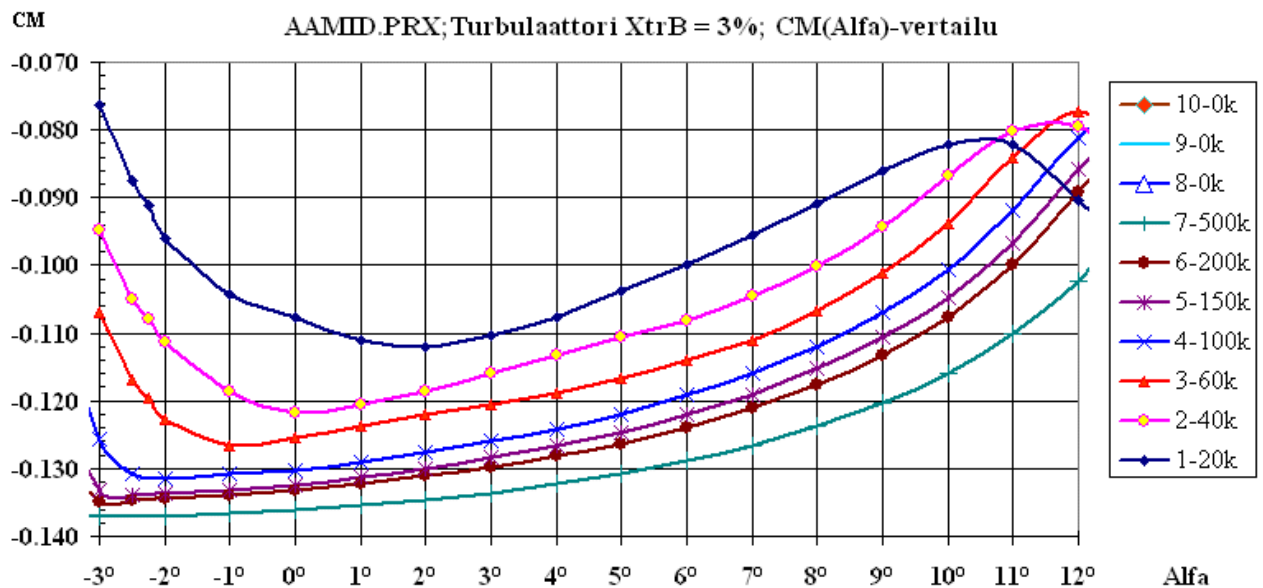


Figure 41 Andrjukovin keskiprofiilin momenttikäyrät. Kaikki käyrät turbulaattorilla, joka on etureunan alapuolella asemassa 3%.

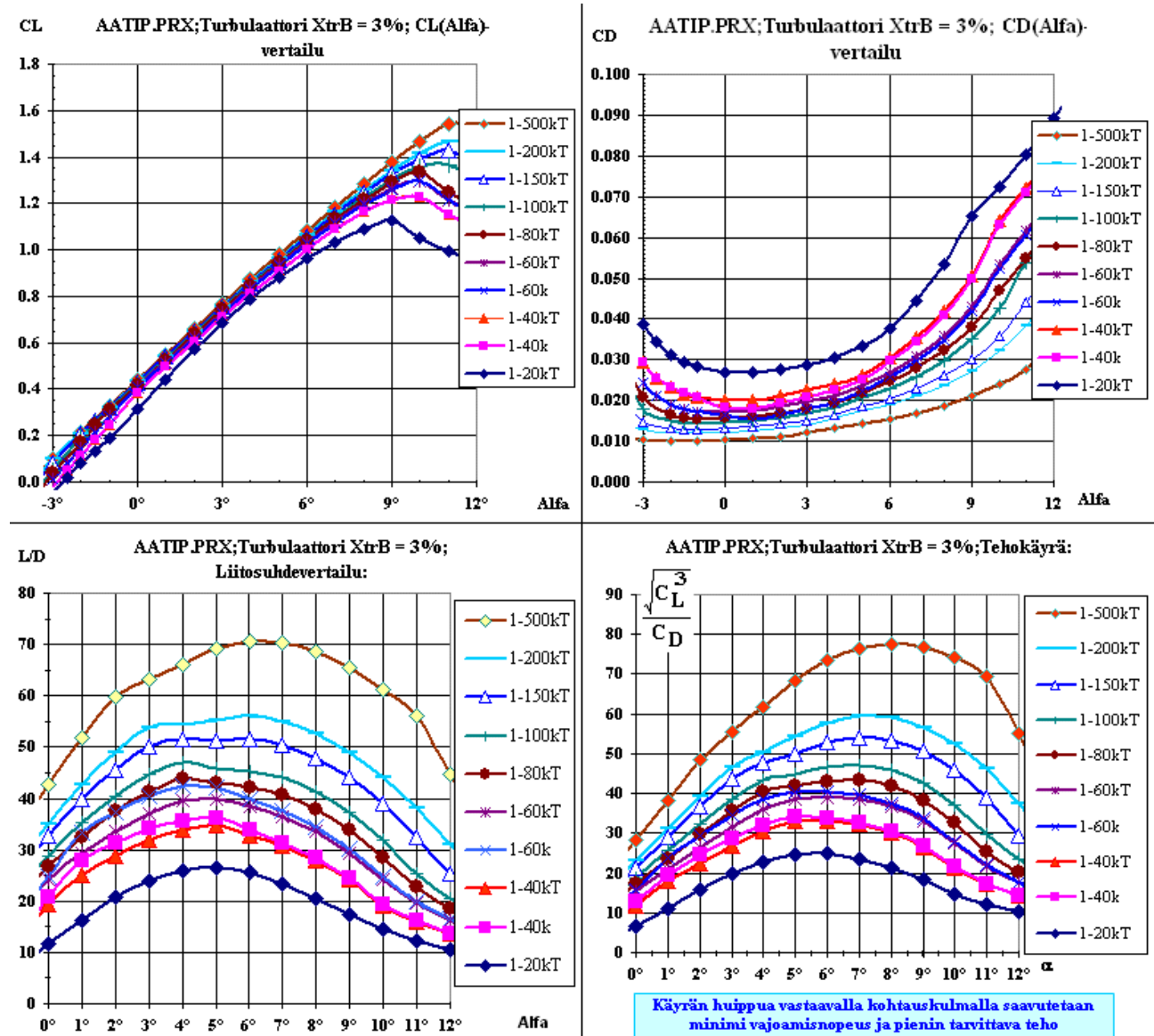


Figure 42 Andrjukovin kärkiprofiilin suoritusarvot. Käyrät 1-40k ja 1-60k ovat sileälle profiilille ja kaikissa muissa on turbulaattori alapinnan etureunasta 3% etäisyydellä. Ilman turbulaattoria liitosuhde on pari kolme pykälää parempi mutta vajoamisnopeudessa ero on marginaalinen.

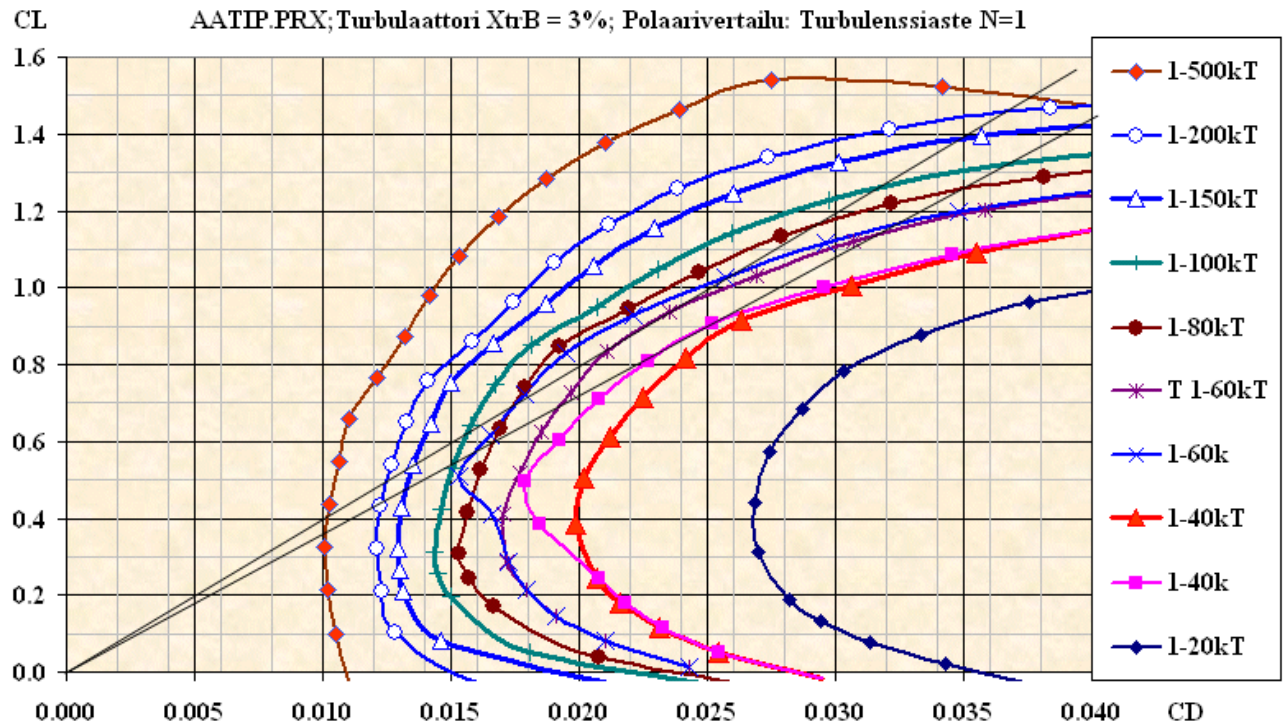


Figure 43 Andrjukovin kärkiprofiilin polaarit. Koska profiili on ohuempi ja vähemmän kaareva kuin edelliset, on selvää, että C_{LMAX} ja C_{DMIN} ovat pienempiä kuin niissä. Liitosuhde jää kuitenkin edellisiä pienemmäksi, joten syy tämän kärkiprofiilin valintaan täytyy olla jossain muussa kuin tehokkuudessa.

