

D I P L O M I T Y Ö

LASKUSIIVEKEPROFIILIN FX67-K-170 AERODYNAAMISTEN

KERROINTEN KOKEELLINEN MÄÄRITTÄMINEN

Työn ohjaaja: tekn.tri Seppo Laine

Työ saatu 19.12.1972

Otaniemessä syyskuun 10. päivänä 1973

Vesa Kokkonen

Vesa Kokkonen

Iso Roobertinkatu 52 A 6

Helsinki 12

puh. 628649



ALKULAUSE

Tämä työ on tehty Teknillisen Korkeakoulun Virtauslaboratoriossa Otaniemessä. Saamistani arvokkaista ohjeista lausun kiitokset työni ohjaajalle, tekniikan tohtori Seppo Laineelle. PIK-20 -projektia haluan kiittää mielenkiintoisesta aiheesta ja taloudellisesta tuesta. TKK:n Kevytrakennetekniikan laboratorion ja Virtauslaboratorion henkilökuntaa kiitän saamistani avusta mallin ja tarvittavien laitteiden rakentamisessa sekä mittausten suorittamisessa. Edelleen haluan kiittää Agfa-Gevaert OY:tä saamistani filmimateriaalista, opiskelija Esko Kerästä ATK-avusta ja vaimoani Marjattaa työn puhtaaksikirjoituksesta. Lopuksi esitän kiitokset esimiehilleni Ilmavoimien Esikunnassa heidän myötämielisestä suhtautumisestaan.

SISÄLLYSLUETTELO

SYMBOLILUETTELO	sivu
JOHDANTO	
1. TUULITUNNELI	2
2. TUULITUNNELIMALLI JA SEN RIPUSTUS	3
2.1. Tuulitunnelimalli	3
2.2. Painereiät	8
2.3. Päätylevyt	11
2.4. Mallin ripustus tunneliin	13
3. VIRTAUSKOKEET	16
3.1. Yleistä	16
3.2. Lankakokeet	22
3.2.1. Kokeen suoritus	22
3.2.2. Kokeen tulokset	23
3.3. Nestekalvokokeet	26
3.3.1. Kokeen suoritus	26
3.3.2. Kokeen tulokset	27
3.4. Yhteenveto virtauskokeista	29
4. TUULITUNNELIKORJAUKSET	30
4.1. Yleistä	30
4.2. Suoritettut korjaukset	31
4.2.1. Kuristeista johtuva korjauskerroin (ϵ)	32
4.2.2. Korjaukset Reynoldsin lukuun ja kineettiseen paineeseen	35
4.2.3. Korjaukset kohtauskulmaan, nos- tovoima-, pituusmomentti- ja vastuskertoimeen	36
4.2.4. Saranamomenttikertoimen korjaus	40
4.2.5. Paine kertoimen korjaukset	40
4.2.6. Korjaukset manometrulukemiin	42
4.2.7. Korjaukset vastusmittauksissa	43
4.2.8. Äärellisestä sivusuhteesta joh- tuva kohtauskulman korjaus	44

	sivu
5. PROFIILIN PAINEMITTAUKSET	47
5.1. Yleistä	47
5.2. Kärkivälin suuntaisen paineja- kautuman mittaukset	48
5.2.1. Mittausten suoritus	48
5.2.2. Mittausten tulokset	49
5.3. Jänteen suuntaisen painejakautuman mittaukset	51
5.3.1. Mittausten suoritus	51
5.3.2. Laskentamenetelmät	53
5.3.2.1. Perusyhtälöt	53
5.3.2.2. Tietokoneohjelmat	56
5.3.3. Mittausten tulokset	56
5.3.3.1. Painekerroinjakautumat	56
5.3.3.2. Aerodynaamiset kertoimet	63
5.3.3.3. Laskentamenetelmien vertailu	70
5.4. Yhteenveto profiilin painemittauksista	71
6. VASTUSMITTAUKSET	74
6.1. Yleistä	74
6.2. Haravan valmistus	79
6.3. Haravan kalibrointi	82
6.4. Mittausten suoritus	87
6.5. Laskentamenetelmät	89
6.6. Mittausten tulokset	90
6.7. Yhteenveto vastusmittauksista	93
TIIVISTELMÄ	
LÄHDELUETTELO	
LIITTEET I-VIII	

SYMBOLILUETTELO

A	mallin sivusuhte; poikkipinta-ala
A_H	mallin tehollinen sivusuhte
a	häiriön leveys mallin jättöreunalla
B	mallin etummainen ripustuspiste
b	mallin kärkiväli
b_s	päätylevyellipsin pikkuakseli
C	mallin takimmainen ripustuspiste
c	profiilin jänne
c_c	voimakerroin jänteen suunnassa
c_f	laskusiivekkeen jänne
c_{dm}	muotovastuskerroin
c_{do}	profiilivastuskerroin
C_{Do}	kokonaisvastuskerroin
c_h	saranamomenttikerroin
C_L	kokonaisnostovoimakerroin
c_l	profiilin nostovoimakerroin
c_{l_α}	profiilin nostovoimakertoimen kaltevuus
$c_{m.25}$	profiilin pituusmomenttikerroin neljännesjänteen suhteen
c_n	normaalivoimakerroin
C_p	painekerroin
C_{pf}	perusprofiilin painekerroin
D	ulkohalkaisija
d	sisähalkaisija; jyväsakarheuden jyvähalkaisija
E	kimmomoduli
e	indusoidun kohtauskulman korjauskerroin

F	voima
H	kokonaispaine
h	tuulitunnelin mittatilan korkeus
i,j	taulukkoindeksejä
K	jättövirtausharavan kineettisen paineen korjauskerroin
l	ripustuslangan pituus; paineletkun pituus
l_s	päätylevyellipsin isoakseli
$M_{.25}$	pituusmomentti mallin neljännesviivan suhteen
Ma	Machin luku
P	jänteen suuntainen nostovoimajakautuma (vapaa virtaus)
P^*	jänteen suuntainen nostovoimajakautuma (tunnelivirtaus)
p	staattinen paine
q	kineettinen paine
r	mallin ripustuspisteiden välinen etäisyys
Re	Reynoldsin luku
S	mallin pinta-ala; staattisen paine-eron korjauskerroin
s	etäisyys jättöreunasta
t	profiilin paksuus
U	virtausnopeus
W	vanan leveys
x	koordinaatti jänteen suunnassa
X	suhteellinen koordinaatti jänteen suunnassa (x/c)
y	koordinaatti kohtisuoraan jännettä vastaan
Y	suhteellinen koordinaatti kohtisuoraan jännettä vastaan (y/c)

α	kohtauskulma
α_g	geometrinen kohtauskulma
α_i	indusoitunut kohtauskulma
α_e	tehollinen kohtauskulma
β	haravan suuntakulma virtaukseen nähden
Δl	venymä
δ	siivekepoikkeutuskulma
ϵ	kuristeista johtuva korjauskerroin
ϵ_{sb}	kiinteän kuristeen korjauskerroin
ϵ_{wb}	vanaveden kuristeen korjauskerroin
Λ	paksuussuhteesta riippuva korjauskerroin
ν	kinemaattinen viskositeetti
σ, τ	korjauskertoimia, jotka riippuvat mallin ja mittatilan dimensioista

yläindeksit: " mittalaitteesta saatu lukema
 ' mittalaitteesta saatu lukema, johon on suoritettu laitteen kalibrointi-
 ym. korjaukset ("tunneliarvo" mallin tai haravan kohdalla)
 ilman yläindeksiä: vapaan virtauksen olo-
 suhteita vastaava arvo (tuulitunneli-
 korjaukset suoritettu)

alaindeksit: c siirtoletku
 h jättövirtausharava
 L alapinta
 m mittahalli
 o häiriintymätön virtaus
 U yläpinta
 w vanavesi

JOHDANTO

Teknillisen Korkeakoulun Kevytrakennetekniikan laboratoriossa on vuodesta 1971 lähtien ollut suunnitteilla luji-temuovinen vakioluokan tehopurjekone PIK-20, joka on varustettu siiven jättöreunaan sijoitetuilla laskusiivekkeillä. PIK-20:n edistyksellisin piirre ^{onkin} ovatkin juuri em. laskusiivekkeet, sillä OSTIV:n kilpailusäännöt sallivat niiden käytön vasta vuodesta 1974 lähtien.

Keväällä 1972, jolloin oli siirrytty esisuunnittelusta prototyypin suunnitteluun ja muottien valmistukseen, tarvittiin lisätietoja ^{projektin} profiilin FX67-K-170 ja laskusiivekkekonstruktion aerodynaamisista ominaisuuksista. Tällöin päätettiin suorittaa tuulitunnelikokeet. - Myöhemmin kesällä mallin ollessa jo valmistumisvaiheessa saatiin käyttöön Althausin ko. profiililla Stuttgartissa suorittamien mittaus-ten tulokset. Nämä eivät kuitenkaan sisältäneet suuria siivekekulmia, joten työtä päätettiin jatkaa.

Tämän työn tarkoituksena on määrittää kokeellisesti PIK-20:ssä käytetyn laippaprofiilin FX67-K-170 aerodynaamiset kertoimet sekä tutkia profiilin virtausominaisuuksia. Aerodynaamiset kertoimet määritetään painemittauksilla, ja virtausominaisuuksia tutkitaan visuaalisin menetelmin.

1. TUULITUNNELI

Kokeet tehtiin Teknillisen Korkeakoulun Virtauslaboratorion alisoonisessa tuulitunnelissa. Tunneli on suljetun pii- rin tyyppiä; sen rakenne selviää liitteen I kuvasta 1. Mitta- tilan poikkileikkaus on 8-kulmio, jonka mitat käyvät ilmi liitteen I kuvasta 2. Jotta mallin tarkkailu ajojen aikana olisi mahdollista, on mittatilan ovi valmistettu läpinäkyväs- tä muovista ja mittatila valaistu sisältä. 10-lapaista potku- ria pyörittää 275kW:n tasavirtamoottori, jonka virtalähteenä on Ward-Leonard -koneisto.

Tunnelin virtauksesta voidaan todeta seuraavaa (lähde /6./):

- virtaus kokoonpuristumatonta ($Ma < 0,19$)
- pitkän ajanjakson kuluessa tapahtuva nopeuden muuttumi- nen on n. 1...2%
(Sisältää kineettisen paineen heilahtelut, lämpötilan nousun ja nopeuden kasvun ajan funktiona.)
- nopeuden vaihtelu mittatilan poikkileikkauksessa $< \pm 0,25\%$
- turbulenssitekijä 1,12 (lähde /25./)
- virtauksen suuntavirhe: ei tiedossa
- virtauksen nopeaa sykkimistä ei tapahdu

Tuulitunnelimallit voidaan ripustaa mittatilan yläpuolel- la olevaan 3-komponenttivaakaan tai kiinnittää mittatilan lat- tiaan.

2. TUULITUNNELIMALLI JA SEN RIPUSTUS

2.1. Tuulitunnelimalli

Tuulitunnelimalli valmistettiin lujitemuovista TKK:n kevytrakennetekniikan laboratoriossa. Sen kärkiväli on 1000 mm ja jänne 874,5 mm, joka vastaa PIK-20 -purjekoneen siiven tyvijännettä. Profiilin FX67-K-170 alkuperäisen jänteen olisi pitänyt olla 883,33 mm, mutta jättöreunasta poistettiin 1% eli 8,8 mm valmistusteknisistä syistä (jättöreunan yhteenliimaus). Tällöin myös profiilin paksuussuhde muuttui 17%:sta 17,17%:iin ja laskusiivekkeen jänteen suhde koko profiilin jänteeeseen pieneni 17%:sta 16,16%:iin. Laskusiivekkeen saranaviiva on 83%:n kohdalla (alkuperäisestä jänteestä) profiilin alapinnalla.

P. o p e ^{ja Harper} (lähde /3./s. 218) asettaa kaksidimensionaalisen mittatilan ja mallin mittojen suhteille seuraavat vaatimukset:

$c/h < 0,4$, jottei $(c_1)_{\max}$:iin aiheudu suurta virhettä, ja

$c/h < 0,7$, jottei $(c_{do})_{\min}$:iin aiheudu suurta virhettä.

Tässä on

h = tunnelin korkeus

c = mallin jänne

$(c_1)_{\max}$ = profiilin nostovoimakertoimen maksimiarvo

$(c_{do})_{\min}$ = profiilivastuskertoimen minimiarvo

Mittatilan korkeuden suhde leveyteen (= mallin kärkiväli, b) vaihtelee yleensä välillä 2,5...4.

Kokeessa olivat em. suhteiden arvot seuraavat:

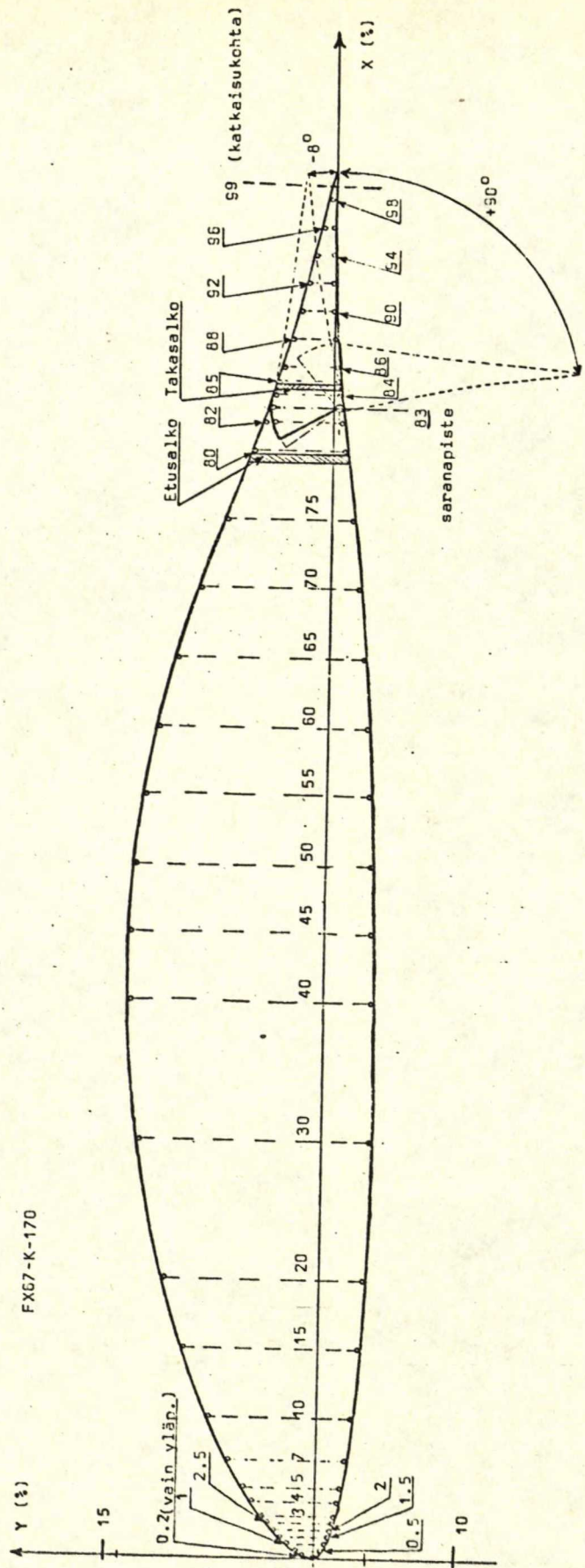
$$h/b = 2$$

$$c/h = 0,436, \text{ missä } \begin{cases} h = 2 \text{ m} \\ b = 1 \text{ m} \\ c = 0,875 \text{ m} \end{cases}$$

Jänne määräytyi aikaisemmin valmistetun muotin vuoksi, ja kärkiväli otettiin hieman vaadittua suuremmaksi, koska etukäteen ei tiedetty päätylevyjen vaikutusta aivan tarkkaan. Suhteet ovat kuitenkin niin lähellä vaadittuja, että niiden johdosta tuskin aiheutuu suurtakaan virhettä, kun otetaan huomioon, että mittaukset olivat pelkästään painemittauksia.

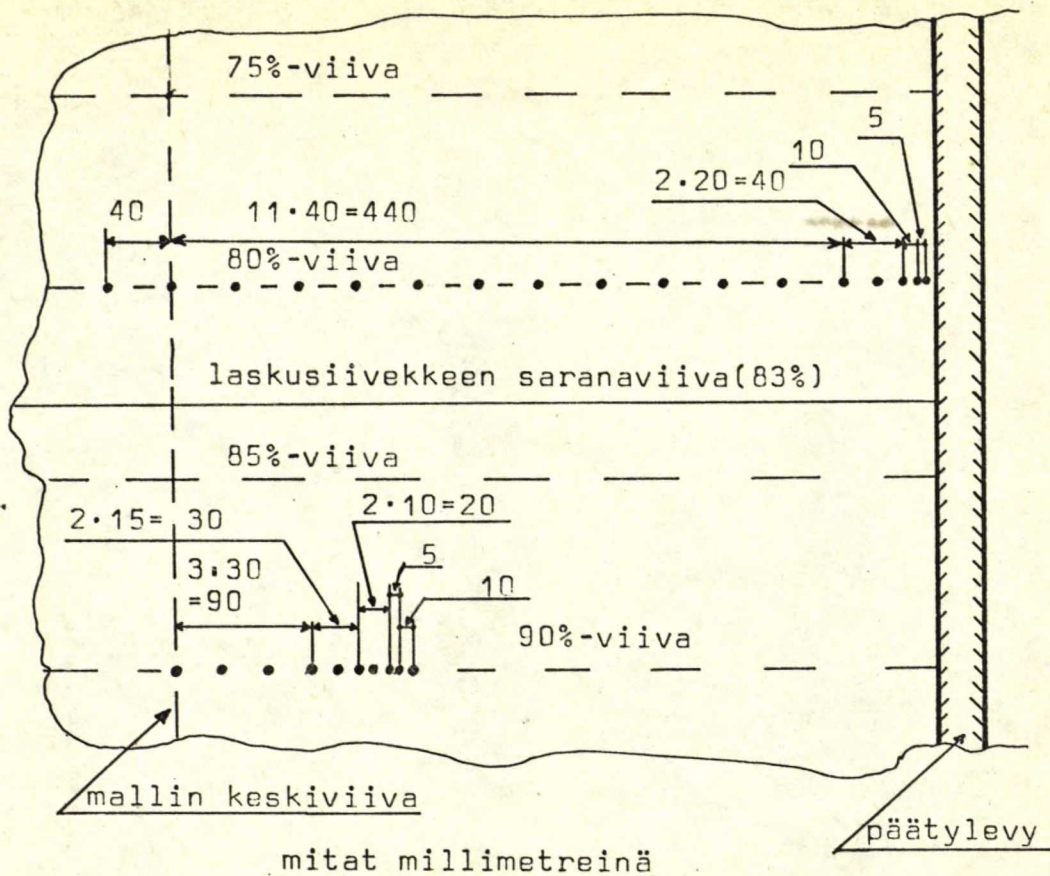
Muotti, jossa laminointi suoritettiin, oli tehty sekä tuulitunnelimallin valmistusta että muotti- ja mallitekniikan kokeilua varten. Mallin pintaväriksi valittiin virtauskokeita varten tummanharmaa epoksiväri. Tilapäisen materiaalipuutteen vuoksi jäi pinnoite kuitenkin aiottua vaaleammaksi. Väriin sivelyn jälkeen laminoitiin kaksi kerrosta lasikuitukangasta. Näin syntyneen n. 1 mm paksun pinnan alle liimattiin mallin puoliskojen keskelle sekä 80%:n ja 90%:n kohdille kärkivälin suunnassa 1/8-tuuman paksuiset ja n. 80 mm pitkät, toisesta päästään suljetut kupariputket. Liimaus suoritettiin hartsi-lasijauheseoksella ja putket asetettiin paikoilleen mallikaarien avulla. Putkien asemat selviävät kuvista 1 ja 2. Prosenttiluvut viittaavat alkuperäiseen jännteeseen. Jos halutaan paikat todellisen jänteen mukaan laskettuina, täytyy koordinaatit jakaa luvulla 0,99. 98%:n kohdalla sijaitsevat putket jouduttiin tilan puutteen vuoksi sijoittamaan päittäin mallin keskiviivan molemmille puolille.