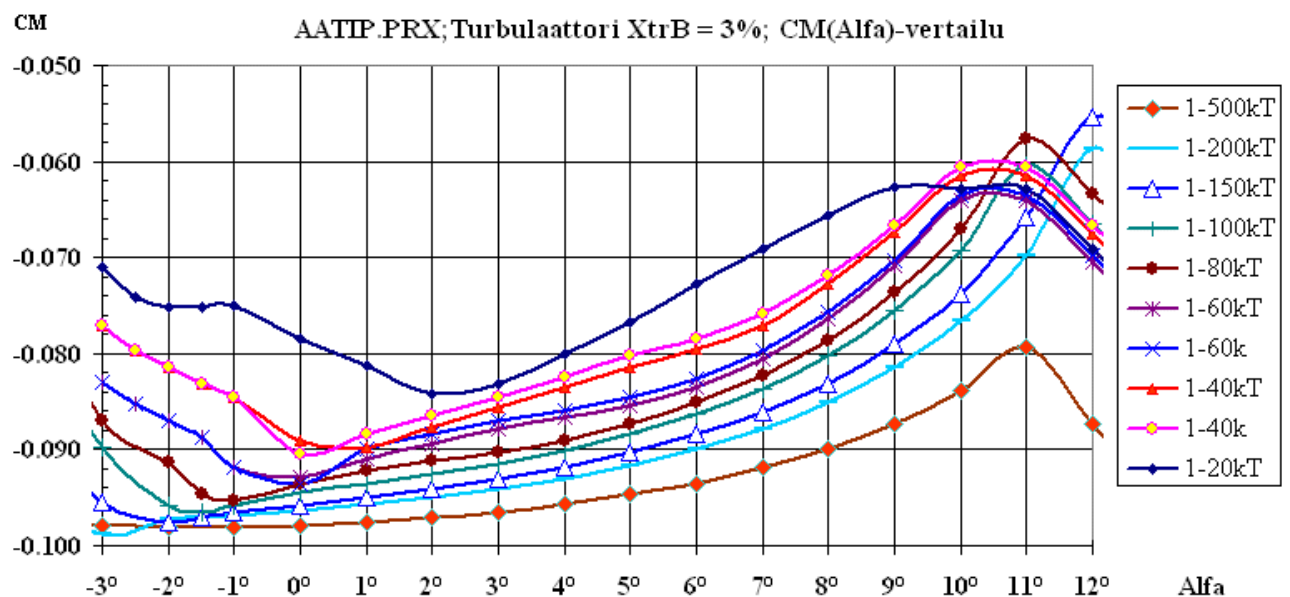


Figure 44 Andrjukovin kärkiprofiilin momenttikerroin. Käyrät 1-40k ja 1-60k ovat sileälle profiilille ja kaikissa muissa on turbulaattori alapinnan etureunasta 3% etäisyydellä. Turbulaattorin vaikutus näkyy selvästi Alfa = 0° läheisyydessä, joten otetaan tästä alueesta suurennos.

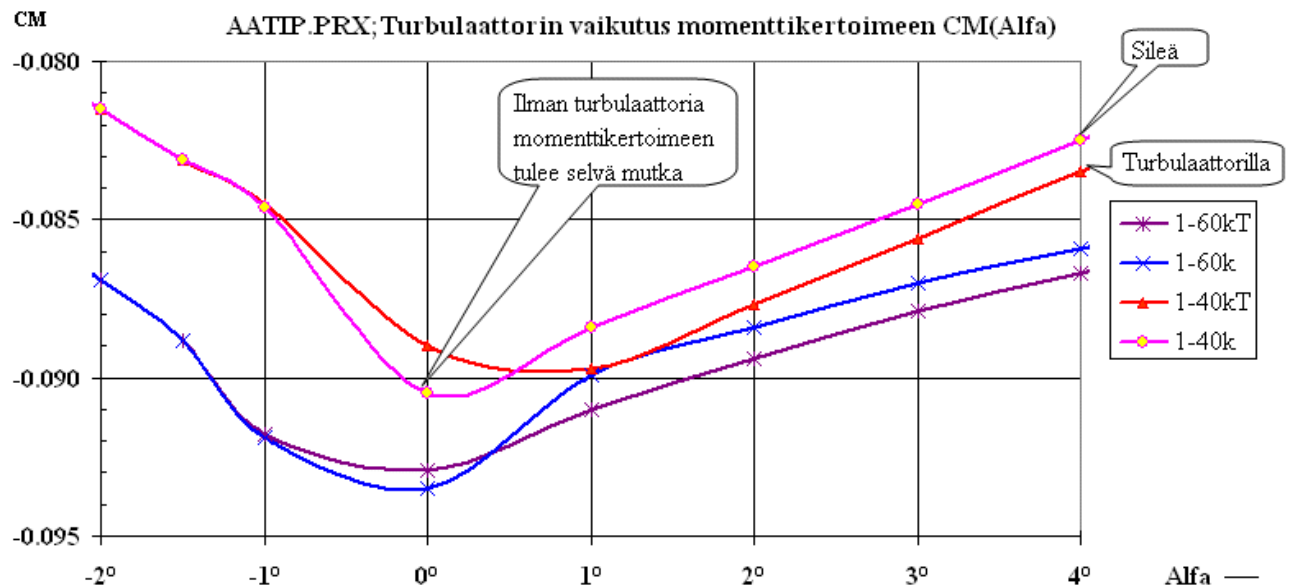


Figure 45 AATIP.PRX-profiilin momenttikäyrä turbulaattorilla ja ilman. Ilman turbulaattoria momenttikäyrässä on nolla-kohtauskulmalla ($CL \sim 0,4$) voimakkaampi mutka kuin ilman sitä. Tämä on WAKEn nousulennon alueella ja saattaa vaikeuttaa trimmattavuutta. Toisaalta tällaisia anomaliaita voi hyödyntää tilanteissa, joissa ollaan lähellä tasapainoa ja halutaan häiriön jälkeen jokin tietty toiminto. Toiminnon täytyy luonnollisesti olla halutun suuntainen eikä juuri päinvastainen. Kun momenttikerroin kasvaa, eli tulee enemmän negatiiviseksi, se aiheuttaa nokan painumisen alas, jolloin nopeus kiihtyy, kohtauskulma pienenee, Re-luku kasvaa jne momenttikerroin muuttuu ja ollaan tekemisissä stabiliteettikysymysten kanssa.

Loppukommenttina Andrjukovin profiileista sanoisin, että ne on selvästi optimoitu tehokkaasti. Keskeisin kysymys ei olekaan profiilin parantaminen vaan oikea profiilivalinta tehtävään.

Tehtäväkeskeisessä profiilin valinnassa on tunnettava mm. seuraavia tekijöitä:

- Käytettävä Re-alue
- Lentotehtävän ääripisteet, WAKEssa esimerkiksi nousussa ja sen jälkeisessä liidossa on aivan erilaiset vaatimukset.

WAKE-profiilivertailu Re 40 000

Re 40k; Profiilit			
N	Thick	Camber	Designation
1	5.0 %	6.0 %	* BW-2.proRe40k N1 Xt0.35
2	10.0 %	6.0 %	* ebw2-1.prxRe40k N1
3	6.7 %	4.8 %	* GM15.proRe40k N1
4	8.5 %	4.5 %	* fxm2-2.prxRe40 k N1 Xt0.2
5	4.8 %	3.5 %	* aatip.prx40k N1Xtr1-1
6	4.8 %	3.5 %	* aatip.prx40k N1Xtr1-0.03
7	6.2 %	5.0 %	* AA-Mid.prx40k N1Xtr1-0.03
8	6.6 %	5.6 %	* aaroot.prx40k N1Xtr1-0.03
9	10.5 %	6.3 %	* ossi-11.prx40k N1Xtr1-1
10	10.5 %	6.3 %	* olokko.prx40k N1Xtr1-1

Table 1 Profiilivertailussa mukana olevat profiilit. Tässä on muutama ylimääräinen profiili, jotka on suunniteltu muihin tarkoituksiin, mutta saattavat sopia myös WAKEen.

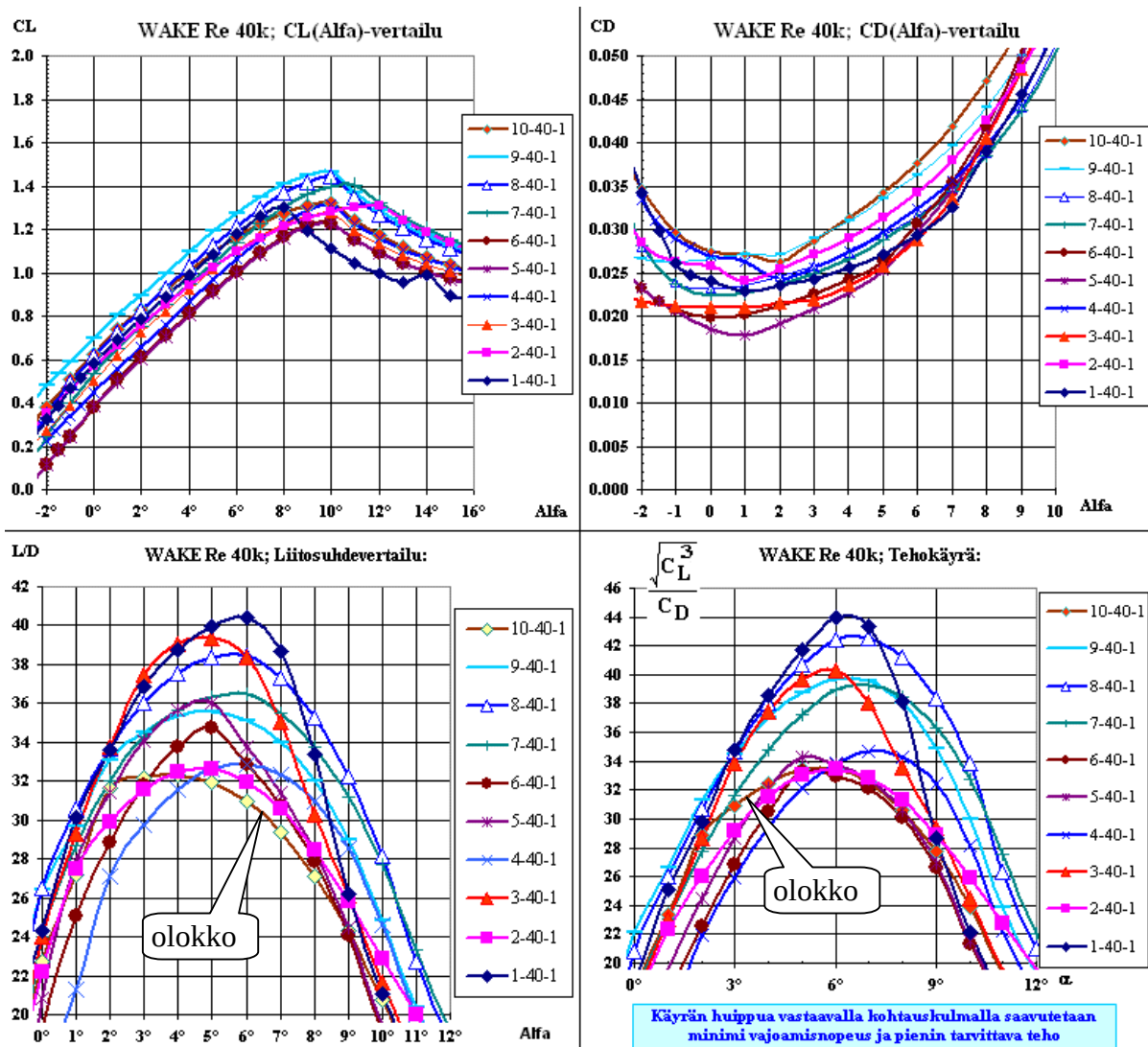


Figure 46 WAKE-profiilien suoritusarvot Reynoldsin luvulla 40 000, CL(Alfa), CD(Alfa), liitosuhde ja tehokäyrä. Paras teho ja liitosuhde on Bob Whiten BW-2:lla. Huippu on tosin hyvin kapea.

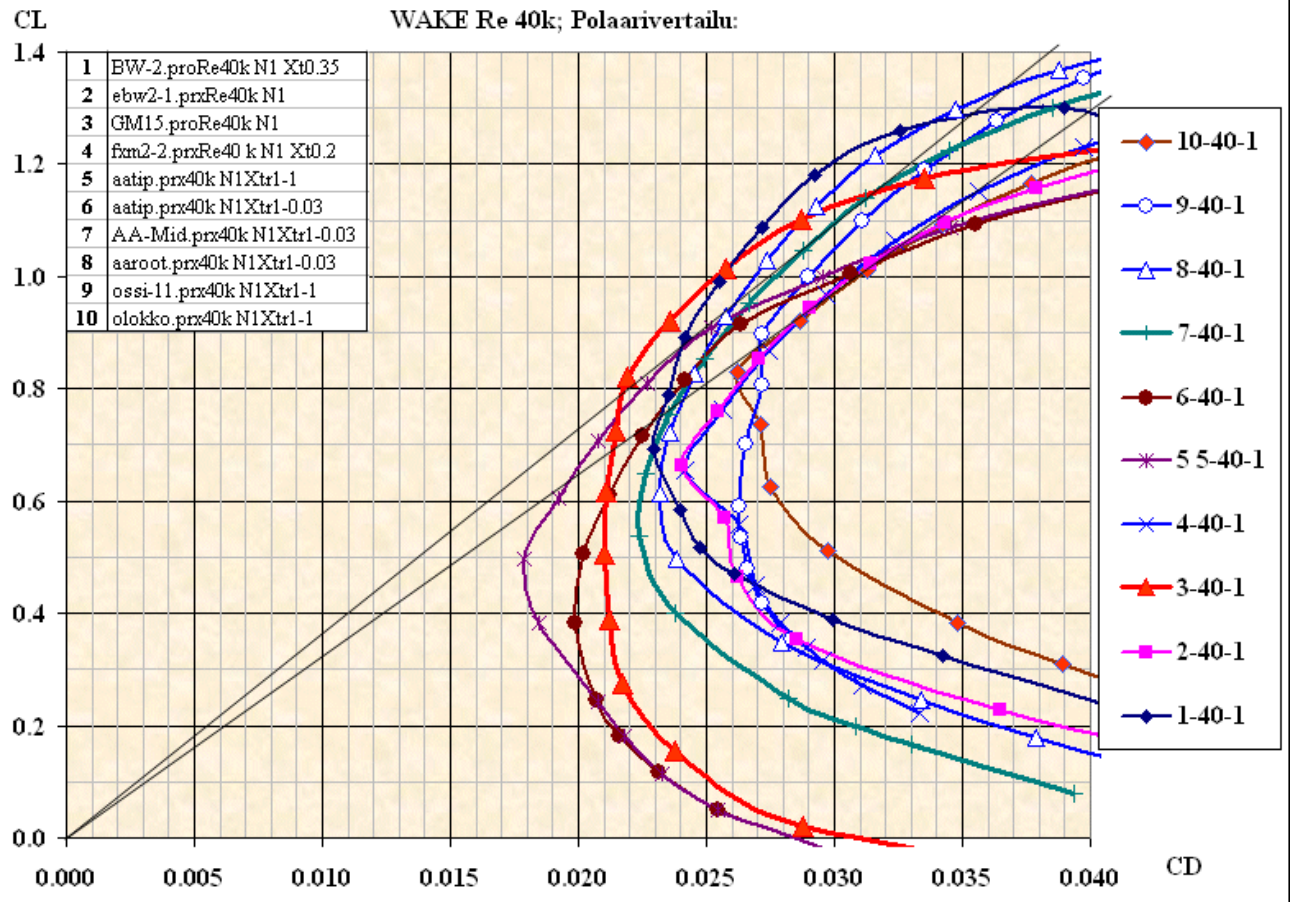


Figure 47 WAKE-polaarien vertailu, kun $Re = 40\,000$. Tässä vertailussa sijoittuu No 3 eli GM15-profiili yllättävän hyvin. Näyttää siltä, että siitä voisi kehittää sopivan, mikäli muut ominaisuudet ovat yhtä hyviä.

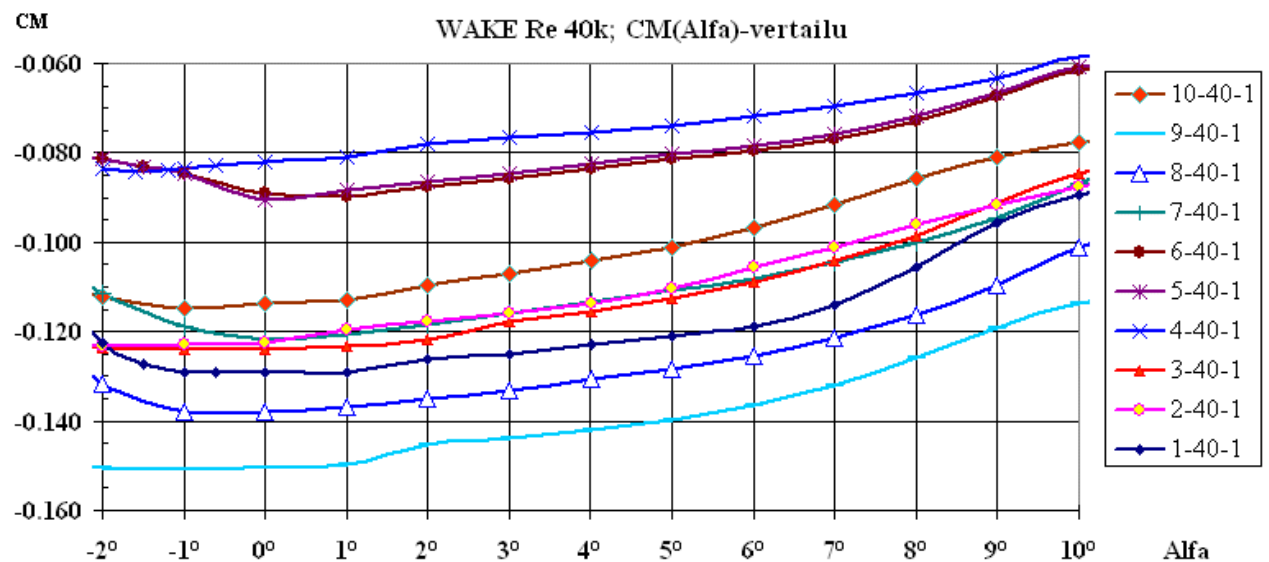


Figure 48 WAKE-profiilien momenttivertailu, kun Re on 40 000.

EHWR2.PRX; Uusi Wake-profiili

Edellisten tutkimusten jälkeen tartuin jälleen profiilin kehitystyökaluun ja hain uutta profiilia, joka toimisi mahdollisimman hyvin käytännössä. Useimmat edellisistä profiileista ovat hyvin ohuita ja siitä syystä kunkin toiminta-alue on yleensä kapea. Liian ohuen profiilin kanssa on myös rakenteellisia ongelmia, jotka liittyvät lujuuteen ja jäykkyyteen. Liitän tähän kuvat profiilin kehityksen eri vaiheista, niin pääset jyvälle miten uuteen profiiliin on tultu.

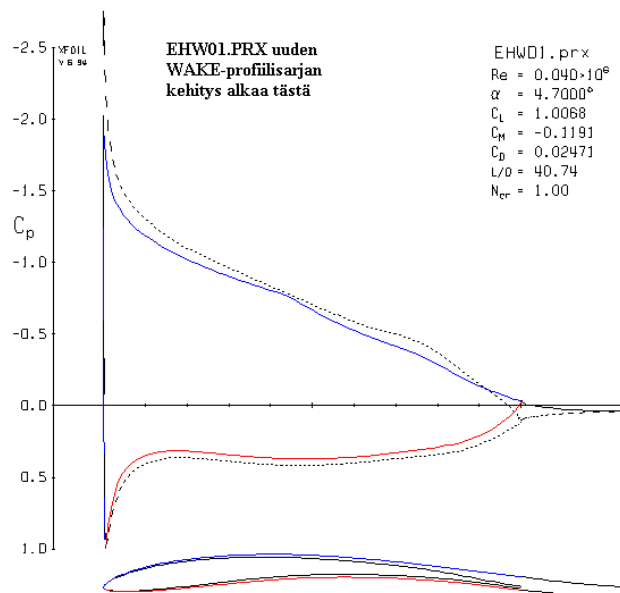


Figure 49 Ensimmäinen versio, jonka liitosuhde ja tehokkuus on aivan parhaiden profiilien luokkaa. Profiili on kuitenkin erittäin ohut ja negatiivisella kohtauskulmalla alapinnalle muodostuu kupla, joka heikentää ominaisuuksia ja kaventaa käytettävissä olevaa toiminta-aluetta. Paras liitosuhde saavutetaan, kun $CL = 1.00$

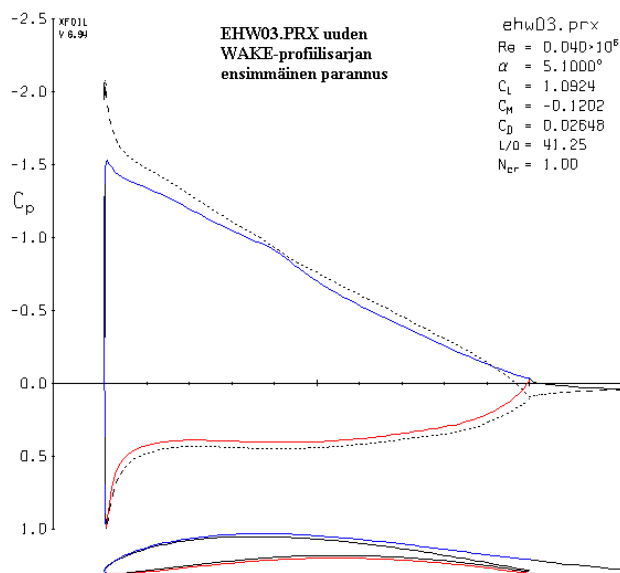


Figure 50 Edellisen profiilin ominaisuuksia on hiottu ja saatu liitosuhde paranemaan huippuhuivaksi. Parhaan liitosuhteen $CL = 1.09$ eli liki 10% korkeampi kuin edellisellä. Vastaavasti on myös momenttikerroin kasvanut hieman.

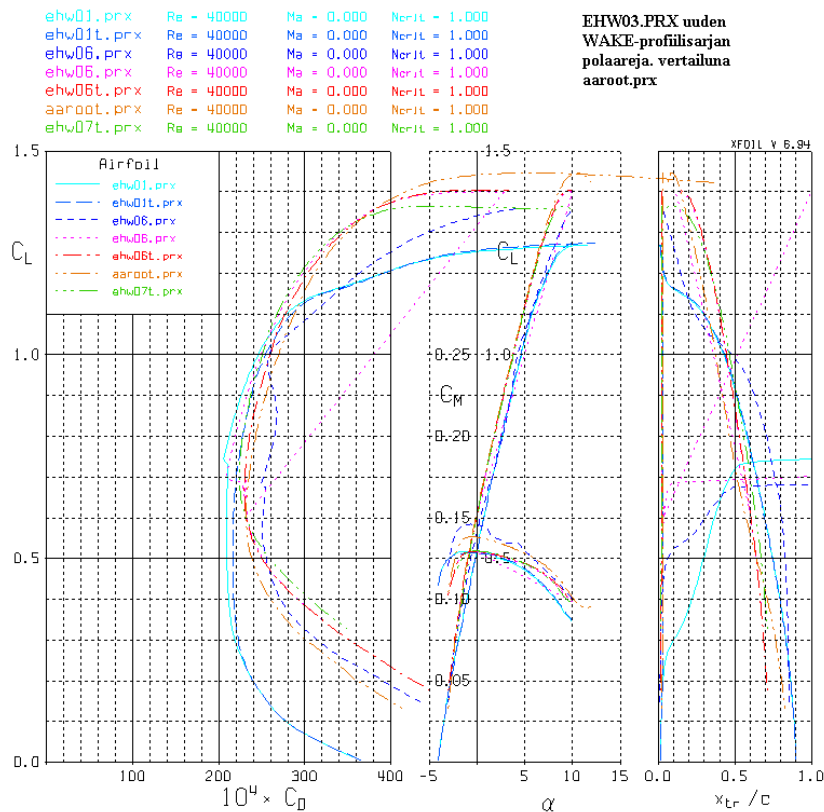


Figure 51 Kun profiili on muuten hyvä ja tuntuu toimivan, sille ajetaan polaari. Polaareja verrataan keskenään ja se paljastaa armotta, miten kehitystyö onnistui. Tässä on sarja polaareja, joita on laskettu uutta profiilia kehitettäessä. Kaikkia näitä vaivaa alapintaan muodostuva kupla, jonka vuoksi joudutaan alapinnalla käyttämään turbulaattoria.