Profiilin FX67-K-170 koordinaatit (lähde /26./) selviävät liitteen II taulukosta 2.



FX67-K-170

Kuva 1 Painereikien sijoittelu ja laskusiivekkeen rakenne

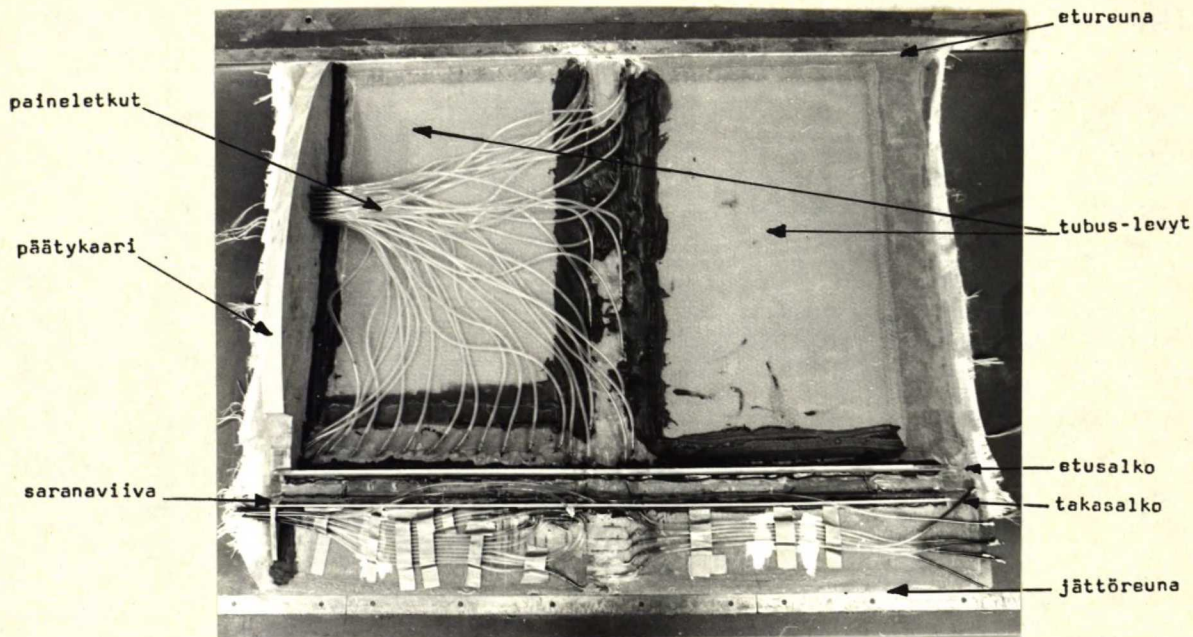


Kuva 2 Painereikien sijainti kärkivälin suunnassa

Koska mallin ainoat kaaret ovat 50 mm:n vanerista tehdyt päätykaaret, jäykistettiin keskiviivan molemmille puolille jääviä levykenttiä 10 mm paksulla "tubus"-levyllä. Laskusiivekkeen osuudelle ei levyä sijoitettu profiilin mataluuden vuoksi. Paineputkien kohdalla levyjen välissä oleva alue ja päätykaarrien reunat vahvistettiin hartsi-lasijauhemassalla.

Alapinnan saranaviiva sahattiin auki ja sopivasti työstettyyn tilaan liimattiin 6 kpl n. 100 mm pituista "pianosaranan" kappaletta. Saranaviivan kohtaa jäykistettiin sen molemmille puolille sijoitettujen vanerisalkojen avulla. Pinnan paineputket liitettiin päätykaarissa oleviin vastaaviin läpivienteihin muoviletkuilla ja liitosten tiiviys varmistettiin varmistuslangalla. Havainnollisuuden vuoksi on ku-

vassa 3 esitetty mallin alapuoli ennen yhteenliimausta.



Kuva 3 Mallin alapuoli ennen yhteenliimausta

Yhteenliimaus suoritettiin hartsi-lasijauheseoksella. Muotista irroituksen jälkeen sahattiin laskusiiveke irti myös yläpinnalta. Erillisen työkalun avulla laminoitiin siivekkeen yläpintaan ympyränkaaren osasta muodostuva tiivisteosa ja paineputket siihen (ks. kuva 1).

Päätykaariin liimattiin laakeritapit; toinen profiilin 1/4-viivalle ja toinen tästä 450 mm taaksepäin. Molemmat tapit ovat 20 mm profiilin jänteeltä ylöspäin.

Koska muotti ei ollut aivan virheetön, jouduttiin mallia hiomaan ja korjailemaan yhteenliimauksen jälkeen normaalia enemmän. Pinnan laadusta saatiin kuitenkin niin hyvä, että aaltomaisuus mallin keskikohdalla oli pienempi kuin 0,03 mm 50 mm:n matkalla. S. L a i n e (lähde/23./) on antanut aallon korkeuden ja pituuden suhteelle raja-arvon 0,002...0,004. Em. luvuilla tulee suhteen arvoksi 0,0006,

joten vaatimus tulee selvästi täytetyksi. D o e n h o f f ja H o r t o n (lähde /19./s. 16) ovat asettaneet pienen painegradientin omaavan profiilin pinnan karheudelle jyväs-kokoon perustuvan kriittisen Reynoldsin luvun (Re):

$$Re_{\text{krit}} = \frac{U_o d}{\nu} = 680 \quad (2.1.1.)$$

(ks. liite V)

Tässä on

d = jyväsen halkaisija

ν = kinemaattinen viskositeetti = $1,37 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$

U_o = häiriintymättömän virtauksen nopeus (maksimi 55 m/s)

Kun tästä ratkaistaan d ja sijoitetaan arvot, saadaan:

$$d_{\text{krit}} = \frac{\nu \cdot 680}{(U_o)_{\text{max}}} = 0,17 \text{ mm}$$

Mallin pinnan viimeistelyn jälkeen, joka suoritettiin vesihiontapaperilla n:o 600, voitiin pelkästään silmämääräisesti todeta, että saavutettu pinnan karheus oli huomattavasti vaadittua parempi, joten karheutta ei mitattu.

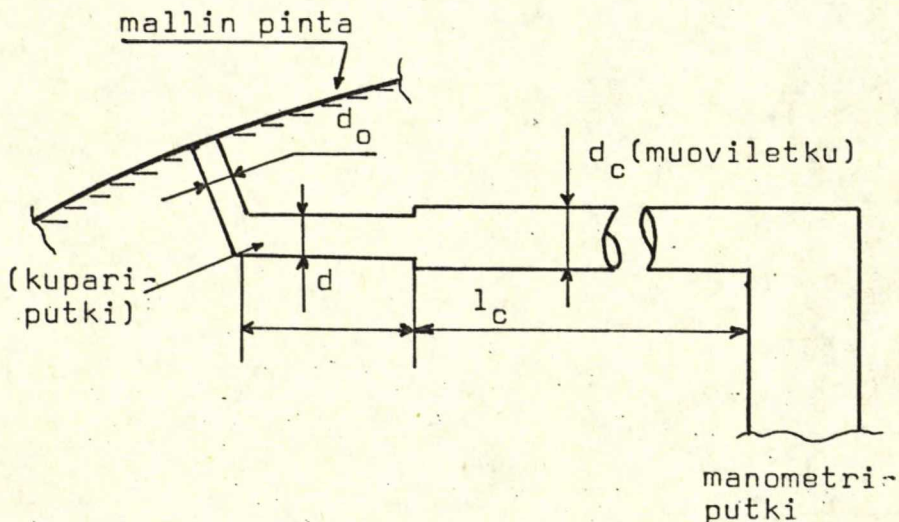
Mallin etureunan tarkkuus tarkastettiin 15%:iin asti "naaraspuolisen" mallikaaren avulla.

2.2. Painereiät

Painereiät porattiin laminaatin läpi kupariputkiin käsivaralla. Koska käytetyssä kirjallisuudessa ei ollut mainintaa siitä, että pieni poikkeama pinnan normaalin suunnasta aiheuttaisi virhettä staattisen paineen lukemaan, katsottiin, että käsivaraisesti suoritettu poraus oli riittävä. Tärkeintä reiän poraamisessa on se, ettei reunoihin synny lohkeamia tai jää jäysteitä, jotka vaikuttaisivat mittaus-tulokseen. Reikien laatuun kiinnitettiin erityistä huo-

miota. Porauksen jälkeen tarkistettiin painereikien paikat ja havaittiin, että virhe x-koordinaatissa vaihteli välillä $-2,7...+1,3$ mm, jotka olivat kuitenkin ääritapauksia. Normaali virhe oli luokkaa $\pm 0,4$ mm. Koska kuitenkin suhteellinen virhe profiilin kärjessä olisi ollut n. 10%, suoritettiin painereikien x-koordinaattien korjaus.