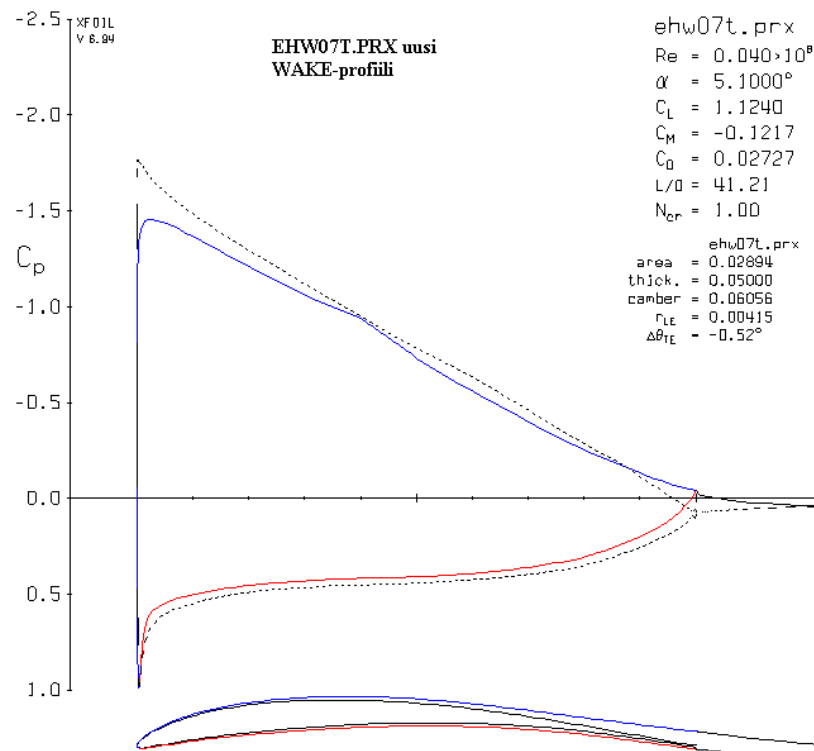


Figure 52 Tässä on yksi edellisen kuvan polaareiden profiliversioista. Tällä on paras liitosuhde mutta hintana on kohtuullisen kapea toiminta-alue ja jokseenkin vaikea momenttikäyrä.

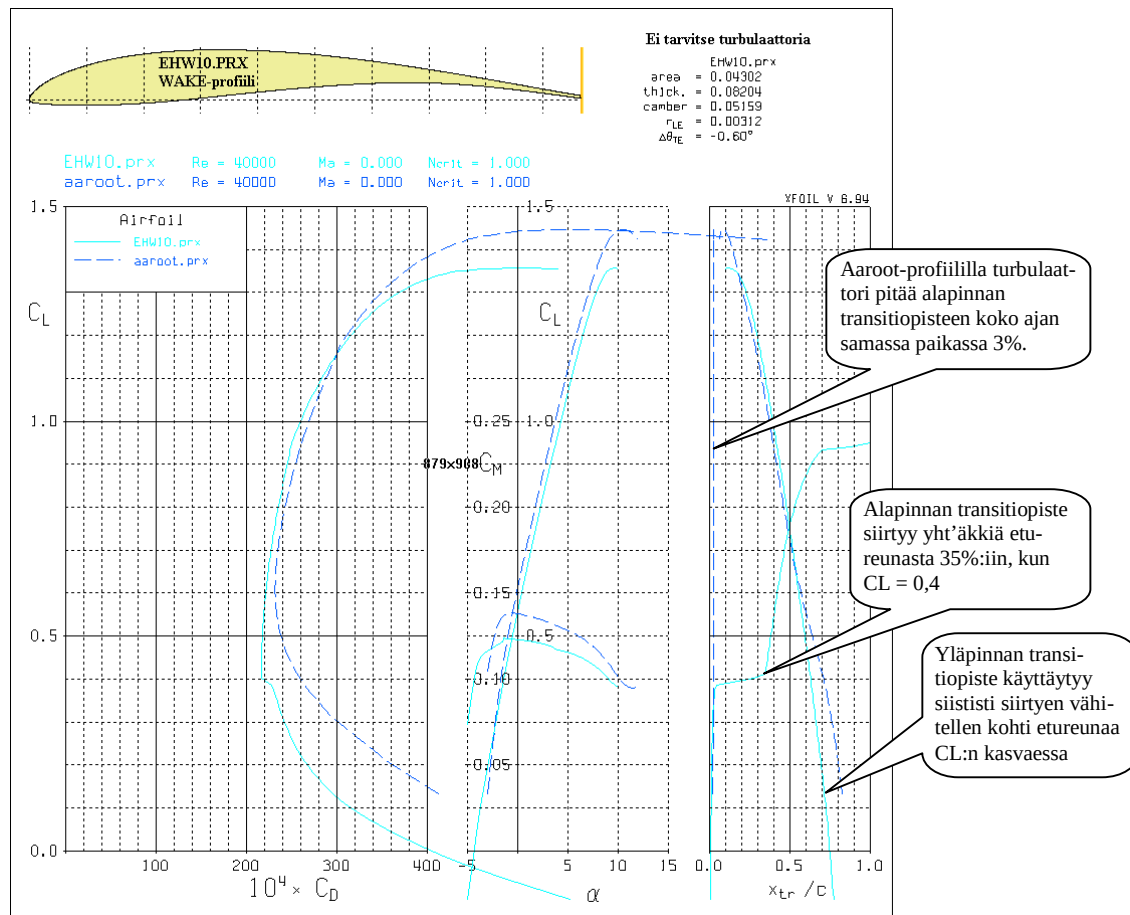


Figure 53 Nyt on onnistuttu laajentamaan toiminta-aluetta. Toiminta alkaa pienemmällä CL-arvolla kuin Andrjukovin tyviprofiililla aaroot.prx mutta vastaavasti yläalue on matalammalla. Profiilin etureunan alapinnalla on silti havaittavissa kuplan muodostusta, joka ilmenee ilman turbulaattoria. Tämä näyttää lupaavalta. Profiili on kasvanut etureunassa paksuutta, mikä hillitsee kuplan muodostusta. Samalla saadaan rakennepaksuutta.

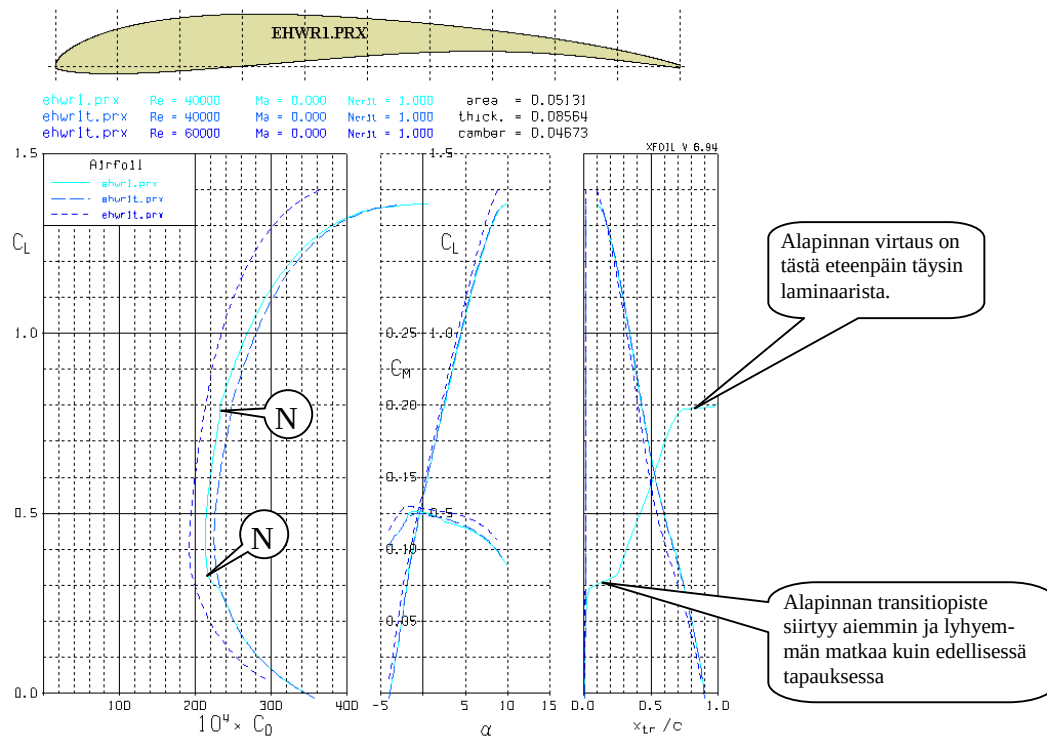


Figure 54 Edellisen profiilin viilausta on jatkettu ja onnistuttu pienentämään transitiopisteen aiheuttamaa kupla-ongelmaa. Tätä profiilia voi jo melkein käyttää ilman turbulaattoria. Transitiopisteen hyppäykset näkyvät ilman turbulaattoria polaarissa notkahduksina tai nokkina.

Profiilin toimita-alue on $0,3 < C_L < 1,3$ ja pienin vastus, kun $C_L = 0,4$. Tällä onnistuisi nousulentokin hyvin. Vieläkään en ole aivan tyytyväinen.

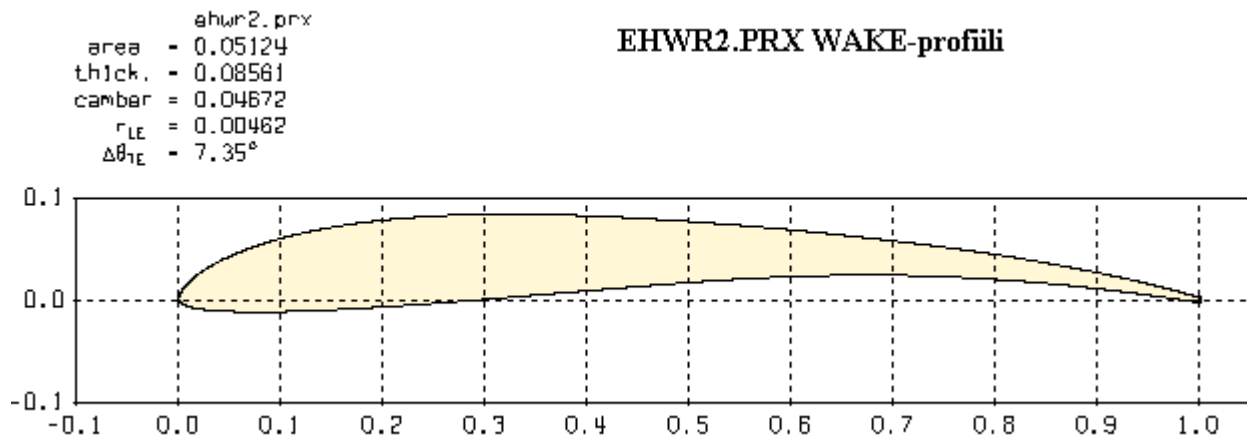


Figure 55 Edellisestä viilaamalla syntyi uusi profiili, EHW2.PRX, joka toimii ilman turbulaattoria ja jolla on melko laaja toiminta-alue. Rakenteellinen paksuus on 8,6%, jonka ansiosta siivestä tulee tarpeeksi jäykkä ja luja. Profiilin ominaisuudet eivät yllä huipussaan aivan parhaiden tasolle, mutta on hyvä kompromissi eri ominaisuuksien välillä.

Seuraavassa tämän profiilin, jota tämän hetken tietojen mukaan suosittelen parhaaksi valinnaksi WAKEEN, ominaisuudet:

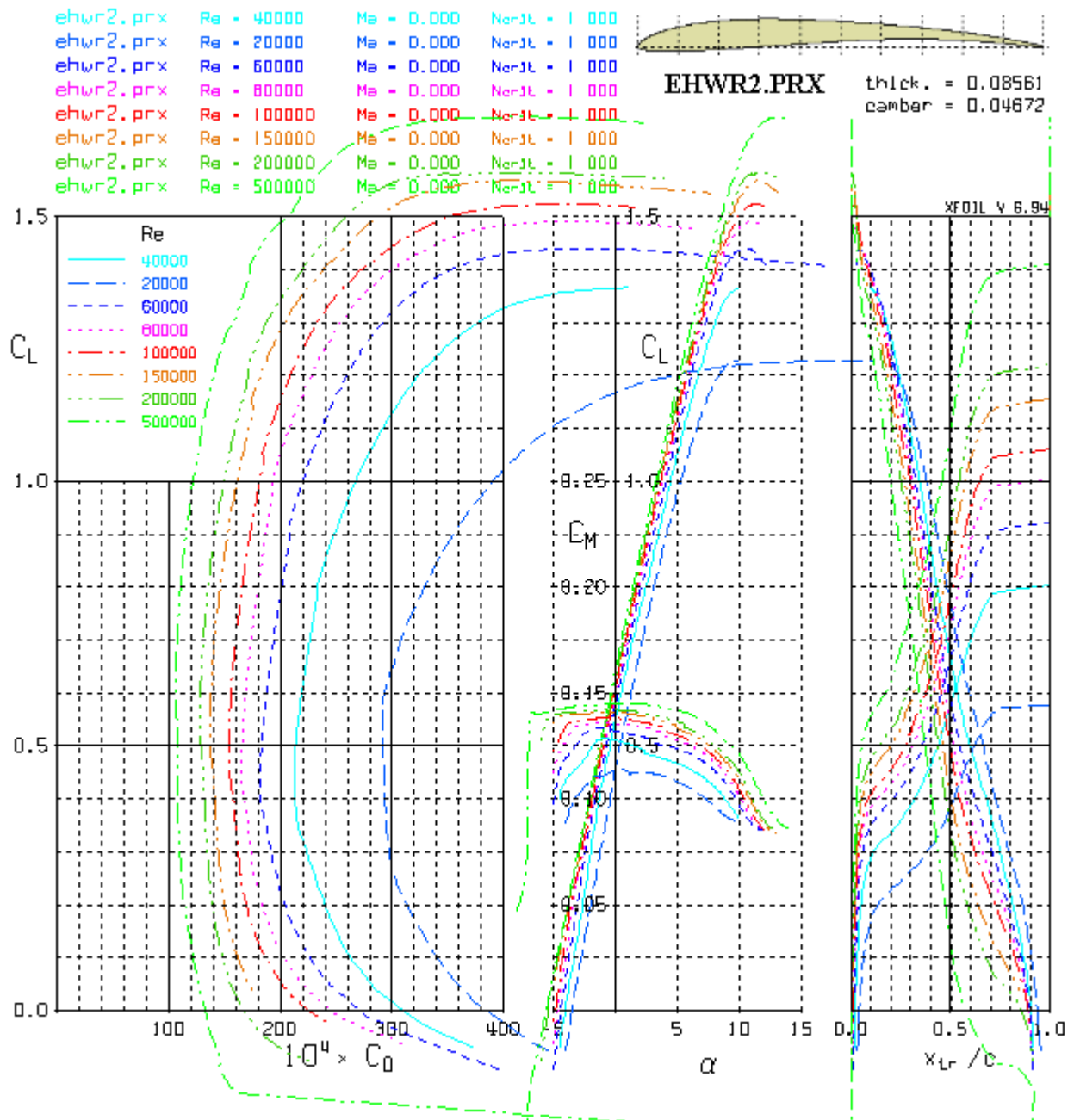


Figure 56 Polaarisarja profiilille EHWR2.PRX Reynoldsin lukualueelle 20 000 $\leq Re \leq$ 500 000. Kaikki polaarit ovat ilman turbulaattoria, jota ei tarvita, koska alapinnalle ei muodostu kuplaa ja transitiopisteen siirtymien on molemmilla pinnoilla juohea ja profiilin käyttäytyminen siistiä. Toiminta-alue on riittävän laaja, jotta myös nousun aikainen, alhaisen C_L :n alue olisi käytettävissä.

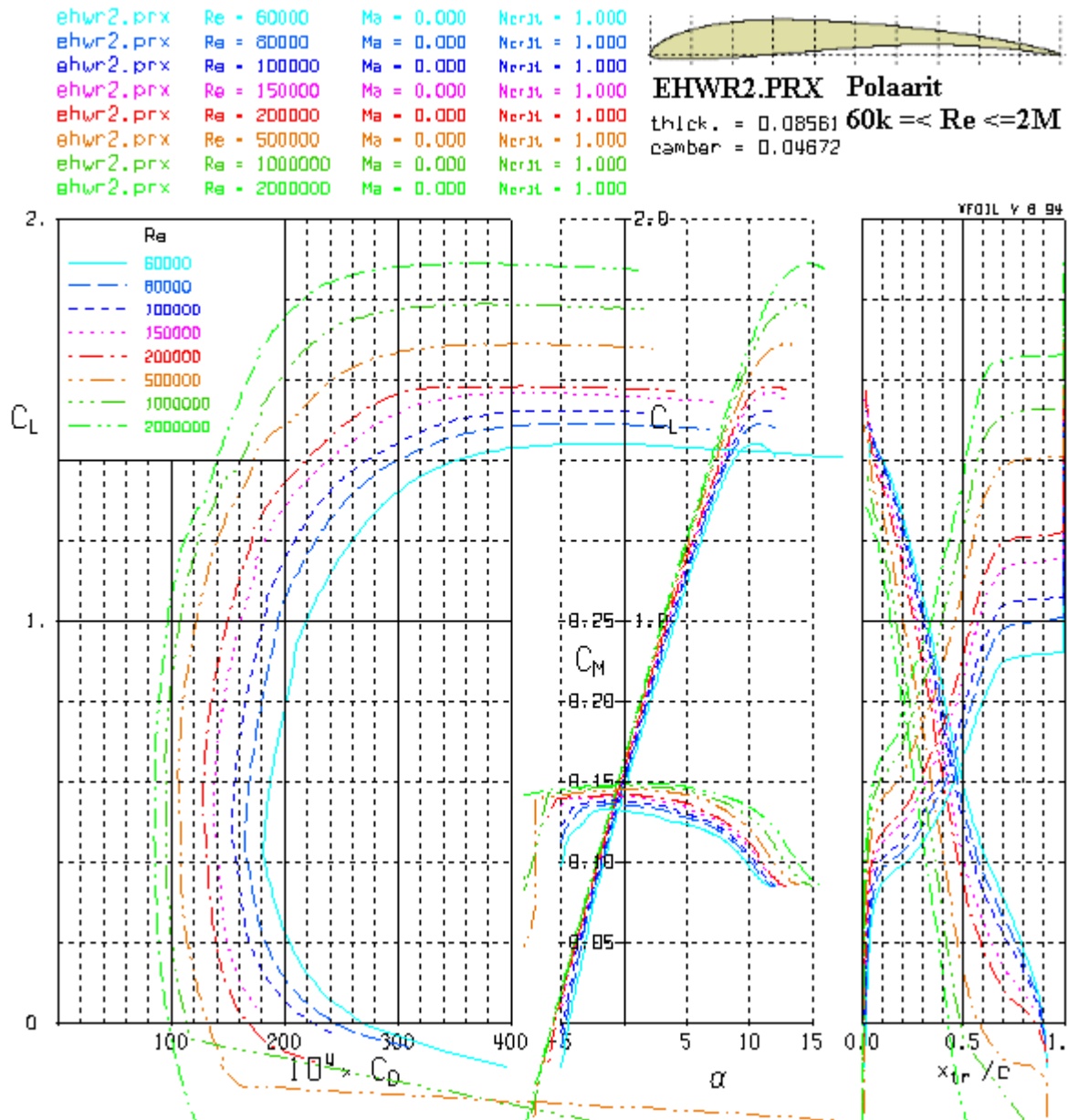
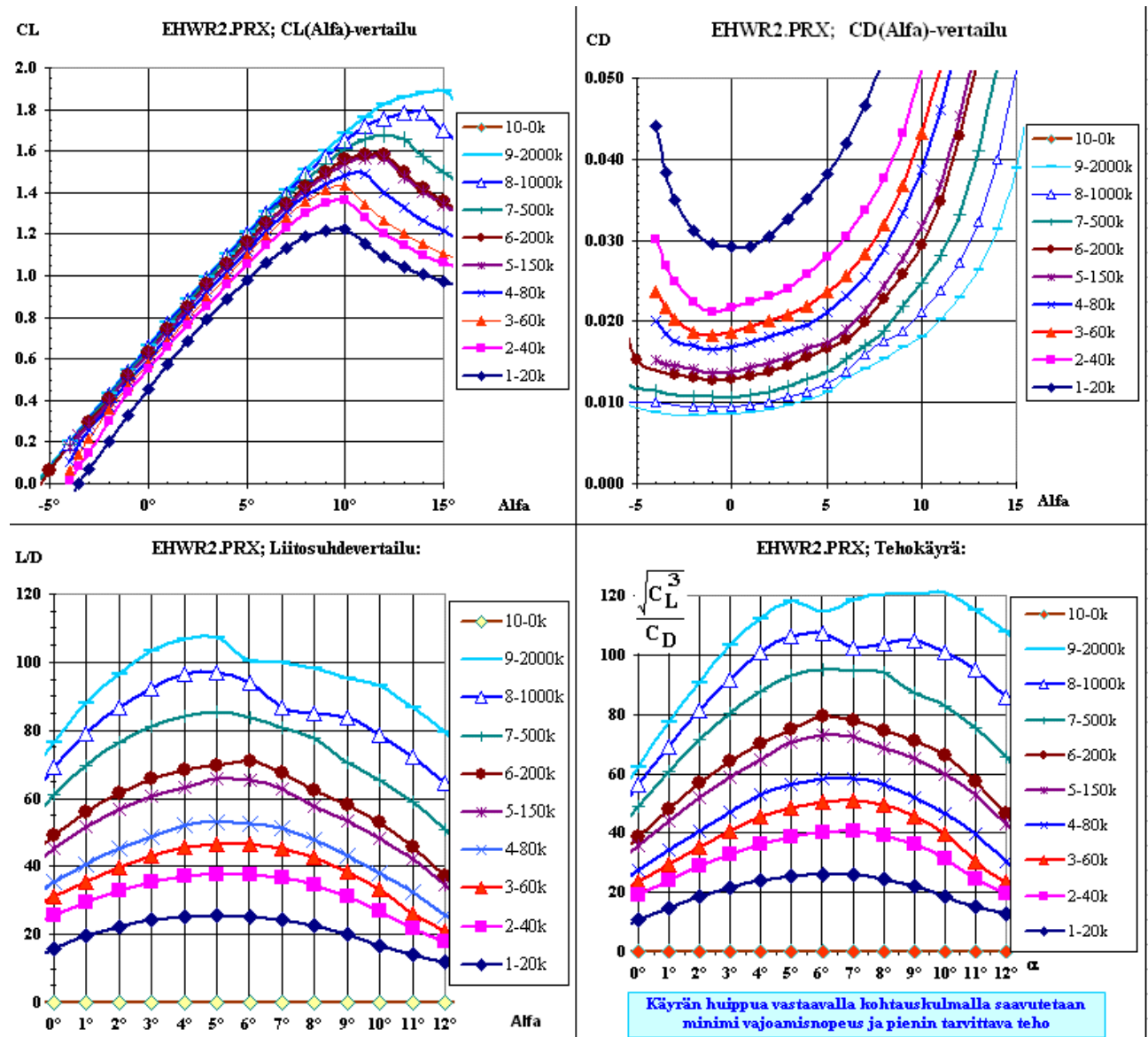
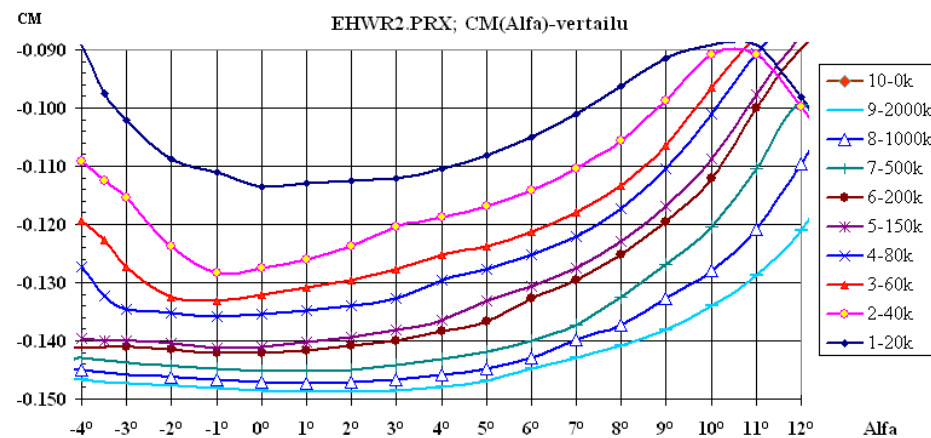