Reiän halkaisija ja siirtoletkujen dimensiot tarkistettiin G o r l i n i n & S l e z i n g e r i n (lähde /2./s. 310) esittämän kriteerin mukaan:



Kuva 4 Mallin paineletkujen mitoitus

Manometrijärjestelmissä syntyvä viive johtuu pääasiassa putkien vastuksesta, ilman tiheyden muutoksista ja liikkuvien massojen hitauksista. Jos järjestelmässä ei ole vuotoja, syntyy letkuissa virtausta vain paineen muuttuessa eli manometrin nestepatsaan liikkuessa. Virtausvastuksen vuoksi tulisi letkujen olla mahdollisimman lyhyet ja niiden halkaisijoiden suuret. Koska sekä virtausvastus että tilavuus vaikuttavat

viiveeseen eli manometrin asettumisaikaan, on letkujen dimensioilla tietty optimiarvo. Toisaalta virtausvastuksesta on hyötyä esimerkiksi värähtelyjen vaimentajana. Käytännön syistä tulee letkujen pituudeksi 6-8 m, joten ainoaksi muuttujaksi jää halkaisija.

Siirtoletkun optimihalkaisija, $(d_c)_{opt}$, riippuu mallin pinnalla olevan putken halkaisijasta (d) seuraavasti:

$$(d_c)_{opt} = (1,25 \dots 1,5)d \quad (2.2.1.)$$

Mallin pinnalla olevan painereiän halkaisijalla (d_o) ei ole vaikutusta viiveeseen, mikäli

$$d/d_o < 2,5$$

d :n ja d_o :n suuruudet valittiin varastotilanteen mukaan:

$$d = 1,3 \text{ mm}$$

$$d_o = 0,8 \text{ mm}, \text{ jolloin}$$

$$\frac{d}{d_o} = 1,63 < 2,5 \quad \text{ja}$$

$$(d_c)_{opt} = 1,6 \dots 2,0 \text{ mm}$$

Siirtoletkun halkaisijaksi (d_c) valittiin 3 mm. Optimista jouduttiin poikkeamaan kupariputken ulkohalkaisijan (3 mm) johdosta. G o r l i n i n & S l e z i n g e r i n (lähde /2./s. 166) mukaan 0,8 mm halkaisijaltaan olevan staattisen paineen reiän aiheuttama prosentuaalinen virhe vapaan virtauksen dynaamisesta paineesta on n. 0,4%, joten tässä suhteessa saavutetaan riittävä tarkkuus, vaikka halkaisija onkin suositeltua arvoa (0,2...0,5 mm) suurempi.

Reikien sijainnin valinnassa otettiin huomioon sekä G o r l i n i n (lähde/2./s.452) että P a n k h u r s t i n & H o l d e r i n (lähde/1./s. 272) suositukset. Kahta manometriä käyttämällä voitiin kuitenkin valita huomattavasti

enemmän pisteitä. Pisteitä sijoitettiin tiheämmin sinne, missä paineen muutokset olivat suurimmat.

2.3. Päätylevyt

Koska mallin kärkiväli ja siten sivusuhte ovat äärelliset, on koko mallilla saavutettava nostovoimakertoimen kaltevuus profiilin todellista arvoa pienempi. Tehollista sivusuhdetta voidaan kuitenkin suurentaa päätylevyjen avulla: mitä suuremmat päätylevyt, sitä lähempänä virtaus on ideaalista, kaksidimensionaalista tapausta. Tehokkain tapa olisi sijoittaa malli tunnelin lattiasta kattoon ulottuvien päätylevyjen väliin. Koska mittaukset suoritettiin painemittauksina mallin keskeltä, oli tarpeen saada aikaan kaksidimensionaalinen tila vain riittävän leveälle osalle keski-
viivan molemmin puolin.

Malli varustettiin ellipsin muotoisilla päätylevyillä, joiden materiaalina oli 30 mm paksuinen vaneri. Schlichting & Truckenbrodtin kirjassa (lähde /7./ s. 360) on esitetty korkeusperäsimen teorian yhteydessä päätylevyjen vaikutus nostovoimakertoimen kaltevuuteen. Tätä hyväksi käyttäen arvioitiin päätylevyjen vaikutusta seuraavasti:

Päätylevyjen vaikutus mallin teholliseen sivusuhteeseen (A_H) voidaan arvioida seuraavan kokemusperäisen yhtälön avulla:

$$A_H = A \left(1 + 0,5 \frac{b_s l_s}{c^2} \right) \quad (2.3.1.)$$

Tässä on

A_H = tehollinen sivusuhte

A = geometrinen sivusuhte

c = mallin jänne

b_s, l_s = ellipsin pähalkaisijat (ks. kuva 5)

Koska liian suuret päätylevyt ^{estivät} mallin tarkkailun ajojen aikana, päädyttiin arvoihin

$$l_s = 1,3 \text{ m}$$

$$b_s = 1,0 \text{ m}, \text{ jolloin}$$

$$A_H = 2,1$$

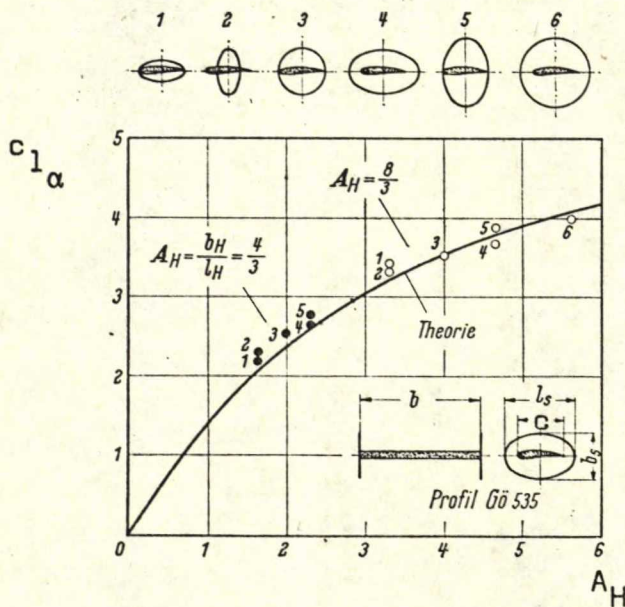
Tässä on

$$A = 1,14$$

$$c = 0,875 \text{ m}$$

Kuvasta 5 saadaan nostovoimakertoimen kaltevuudelle ($c_{1\alpha}$)

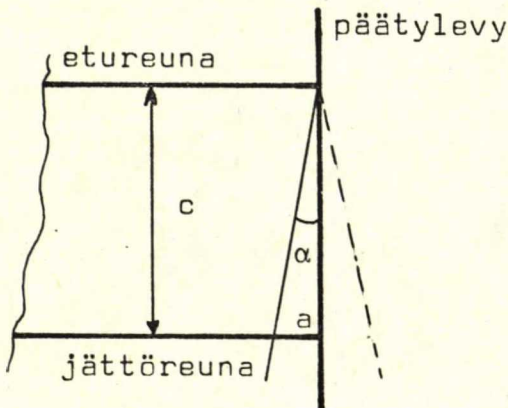
arvo $c_{1\alpha} = 2,5$



Kuva 5 Nostovoimakertoimen kaltevuuden ($c_{1\alpha}$) riippuvuus mallin tehollisesta sivusuhteesta (A_H)

Tämän katsottiin riittävän (vrt. lähde /21./s. 3), kun vielä tarkistettiin, ettei päätylevyn ja profiilin etureunan yhtymäkohdassa mahdollisesti syntyvä häiriö ulotu painereikiin asti. Häiriö etenee kirjallisuudessa esiintyvien tie-

tojen (esim. lähde /18./s. 4) mukaan n. 21° :een kulmassa. Häiriön leveys (a) jättöreunalla saadaan kuvan 6 mukaan:



Kuva 6
Häiriön leveys
jättöreunalla

$$a = c \cdot \tan(\alpha), \text{ missä } \begin{cases} c = 875 \text{ mm} \\ \alpha = 10,5^{\circ} \end{cases}$$

Sijoituksen jälkeen saadaan

$$a = 162 \text{ mm}$$

Koska mallin kärkiväli on 1000 mm, jää jättöreunan keski-osalle n. 680 mm leveä häiriötön alue.

Päätylevyjien reunat pyöristettiin, ja levyt kiinnitettiin mallin päätykaariin puuruuveilla siten, että profiilin jänne sijaitsi ellipsin vaaka-akselilla ja em. janojen keskipisteet yhtyivät.

Päätylevyjien läpi tuotiin kiinnitystappien ja paine-liittimien lisäksi laskusiivekkeeseen liimatut ruuvitapit, joiden avulla siiveke lukittiin haluttuun asentoon. Lukitus tapahtui kitkan avulla päätylevyihin, ja sen havaittiin olevan hyvä ja yksinkertainen menetelmä.

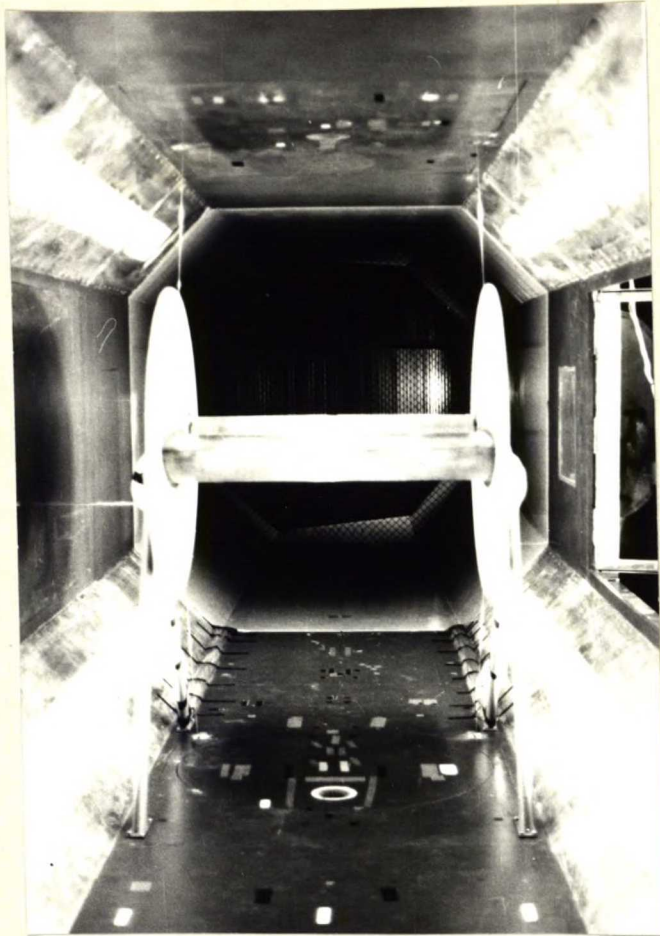
2.4. Mallin ripustus tunneliin

Malli kiinnitettiin etukiinnityspisteistään tunnelin lattiaan profiloidusta teräksestä valmistettujen kolmiojalokojen avulla. Takakiinnityspisteistään malli ripustettiin

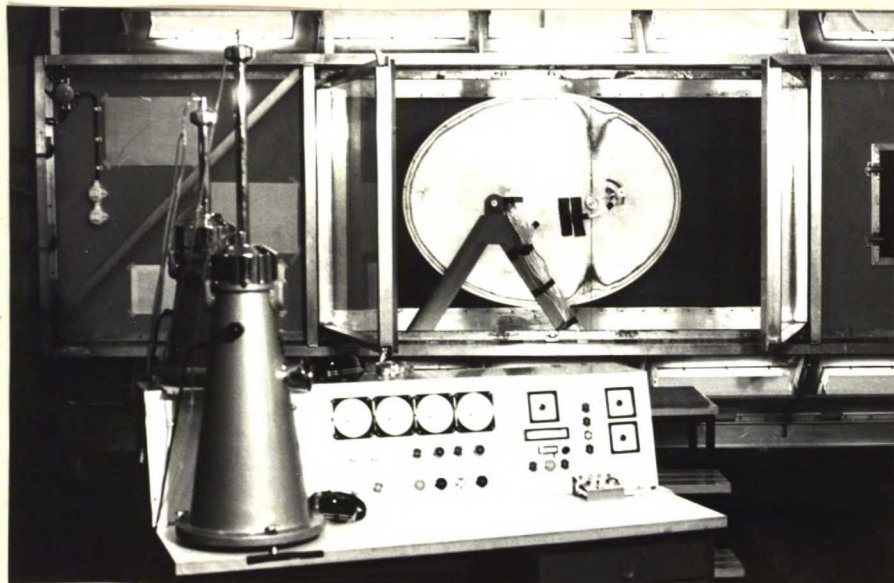
pianolangoilla (\emptyset 1,8 mm) tunnelin vaa'an momenttivaakaan, johon yhdistetyn suunnikasmekanismin avulla saatiin aikaan kohtauskulman säätö. Värähtelyjen vaimentamiseksi ripustettiin kumpaankin takakiinnityspisteeseen veteen upotetut, 20 kg:n suuruiset vastapainot. Etenkin suurilla siivekekulmilla oli odotettavissa voimakasta värähtelyä, minkä vuoksi tehokas vaimennus oli tarpeen.

Malli ripustettiin tunneliin ylösalaisin, jottei kolmiojalkojen kiinnitysruuveihin kohdistuisi vetorasitusta. Ripustustapa oli edullinen myös mallin värähtelyjen kannalta, koska momenttivaakaan kiinnitetyissä langoissa säilyi vetojännitys kohtauskulman kasvaessa.

Syntyviä kokonaisvoimia arvioidaessa käytettiin A l t h a u s i n (lähde/24./) mittaustuloksia FX67-K-170 -profiilille. Rakenteet mitoitettiin varmuuskertoimella 2,5. Lankoja mitoitettaessa käytettiin L e m m e t y i s e n diplomityötä (lähde /5./s. 15). Lankojen mitoitus varmistettiin vielä vetokokeilla, jolloin todettiin, että varmuuskerroin oli suurempi kuin 8. Varmuuskerroin saattaa tuntua suurelta, mutta on otettava huomioon, että langat joutuvat mallin värähdelleessä alttiiksi kuormanvaihteluille ja niillä on taipumus kristallisoitua ajan mittaan. Lankojen silmukkapäätteet tehtiin käsin, joten laatu ei ollut tasaista. Suurella varmuuskertoimella voitiin eliminoida em. epävarmuustekijät. Kuvassa 7 on esitetty malli ripustettuna tunneliin myötävirtaan katsottuna ja näkymä ohjauspöydältä mittatilaan.



Kuva 7a Malli tunnelissa myötävirtaan katsottuna



Kuva 7b Näkymä ohjauspöydältä mittatilaan

3. VIRTAUSKOKEET

3.1. Yleistä

Aerodynaamisten ilmiöiden ymmärtämisen helpottamiseksi ja kvantitatiivisten tulosten tarkistamiseksi on usein hyödyllistä saada kappaleen ohi tapahtuva virtaus näkyvään muotoon. Virtauksen visualisoimisen tärkeimpiä käyttöaloja on rajakerroksen tutkiminen. Tällöin saadaan yksinkertaisella tavalla selville rajakerroksen luonne (onko rajakerros laminaarinen vai turbulenttinen), muutoskohdan sijainti sekä mahdollinen virtauksen irtoaminen ja uudelleen kiinnittyminen. Näiden tietojen avulla voidaan pääpiirteissään selvittää tarkasteltavan kappaleen käyttäytyminen virtauksessa.

Virtauksen visualisointimenetelmät perustuvat yleensä valon heijastumiseen ja taittumiseen. Hyvälle visualisointimenetelmälle on W. E. Gray (lähde /9./s. 4) asettanut seuraavat 10 vaatimusta:

- 1) Menetelmän tulee olla kaksidimensionaalinen (pinta-alan tutkiminen).
- 2) Se ei saa muuttaa pinnan karheutta (ei lisätä eikä vähentää).
- 3) Sillä ei saa olla nopeusrajoituksia.
- 4) Sitä on voitava käyttää missä tahansa mallin osassa.
- 5) Sen on oltava näkyvissä ajon aikana ja/tai säilyttävä riittävän kauan mittauksia varten ajon jälkeen.
- 6) Sen tulisi olla jatkuvatoiminen (palautuva) tai se on

kyettävä rekisteröimään ilman, että tunneli joudutaan pysäyttämään kokeiden välillä.

- 7) Sen on oltava nopea, yksinkertainen ja luotettava.
- 8) Se ei saa vaatia pinnan erikoiskäsittelyä, joka voi vahingoittaa kokeiden aikana.
- 9) Se ei saa olla epämiellyttävä tai vahingollinen käyttäjille eikä laitteistolle.
- 10) Tunnelin vaadittavan käyntiajan tulee olla lyhyt.

Virtaustarkasteluissa on tärkeää erottaa toisistaan rajakerroksen paksuneminen, muutoskohta sekä virtauksen irtoaminen ja kiinnittyminen. Laminaarinen rajakerros ei tavallisesti paksune nopeasti tulematta turbulenttiseksi tai irtautumatta. Jos irtoamista ei tapahdu, on virtaus pinnan läheisyydessä päävirtauksen suuntaista ja rajakerroksen paksuuden kasvamiseen liittyy diffuusionopeuden kasvaminen, ts. kaasukerrostien sekoittuminen toisiinsa rajakerroksessa lisääntyä, mikä puolestaan kiihdyttää haihtymista. Tätä ei kuitenkaan ole aina helppo havaita. Muutoskohtaan liittyy selvä diffuusionopeuden lisääntyminen, joka voidaan tavallisesti todeta sataprosenttisella varmuudella. Diffuusionopeus vaihtelee myös paikallisen nopeuden myötä: mallin etureunalla, jossa nopeusgradientti on suuri, on suuri diffuusionopeus. Mikäli irtoamista tapahtuu, on virtaus välittömästi irtoamiskohdan jälkeen päävirtauksen suuntaan nähden vastakkainen. Irronneessa laminaarisessa virtauksessa on diffuusionopeus pienempi kuin kiinnittyneessä laminaarisessa virtauksessa, samoin on laita turbulenttisessakin tapauksessa. Sen sijaan on vaikea asettaa suuruusjärjestykseen irronneen laminaarisen

ja irronneen turbulenttisen virtauksen diffuusionopeuksia. Nämä tapaukset voidaan kuitenkin erottaa toisistaan alueiden sijainnin perusteella.