Figure 57 Koska tämä profiili toimii hyvin myös suuremmilla nopeuksilla, ajoin polaarit aina $Re = 2000\ 000$ saakka. Näillä nopeuksilla tämä käytetty turbulenssiaste $N=1$ on aivan liian suuri, joten on odotettavissa, että ominaisuudet ovat vielä huomasti parempia suurilla nopeuksilla.

Figure 58 EHWR2.PRX-profiilin suoritusarvot, kun $20\,000 \leq Re \leq 2\,000\,000$.

Waken käyttöalueella $Re\,40\,000$ tällä päästään lähelle liitosuhdetta 40, jonka tosin huippuprofiili jopa ylittävät.

Figure 59 EHWR2.PRX-profiilin momenttikäyrät, kun $20\,000 \leq Re \leq 2\,000\,000$.

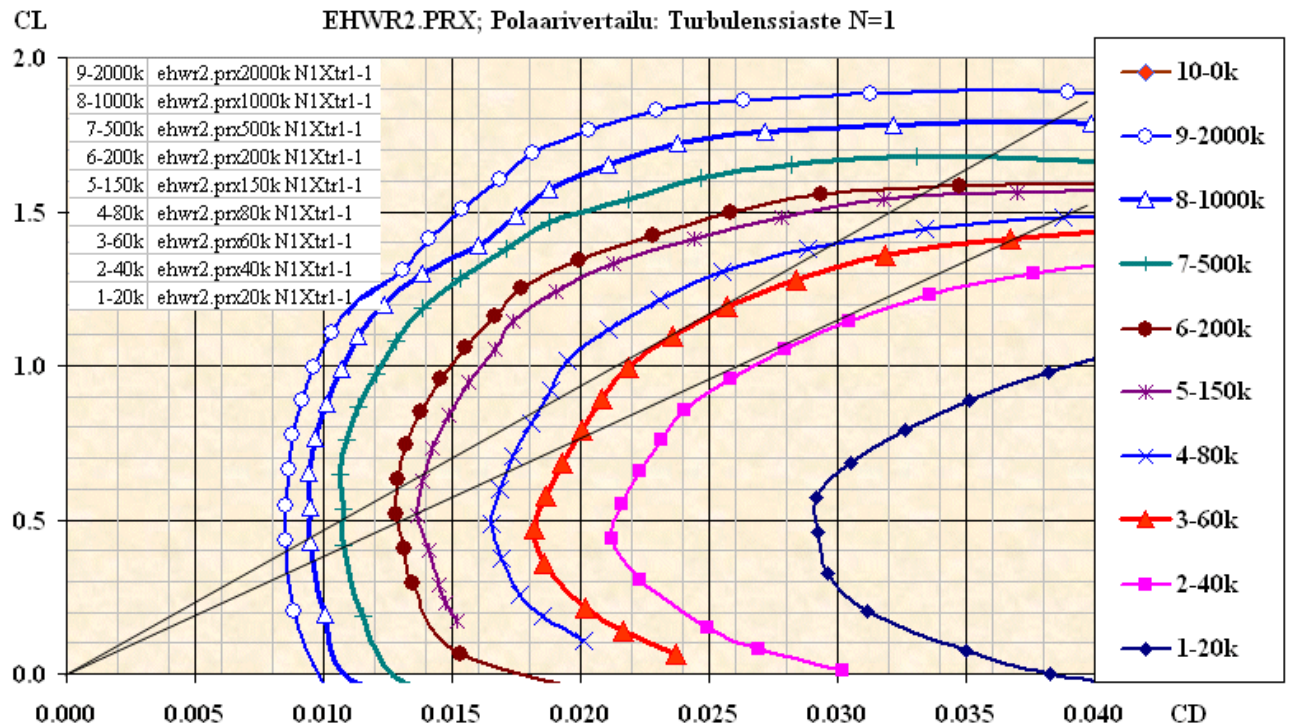


Figure 60 EHWR2.PRX-profiilin polaarit, kun $20\,000 \leq Re \leq 2\,000\,000$. Polaareille $Re\,40k$ ja $60k$ on piirretty tangentit, joiden tangeerauspuisteissa saavutetaan optimi liitosuhde ja siitä hieman oikealle pienin vajoamisnopeus.

Kun on käyty läpi näin monta profiilia ja aina löytyy uusi ja parempi, niin kannattaa kysyä itseltä, mikä olisi kaikista paras profiili WAKEen. Seuraavaksi olen kerännyt joukon profiileja eri lähteistä, ja luokitellut ne ensin sellaisiin, joille minulla on $Re\,40\,000$ suoritusarvot laskettuna. Toiseksi luokaksi valitsin turbulenssiasteella $N=1$ liitosuhteen mukaisen paremmuuden. Seuraavassa kuvasarjassa on kuvattu kaikki parhaat profiilit sekä sen jälkeen niiden keskinäinen vertailu suoritusarvojen, polaarin ja momentin suhteen. Niistä on mahdollista hakea mieleisiään ominaisuuksia. Seuraavassa taulukossa on lueteltu kaikki vertailussa mukana olevat profiilit.

Re 40k; Vertailussa käytetyt profiilit			
N	Paksuus	Kaarevuus	Merkintä
1	5.0 %	6.0 %	BW-2.proRe40k N1 Xt0.35
2	6.7 %	4.8 %	GM15.proRe40k N1
3	6.6 %	5.6 %	aaroot.prx40k N1Xtr1-0.03
4	8.6 %	5.6 %	ehwr2.prx40k N1Xtr1-1
5	6.2 %	5.0 %	AA-Mid.prx40k N1Xtr1-0.03
6	4.8 %	3.5 %	aatip.prx40k N1Xtr1-1
7	10.5 %	6.3 %	ossi-11.prx40k N1Xtr1-1
8	4.8 %	3.5 %	aatip.prx40k N1Xtr1-0.03
9	9.2 %	6.0 %	esa7046.prx40k N1Xtr1-1
10	9.2 %	5.0 %	rpeh592m.proRe40k N1

Table 2 WAKE-profiilien parhaimmistoa liitosuhteen mukaisessa paremmuusjärjestyksessä.