Rajakerroksen tutkimiseen yleisimmin käytettävät visualisointimenetelmät ovat:

- savu
- kemiallisesti aktiivinen kaasu
- kiinteän aineen höyrystyminen
- öljymenetelmä
- "china-clay" -menetelmä
- nestekalvomenetelmä ("Liquid film")
- lankatupsut

Savu: tunnelin virtaukseen tai kappaleen rajakerrokseen tuodun savun avulla voidaan seurata virtaviivojen kulkua.

Edut

- jatkuva ilmaisu
- havainnollisuus
- muitakin käyttöaloja kuin rajakerrostutkimukset

Haitat

- kuvaamista varten vaaditaan valaistuksen erikoisjärjestelyjä
- savunkehityslaitteet monimutkaisia
- savun tuominen rajakerrokseen aiheuttaa helposti häiriöitä
- yksidimensionaalinen
- ei sovellu suurille nopeuksille eikä turbulenttiseen virtaukseen
- usein syövyttävä ja myrkyllinen

Kaasu: malli päällystetään aineella, joka reagoi virtaukseen tai rajakerrokseen tuotuun kaasuun ja värjäytyy tai vär-

jää kaasun.

- Edut
- voidaan saada jatkuvaksi
 - voidaan käyttää rajoitetusti myös lentoko-
keissa
 - ei nopeusrajoituksia
 - ei valaistuksen erikoisjärjestelyjä
- Haitat
- kaasun tuoton aiheuttamat häiriöt
 - rajoitetusti kaksidimensionaalinen tai yk-
sidimensionaalinen
 - syövyttävä

Höyrystyminen: liuoksen avulla mallin pinnalle levitetty
kiinteä aine höyrystyy nopeammin turbulenttisesta raja-
kerroksesta kuin laminaarisesta.

- Edut
- kaksidimensionaalinen
 - ei nopeusrajoituksia
- Haitat
- vaatii valaistuksen erikoisjärjestelyjä,
huono kontrasti
 - vaikuttaa pinnan karheuteen
 - ei jatkuva

Öljy: öljyn ja väriaineen seos levitetään kappaleen pinnal-
le, seos asettuu virtaviivojen suuntaan.

- Edut
- havainnollinen, ei valaistusjärjestelyjä
 - kaksidimensionaalinen
- Haitat
- vaikuttaa pinnan karheuteen
 - painovoima saattaa muuttaa virtaviivojen
suuntaa helposti
 - tulkitseminen vaatii huomattavasti kokemusta
 - ei jatkuva

"China-clay": haihtuvaan nesteeseen sekoitetaan suunnilleen saman taitekertoimen omaavaa savea (kaoliinia), jolloin saadaan kirkas seos. Kun neste haihtuu ensin turbulenttisesta rajakerroksesta, tulee valkoinen kaoliini näkyviin.

- Edut
- erottuu hyvin
 - koe helppo uusaa kastelemalla koko pinta uudestaan
 - kaksidimensionaalinen
- Haitat
- jyvääskoko suhteellisen suuri ja levitettävä kerros paksu, minkä vuoksi seos lähtee usein virtaamaan kappaleen pinnalla suurilla nopeuksilla
 - tukkii helposti mahdolliset painereiät
 - ei jatkuva

Nestekalvo: mallin pinnalle levitetään nestekalvo, joka haihtuu nopeammin turbulenttisesta kuin laminaarisesta rajakerroksesta.

- Edut
- ohut, tasapaksu kerros
 - "siisti", helppo levittää
 - ei tuki painereikiä
 - ei nopeusrajoituksia
 - kaksidimensionaalinen

- Haitat
- ei jatkuva
 - heikko kontrasti

Tupsut: mallin pintaan kiinnitetään teipillä sopivin välein 1-2 cm pitkiä lankatupsuja, joiden värähtelyistä voidaan päätellä rajakerroksen luonne.

- Edut - havainnollinen
- suhteellisen helppo kuvata
- jatkuva ilmaisu
- Haitat - lankoja ei voida asettaa kyllin tiheästi,
 joten tulos on rajoitetusti kaksidimensio-
 naalinen
- aiheuttaa häiriöitä rajakerrokseen

Edellä olevassa ei ole puututtu eri menetelmien tarkkuuteen, koska kirjallisuudessa on siitä sangen ristiriitaisia tietoja. Tarkan tuloksen saamiseksi olisi indikaation säilyttävä tunnelin pysäytyksen jälkeen mittauksia varten. Tarkimpia ovat nestekalvo- ja kaasumenetelmät muiden ollessa sopivia virtauksen yleisen luonteen selvittämiseen ja demonstraatioihin. Eri menetelmien käyttöominaisuuksista ja sovellutusaloista on myös jonkin verran ristiriitaisia tietoja.

Rajakerroksen paksuuden kasvamista voidaan tutkia ainoastaan savutekniikalla. Turbulenttisen rajakerroksen paksuimilla osilla savu harvenee kuitenkin niin paljon, että erottaminen on vaikeaa.

Muutoskohdan tutkimiseen soveltuvat kaikki muut edellä mainitut menetelmät paitsi öljytekniikka, jonka antama tulos on epävarma. Langoilla saatava tulos on, kuten jo edellä todettiin, epäjatkuva.

Jos halutaan tutkia irtoamista, saadaan öljy-, savu- tai lankatekniikalla yleiskuva; irtoamis- ja kiinnittymiskohdan tarkempi sijainti saadaan kaasu- tai nestekalvomenetelmällä.

Kappaleen pinnan painejakautuman avulla voidaan myös tehdä johtopäätöksiä rajakerroksen virtauksen luonteesta.

Muutoskohta on yleensä paineminimin eli nopeusmaksimin jälkeen. Jatkuvasti nouseva tai laskeva paine ilmaisee, että virtaus on kiinni. Jos paine pysyy käytännöllisesti katsoen vakiona, siellä, missä sen tulisi muuttua, voidaan olettaa irtoamisen tapahtuneen.

Tässä työssä suoritettiin virtaustutkimus kahdella toisiaan täydentävällä tavalla: lanka- ja nestekalvomenetelmällä. Lankakokeilla saadaan määritetyksi muutoskohdan ja virtauksen irtoamiskohdan sijainti kohtauskulman funktiona. Nestekalvotekniikalla voidaan poimia muutamia pisteitä, joissa saadaan muutoskohdan tarkka sijainti.

3.2. Lankakokeet

3.2.1. Kokeen suoritus

Mallin pinnalle kiinnitettiin ohuella teipillä kärkivälin suuntaisia tupsurivejä tasaisin välein jänteen suunnassa. Ensimmäinen rivi oli 20%:n kohdalla, seuraavat siitä taaksepäin 10%:n välein. 80%:n kohdalta lähtien välit supistettiin 5%:ksi. Tupsurivit olivat n. 15 cm pitkiä ja ne sijoitettiin lomittain häiriöiden pienentämiseksi. Likimain 2 cm pitkät langanpätkät olivat valkoista, ohuista säikeistä punottua keinokuitulankaa.

Kohtauskulmaa hitaasti suurennettaessa rekisteröitiin virtauksessa tapahtuvat muutokset. Muistiin merkittiin ne kohtauskulmat, jolloin

- a) virtaus irtosi ensimmäisen kerran
- b) virtaus oli irronnut laskusiivekkeen koko yläpinnalta
- c) irronneen virtauksen raja yläpinnalla oli 40-60%:n kohdalla (yleensä tapahtui äkillinen irtoaminen)

Näissä kohdissa rekisteröitiin myös kevyen ja voimakkaan turbulenssin rajat. Taulukossa 1 on esitetty ne Reynoldsin luvut ja laskusiivekkeen poikkeutuskulmat, joilla kokeet suoritettiin.

Taulukko 1 Lankakokeissa tutkitut Reynoldsin luvut (Re) ja siivekepoikkeutuskulmat (δ) (merkitty x:llä)

δ /aste	-8	-4	0	4	8	15	20	50	70	90
Re $\cdot 10^{-6}$										
0,78		x	x	x	x	x	x		x	x
1,1		x	x	x	x	x	x	x	x	x
1,4	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
1,7	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
2,2	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
2,8	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
3,4	x	x	x	x	x	x	x	x	x	
3,9	x	x	x	x	x	x				

Huom. Reynoldsin luvuissa on otettu huomioon kohdan 4.2.2.

mukaiset tuulitunnelikorjaukset.

Kaikissa kokeissa, mukaan lukien painemittaukset, olivat alapinnan saranaviiva ja siivekkeen lukitusmekanismin rako teipattuina umpeen, jottei paineen tasaantumista pääsisi tapahtumaan.

3.2.2. Kokeen tulokset

Lankojen liike voitiin jakaa kolmeen eri ryhmään:

- kevyt turbulenttisuus, jolloin lanka värähteli n. $\pm 10^\circ$

kulmassa

- voimakas turbulenttisuus, jolloin lanka värähteli n.