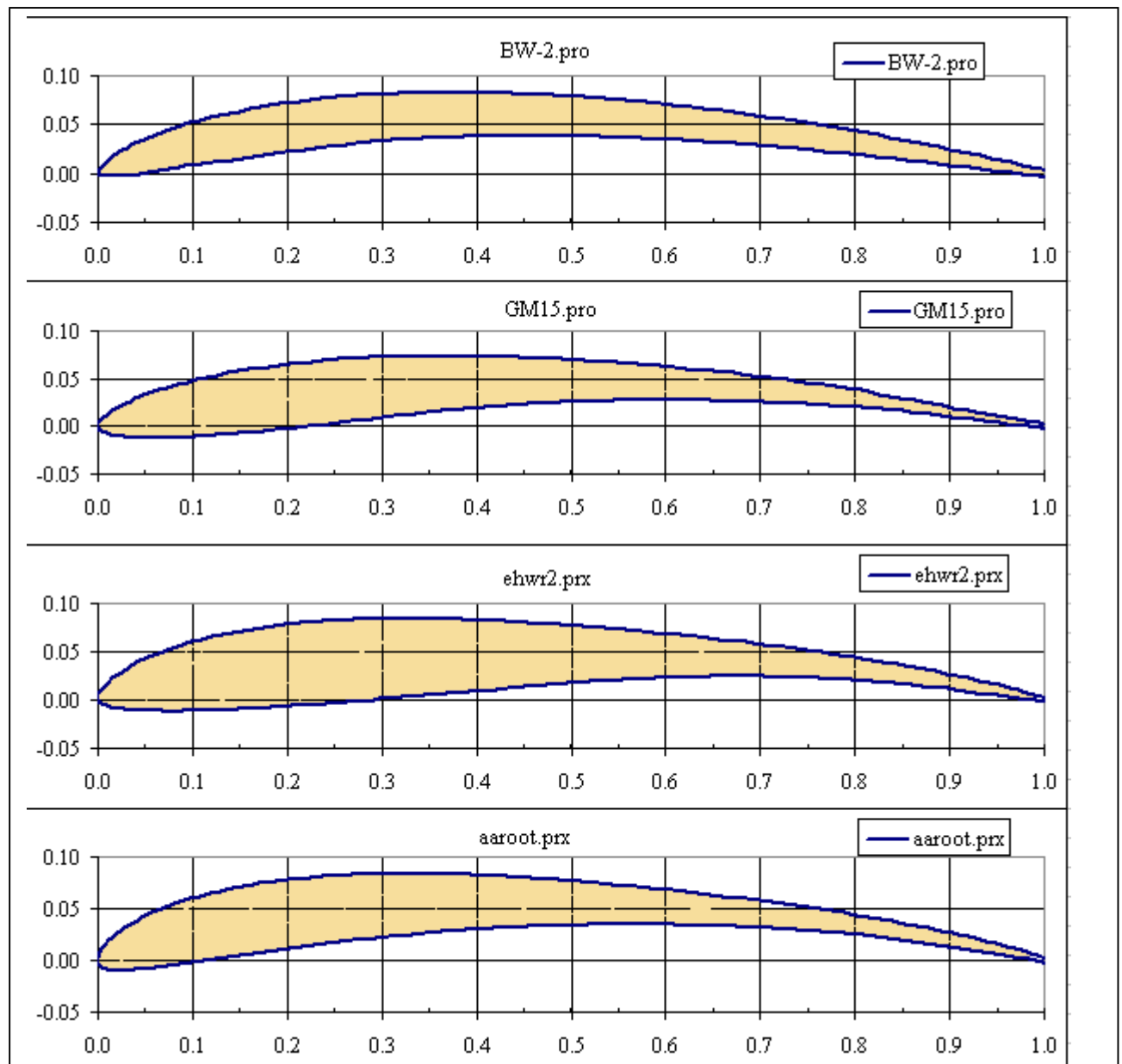


Figure 61 BW-2: on Bob Whiten profiili, olla hän on pärjännyt hyvin. Profiililla on paras liitosuhde. Toimita-alue on luonnollisesti kapea ja turbulaattorin kanssa saa luultaasti leikkiä. **GM15.pro:** on Gilbert Morrisin kehittämä profiili. Sillä on toiseksi paras liitosuhde ja laajempi toiminta-alue kuin BW-2:lla. **EHWR2.prx:** on kehittämäni profiili, jolla on neljänneksi paras liitosuhde ja kohtuullisen laaja toiminta-alue. Profiili on muita paksumpi. **Aaroot.prx:** on Andrjukovin tyviprofiili Wakeen. Profiililla on kolmanneksi paras liitosuhde.

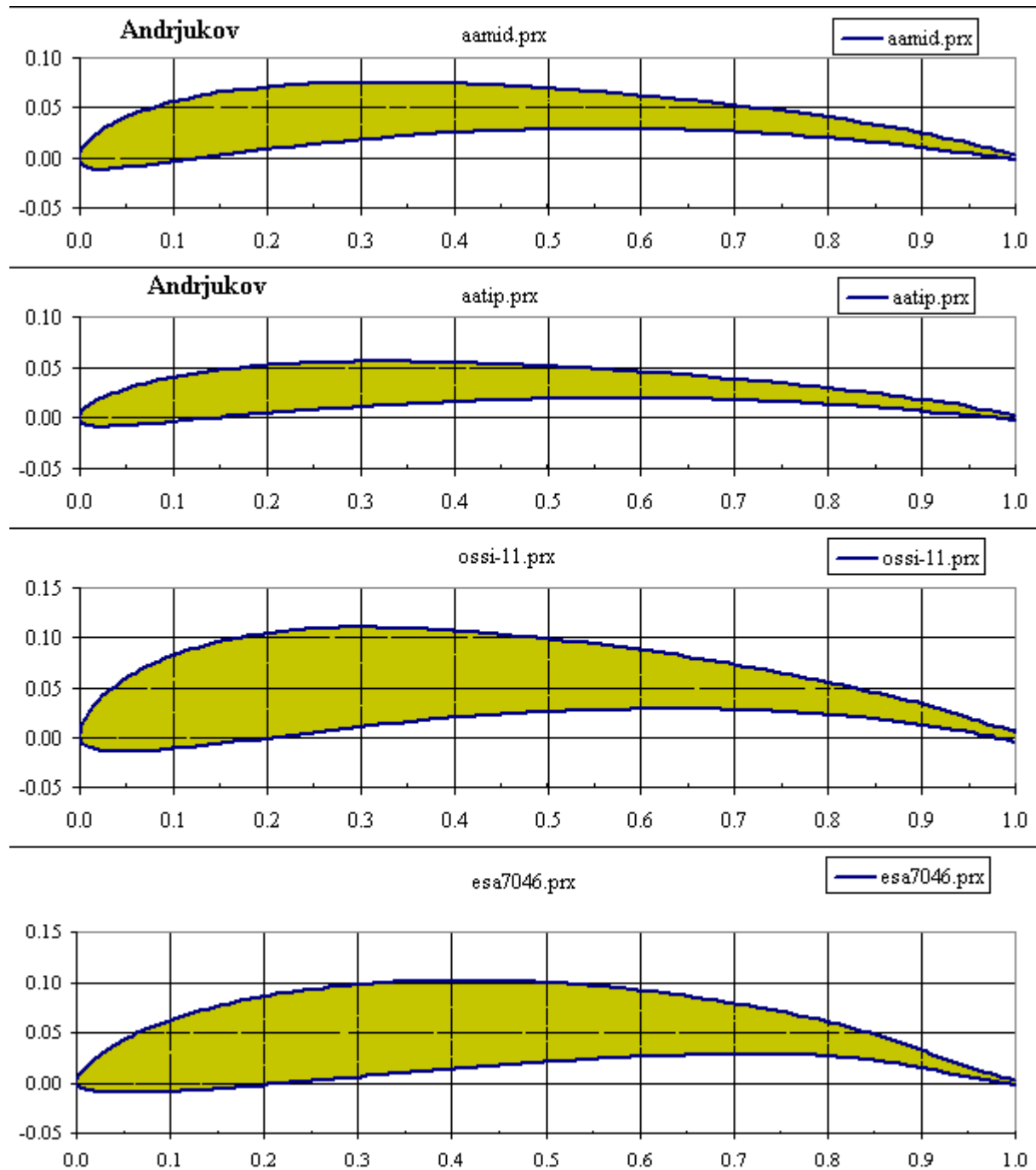


Figure 62 **aamid.prx:** ja **aatip.prx:** ovat Andrjukovin kehitelmiä Waken niksausken kohtaan sekä kärkeen. Profiilit ovat hyvin ohuita ja asettavat kovat vaatimukset rakenteiden jäykkyydelle ja kestävyydelle. **Ossi-11.prx:** on kehittämäni profiili, jonka kehitystyön alkuna olivat Ossi Kilpeläisen OLOKKO-profiili. **ESA7046.prx** on muihin tarkoituksiin kehittämäni profiili, jolla näkyy olevan kohtuulliset ominaisuudet myös Re 40 000:lla.

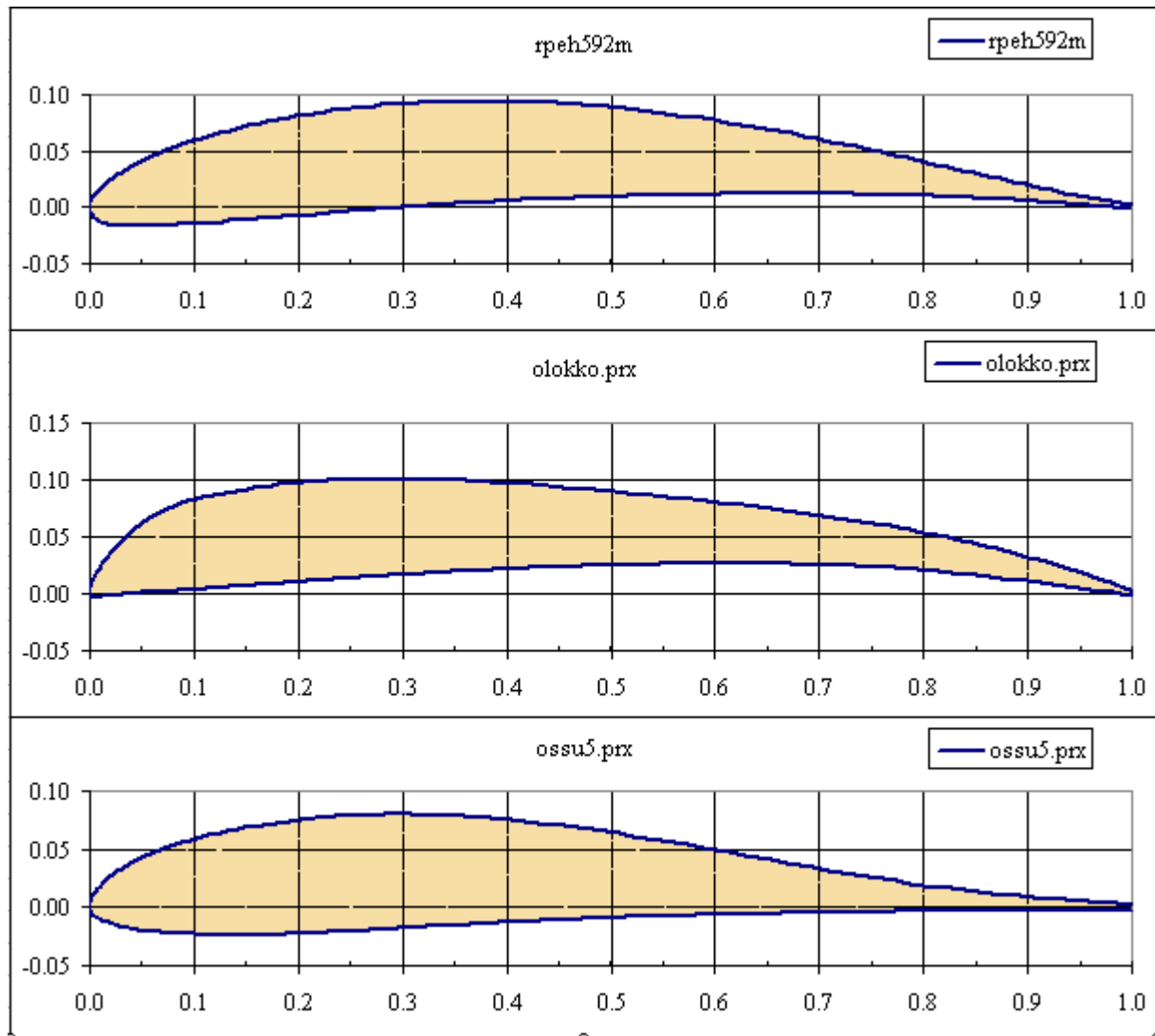


Figure 63 RPEH592m:n olen modifioinut alun perin Risto Peltosen kehittämästä profiilista. Profiilin etuna on kohtuullisen alhainen momenttikerroin. **Oloikko.prx:** on Ossi Kilpeläisen hyvin menestyneen Oloikko-Waken profiili ja **lopuksi Ossu5.prx:** on Ossille tehty ehdotus Wake-profiiliksi, jolla on erittäin alhainen momenttikerroin.