$\pm 30^\circ$ kulmassa ja langan kärki

taipui huomattavasti yli tä-

män kulman

- käänteinen virtaus, jolloin langan suunta oli vastakainen tunnelin virtauksen suunnalle ja lanka värähteli voimakkaasti

Käänteinen virtaus ilmoittaa virtauksen irronneen. Virtauksen äkillinen irtoaminen oli helppo huomata, mutta jos irtoaminen tapahtui vähitellen, oli usein vaikea määrittää voimakkaan turbulenssin ja käänteisen virtauksen välisiä rajaa. Kohtauskulman havainnointitarkkuus oli tällöin n. $\pm 3^\circ$, koska koesarjoja ei toistettu, ei tuloksista voida tehdä yksityiskohtaisia johtopäätöksiä, mutta virtauksen luonne selvisi hyvin. Useissa tapauksissa, etenkin silloin kun virtaus irtosi äkkiä, tulokset yhtyivät kuvien 15 ja 16 (s. 59, 60) painejakautumakäyristä saataviin tuloksiin.

a) Yläpinnan virtaus

Pienimmällä Reynoldsin luvulla ($0,8 \cdot 10^6$) ei virtauksen irtoamista ollut havaittavissa suurillakaan kohtauskulmilla kuin ainoastaan laskusiivekkeen osuudella. Siivekekulmilla $-8^\circ \dots 0^\circ$ ja $70^\circ \dots 90^\circ$ pyrki virtauksen irtoaminen alkamaan siivekkeen keskeltä tai heti siivekkeen alusta ($X = 83 \dots 90\%$) leviten siitä molempiin suuntiin. Muilla siivekekulmilla alkoi irtaantuminen mallin jättöreunasta. Suunnilleen samoilla siivekekulmilla ($-8^\circ \dots 0^\circ$ ja $20^\circ \dots 50^\circ$) ja Reynoldsin luvulla $\geq 1,7 \cdot 10^6$ virtaus irtosi yhtäkkiä aina 70...80%:iin asti kevyen turbulenssin ulottuessa tällöin n. 60%:iin saakka. Irtonneen virtauksen raja ei siirtynyt tästä eteenpäin kohtauskulmaa suurennettaessa, kevyen ja voimakkaan turbulenssin rajat sen sijaan etenivät 20%:iin ja 60%:iin asti. Vastaavasti,

ts. kun on ylitetty maksiminostovoimakerrointa vastaava kohtauskulma, ei profiilin nostovoimakerroin pienene nopeasti, vaan pysyy lähes vakion suuruisena.

Siivekekulman arvoilla 4° ... 15° profiilin yläpinnan virtaus oli silmiinpistävän tasaista ja kaikki muutokset tapahtuivat vähitellen. Termiikkilennossa käytetään juuri tämän alueen poikkeutuskulmia, joten lento-ominaisuudet ovat tältä kannalta katsoen hyvät.

Kun siivekekulma ylittää 36° , avautuu yläpinnalle rako (ks. kuva 1). Raon avautuminen ei kuitenkaan sanottavasti vaikuta virtauksen irtoamiseen, turbulenssirajoihin kylläkin.

b) Alapinnan virtaus

Alapinnan virtauksessa ei ole havaittavissa turbulenssia arvoilla $\sigma = -8^{\circ}$... 8° . Kun siivekekulma oli välillä 15° ... 20° , oli pienillä kohtauskulmilla aina 75%:iin asti kevyttä turbulenssia, joka rauhoittui kohtauskulman kasvaessa. Sama ilmiö oli havaittavissa suuremmilla siivekekulmilla Reynoldsin lukuun $1,1 \cdot 10^6$ asti. Suuremmilla Re-luvuilla virtaus irtosi saranaviivan ympäristöstä, jolloin kevyttä turbulenssia oli n. 50%:iin asti. Kohtauskulman suuretessa siirtyivät turbulenssirajat jättöreunaan päin irronneen alueen supistuessa saranaviivan kohdalle. Virtauksen käyttäytyminen oli kaikissa olosuhteissa rauhallista.

c) Päätylevyjen vaikutus

Aivan päätylevyjen läheisyydessä voitiin havaita häiriöitä virtauksessa. Ne olivat kuitenkin huomattavasti kuvan 6

perusteella määrättyjen rajojen sisäpuolella.

3.3. Nestekalvokokeet

3.3.1. Kokeen suoritus

Kokeessa käytetty neste oli paloöljyn ja White-spiritin seos. Seossuhde vaihteli seoksesta 90% paloöljyä, 10% white-spiritiä seokseen, jossa oli 10% paloöljyä ja 90% white-spiritiä. White-spirit lisäsi nesteen haihtuvuutta, joten suuria white-spirit -määriä käytettiin pienillä nopeuksilla. Kontrastia yritettiin lisätä nesteeseen sekoitetun kimröökin avulla, mutta tästä ei ollut paljonkaan apua.

Neste levitettiin tasaisesti mallin molemmille pinnoille kangastilkun avulla. Turbulenttisen rajakerroksen kohta kuivui n. 1-3 minuutissa tunnelin käynnistämisestä. Märäksi jäänyt osa kiilteli, kun taas haihtuneella osalla tuli mallin matakasi hiottu pinta selvästi esille. Alueiden välinen raja voitiin erottaa yleensä hyvin selvästi. Tunnelin kiinteiden valaisimien antama valaistus ei soveltunut tämän kokeen tulosten valokuvaamiseen, joten siitä luovuttiin.

Kokeet suoritettiin taulukossa 2 annetuilla laskusiivekkeen poikkeutuskulmilla ja Reynoldsin luvuilla.

Taulukko 2 Nestekalvokokeissa tutkitut laskusiivekkekulmat (σ) ja Reynoldsin luvut (Re) (merkitty x:llä)

σ /aste	-8	0	20
Re $\cdot 10^{-6}$			
1,7		x	
2,8		x	x
3,9	x		

Näissä pyrittiin tutkimus ulottamaan nostovoimapolaarin merkitykselliselle osalle. Lisäksi tutkittiin joitakin hajapisteitä eri siivekekulman tai Reynoldsin luvun arvoilla. Ajan puutteen vuoksi jäivät nestekalvokokeet varsin suppeiksi.

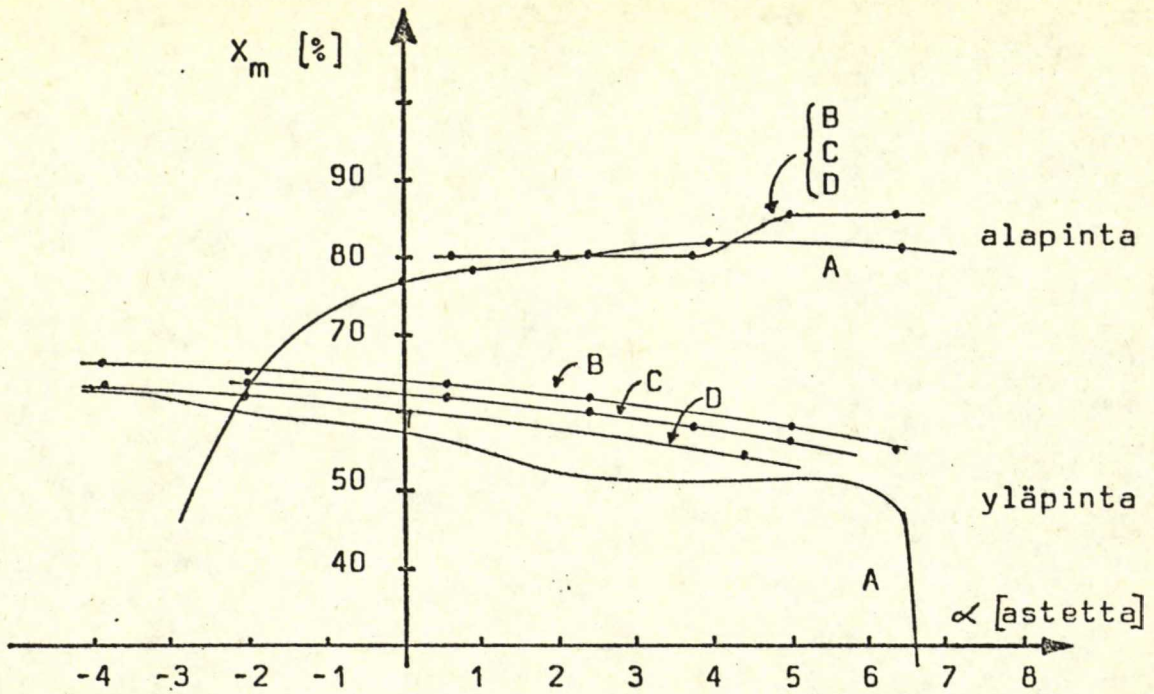
3.3.2. Kokeen tulokset

Kuvissa 8 ja 9 on esitetty muutoskohdan sijainti kohtauskulman funktiona eri siivekekulmilla. Koska siivekekulmalla 20° ei voitu ottaa huomioon kohdan 4.2.8. mukaista korjausta kohtauskulmaan nostovoimakertoimen puuttuessa (ks. kohta 5.3.3.), on kuvan 9 abskissa-akselina redusoimaton kohtauskulma. Jotta saataisiin vertailukohde kuvan 8 tuloksiin, on kuvaan 9 piirretty myös siivekekulmaa 0° vastaavat käyrät käyttäen redusoimatonta kohtauskulmaa. Kuvaan 8 on piirretty myös **A l t h a u s i n** mittaustulokset (lähde /24./).

Lähes kaikki saadut mittaustulokset ovat käyrien juohealta alueelta, johon ei kuulu **A l t h a u s i n** tuloksissa näkyviä äkillisten muutosten alueita. Tämä on otettava huomioon tuloksia tarkasteltaessa.