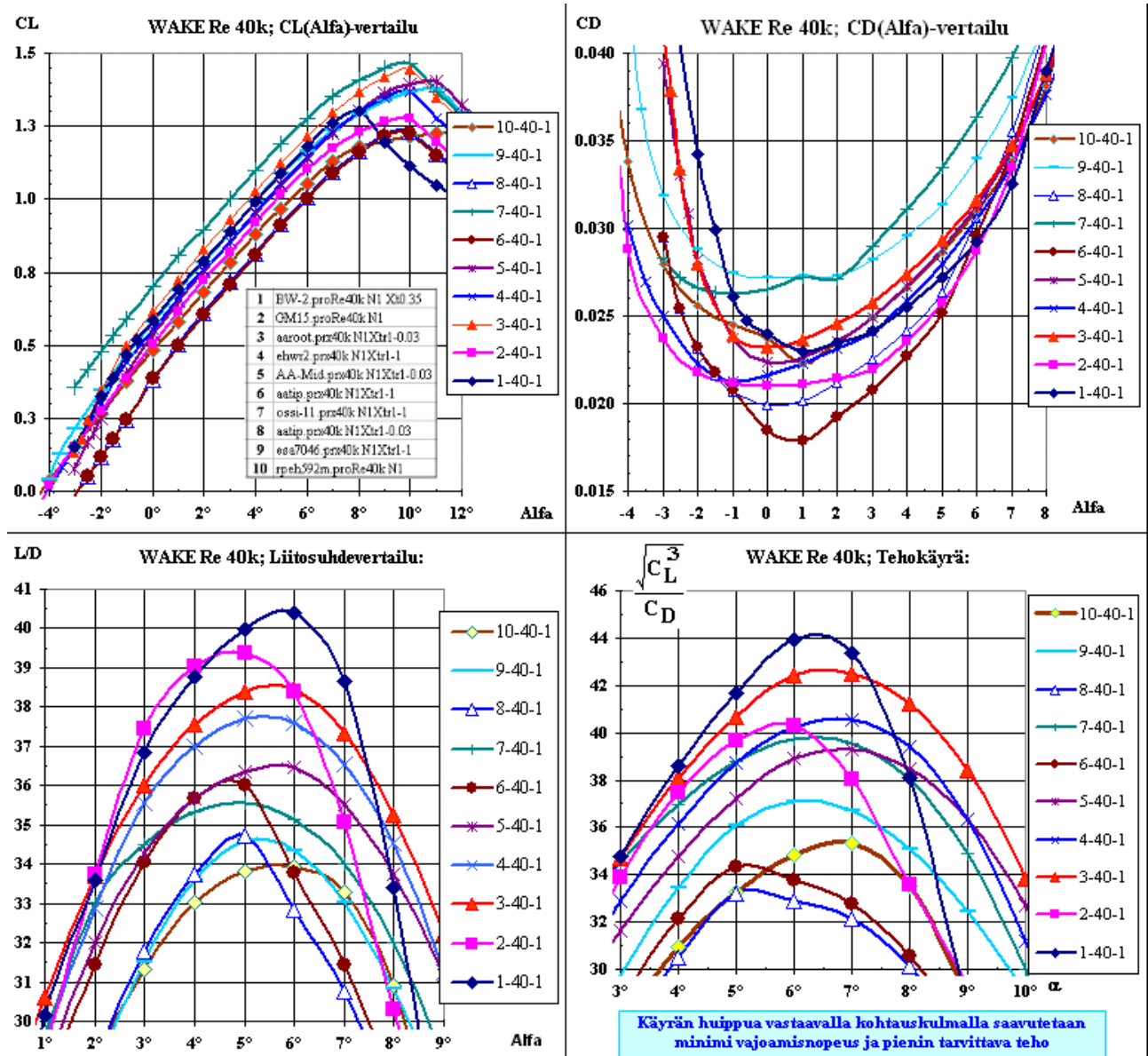


Figure 64 Parhaiden WAKE-profiilien suoritusarvot. Korkein C_L saadaan Ossi-11:llä (7). Pienin vastus on Andrjukovin kärkiprofiililla aatip.prx (6). Paras liitosuhde ja teho on Bob Whiten BW-2:lla (1). Laajimmat käyttöalueet on Andrjukovin tyviprofiililla, aaroot.prx (3) sekä edellä kehittämälläni profiililla (4) EHWR2.prx, joka sijoittuu näissä tarkasteluissa kärkipäähän, koska sillä on kohtuullinen liitosuhde ja tehokkuus melko laajalla alueella.

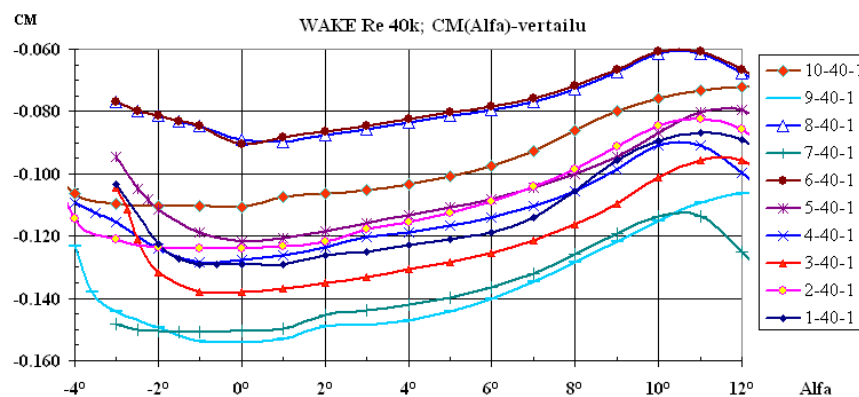


Figure 65 Wake-profiilien momenttikäyrät. Pienimmät momenttikertoimet ovat aatip.prx- (6) ja RPEH592m-profiileilla (10).

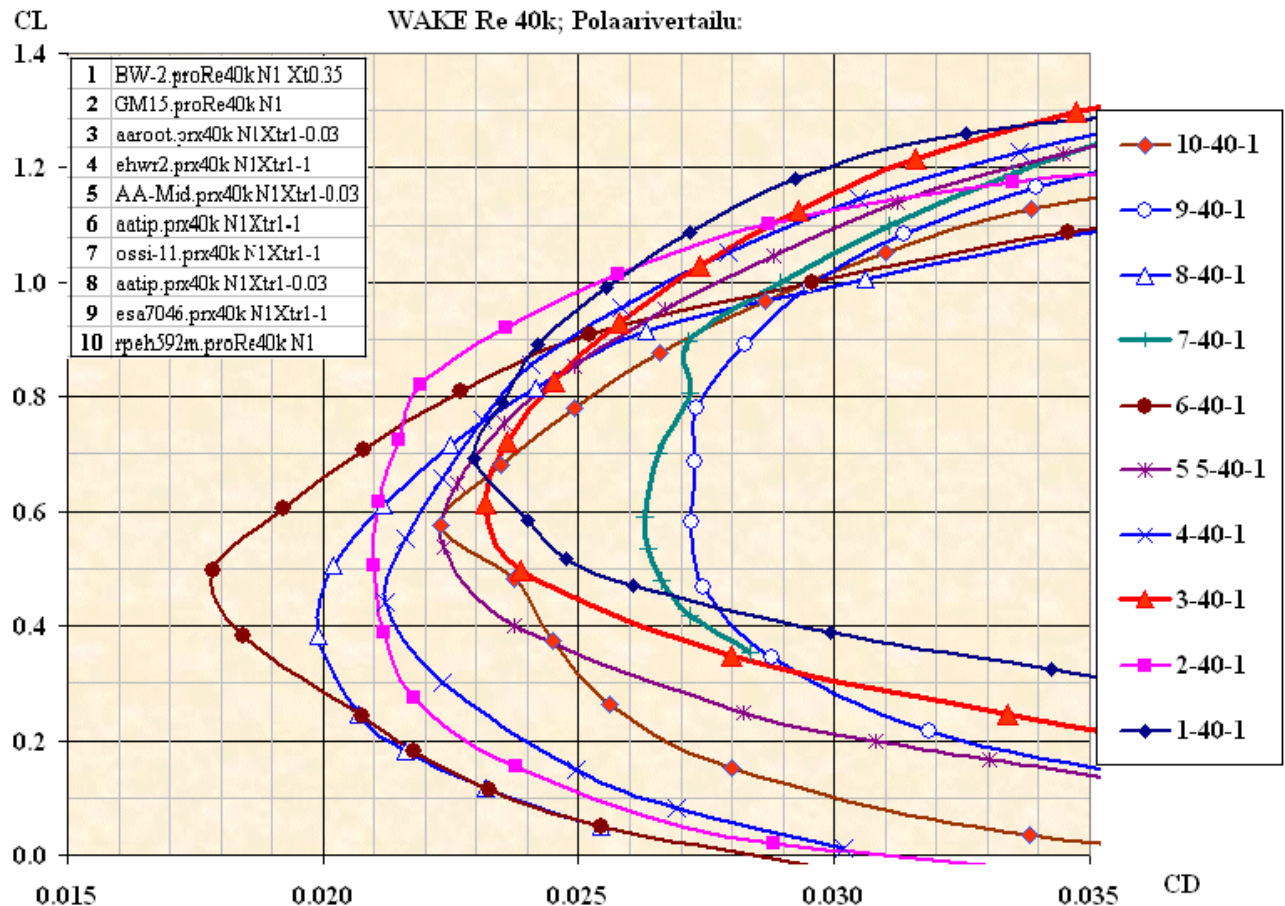


Figure 66 WAKE-profiilien polaarivertailu, kun $Re = 40\,000$ ja $N = 1$. Polaareja tarkasteltaessa on huomattava, että ainakin alkunousun aikana WAKE lentää melko nopeasti ja jyrkästi ylös, jolloin potkuri kantaa osittain lennokin painoa ja on oletettavaa, että nostovoimakertoimen on tällöin alhainen. Myöhemmän nousun aikana on tarkoituksen mukaista käyttää tehokäyrän huippua vastaavaa nostovoimakertoiminta, koska tällöin saadaan suurin korkeus. Se miten tämä onnistuu, on kiinni kokonaisuudesta. Mitä johdonmukaisemmat ominaisuudet profiililla, sitä helpompi lennokki on trimmata. Siksi kannattaa jopa uhrata suoritusarvoissa, mikäli lennon hallittavuutta kyetään tällä parantamaan.

Itse olisin valmis harkitsemaan EHWR2.prx-profiilia hyvänä kompromissina eri ominaisuuksien yhdistelmänä. Siitä on mahdollista kehittää paksumpi, mikäli haluat tätä rakennesyistä. Ohuempaa ei voi tehdä, koska silloin väistämättä syntyy joko kuplia tai suoritusarvot kärsivät. Kärkiprofiilina voisi olla aatip tai BW-2. Tällöin on harkittava kierron ja harituksen suhteita tai kokeilemalla haettava ne kohdalleen.

Terve taas tällä kertaa.

Erkki Haapanen