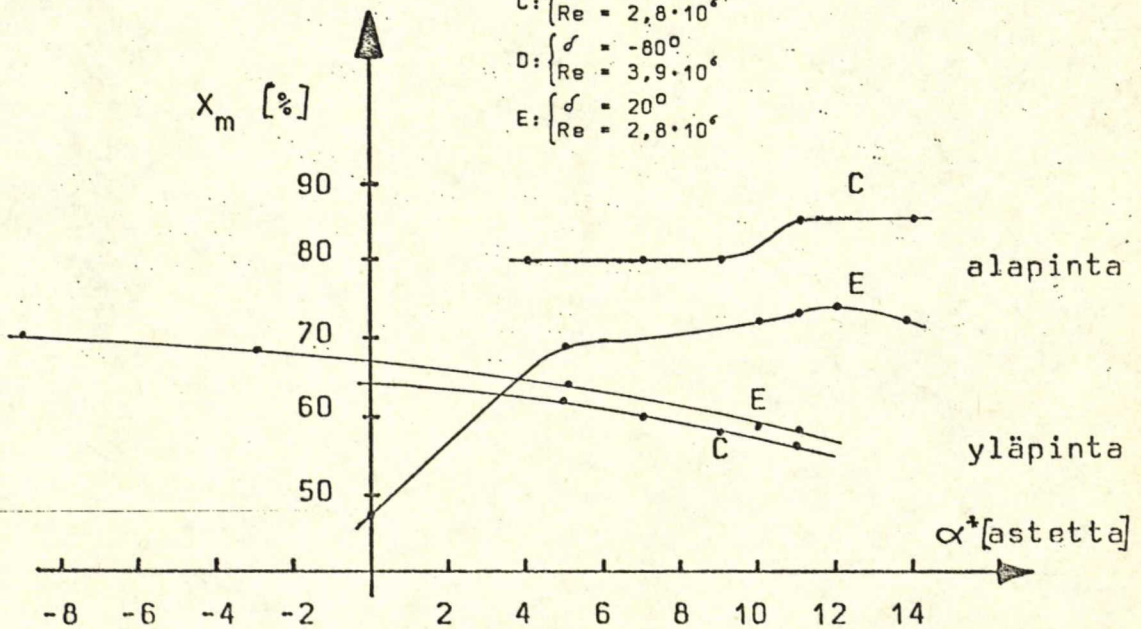
Koska koemateriaali jäi suppeaksi, ei kuvien perusteella voi tehdä yksityiskohtaisia johtopäätöksiä, mutta jos otetaan huomioon se, että lankakokeet tukevat näitä tuloksia, voidaan todeta seuraavaa:

Yläpinta: - Reynoldsin luvun vaikutus muutoskohdan sijaintiin tutkitulla alueella on n. 2%, mikä "nyrkkisäänön" mukaan vastaa samansuuruista muutosta profiilivastuskertoimessa.



Kuva 8 Muutoskohdan etäisyys profiilin kärjestä (X_m) kohtauskulman (α) funktiona eri siivekekulmil-la (σ) ja Reynoldsin luvuilla (Re)

- A: $\begin{cases} \sigma = 0^\circ \\ Re = 1,5 \cdot 10^6 \end{cases}$ (Althaus)
- B: $\begin{cases} \sigma = 0^\circ \\ Re = 1,7 \cdot 10^6 \end{cases}$
- C: $\begin{cases} \sigma = 0^\circ \\ Re = 2,8 \cdot 10^6 \end{cases}$
- D: $\begin{cases} \sigma = -80^\circ \\ Re = 3,9 \cdot 10^6 \end{cases}$
- E: $\begin{cases} \sigma = 20^\circ \\ Re = 2,8 \cdot 10^6 \end{cases}$



Kuva 9 Muutoskohdan etäisyys profiilin etureunasta (X_m) kohtauskulman (α^+) funktiona eri siivekekulmilla (δ)

Huom. α^+ :aan ei ole tehty kohdan 4.2.8. mukaista korjausta!

- Juohealla alueella riippuu muutoskohdan sijainti lähes lineaarisesti kohtauskulmasta.
- Mittaustulokset osuvat tyydyttävän tarkasti **A l t h a u s i n** saamiin arvoihin, joskaan tämän käyttämästä mittaussuunnitelmasta ei ole tietoa.

Alapinta: - Muutoskohdan sijainti ei tutkitulla alueella riipu Reynoldsin luvusta.

- Juohealla alueella on muutoskohdan sijainti vakio lukuun ottamatta äkillistä hyppäystä, joka kuitenkin alkaa tasoittua siivekekulman kasvaessa.
- Mittaustulokset yhtyvät hyvin **A l t h a u s i n** saamiin arvoihin.

Päätylevyjen aiheuttaman turbulენტtisuuden havaittiin olevan kuvan 6 perusteella määritetyn rajan sisäpuolella.

3.4. Yhteenveto virtauskokeista

Koska mallin virtauksen ilmiöiden tulkitseminen visuaalisin keinoin vaatii menetelmien tarkkaa tuntemusta ja kokemusta niiden tulkinnoissa, ei vasta-alkaja pysty tekemään kovin yksityiskohtaisia johtopäätöksiä, jotka useinkin ovat tärkeitä tutkittavan mallin käyttäytymisen kannalta. Tästä ja koemateriaalin vähyydestä johtuu, että näille visualisointiyrityksille on annettava lähinnä vain kokeilun merkitys, joskin ne pääpiirteissään tukevat profiilin painejakautumasta saatavia tuloksia. Etenkin nestekalvomenetelmää kannattaisi tutkia ja soveltaa 2-dimensionaalisiin tapauksiin. Lankamenetelmä on käyttökelpoisempi 3-dimensionaalisisissa virtaus-tutkimuksissa.

4. TUULITUNNELIKORJAUKSET

4.1. Yleistä

Tuulitunnelissa mallin ympäri tapahtuva virtaus ei vastaa vapaan virtauksen olosuhteita tunnelin seinämien aiheuttaman interferenssin vuoksi. Tästä syystä on saatuihin mittauksiloksiin tehtävä korjauksia, jotka riippuvat mittatilan ja mallin mitoista sekä tunnelin virtauksen ominaisuuksista.

Tunnelin seinämien vaikutus voidaan jakaa neljään eri osaan, jotka ovat virtausnopeuden kasvu tunnelin akselin suunnassa, virtaussuuntaa vastaan kohtisuorassa oleva nopeuskomponentti sekä näiden gradientit tunnelin akselin suunnassa. Voidaan olettaa, että interferenssi on jaettavissa toisistaan riippumattomiin komponentteihin, joiden vaikutukset ovat additiivisia.

Virtausnopeuden kiihtyminen akselin suunnassa johtuu kolmesta seikasta. Virtauspoikkipinta mallin kohdalla on pienempi kuin mallin edessä tai takana. Jatkuvuusyhtälön mukaan on nopeuden kiihdyttävä mallin kohdalla, joten todellinen nopeus on suurempi kuin tunnelin kiinteiden mittalaitteiden ilmaisema nopeus. Ilmiö on nimeltään kiinteä kuriste (solid blocking). Mallin kohdalla tapahtuu vastuksen johdosta nopeushäviöitä, jotka ilmenevät hidastuneena vanavetenä. Virtauksen on kiihdyttävä vanaveden ulkopuolelta, mikä vaikuttaa nopeuteen mallin kohdalla ja tunnelin akselin suuntaiseen painegradienttiin. Tätä ilmiötä kutsutaan vanaveden kuristeeksi (wake blocking). Tunnelin seinämällä tapahtuvalla rajakerrok-

sen kasvamisella on samanlainen vaikutus kuin vanaveden kuristeella.

Jos kappaleella on nostovoimaa, tapahtuu virtauksen käyristymistä. Tunnelin seinämillä ovat virtaviivat kuitenkin suorina, joten seinämät indusoivat pystysuoran nopeuskomponentin. Ilmiö on nimeltään nostovoiman vaikutus (lift effect).

Virhettä mittaustuloksiin aiheuttavat lisäksi:

- virtaussuunnan poikkeaminen tunnelin akselin suunnasta
- ripustusjärjestelmän aiheuttamat häiriöt
- virtauksen turbulenssiaste
- mittauslaitteiston epätarkkuudet

4.2. Suoritettut korjaukset

Korjaukset suoritettiin S. L a i n e e n (lähde /4./ s. 36) poikkileikkaukseltaan suorakaiteen muotoisen mittatilan kaksiulotteiselle virtaukselle antamien lineaarisen teorian mukaisten korjausyhtälöiden perusteella. Mittatilan oktagonaalista muotoa ei tarvinnut ottaa huomioon päätylevyjen vaikutuksen johdosta.

Lineaarisella teorialla saatavia korjauksia käytetään silloin, kun virtaus ei ole sanottavasti irronnut mallin pinnalta, ts. kun laskusiivekekulma on tarpeeksi pieni. D e J a g e r i n ja v a n d e V o o r e n i n (lähde /22./ s. 17, kuva 2) mukaan voidaan lineaarista teoriaa soveltaa riittäväällä tarkkuudella, kun siivekekulma ei ylitä 20° :ta. Tällöin jäävät lineaarisen ja epälineaarisen teorian mukaisien korjauksien erot pienemmiksi kuin 0,5% nostovoimakertoimen ja 1% momenttikertoimen osalla (lähde /22./ kuvat 4,7,12

ja 15). Vastuskertoimen korjausta ei epälineaaraisella teori-
alla ole mahdollista määrittää.

Koska lähteen /22./ esittämä teoria koskee ohutta, sym-
metristä siivekeprofiilia, ei tämän työn yhteydessä sovel-
lettu epälineaarisen teorian antamia korjauksia, vaan kaikki
suoritetut korjaukset olivat lineaarisia. Suurilla siiveke-
kulmilla muodostuvat korjaukset ainakin nostovoimakertoimen
ja profiilin neljännesjänteen suhteen lasketun momenttiker-
toimen osalta liian suuriksi, sillä lähteen /22./ mukaan ko-
kertoimien korjaukset pienenevät ja saattavat jopa vaihtaa
merkkiä, joten tämä on otettava huomioon tuloksia tarkastel-
taessa.

4.2.1. Kuristeista johtuva korjauskerroin (ϵ)

Kohdassa 4.1. todettiin tunnelin virtausnopeuden lisään-
tyvän mallin ja tunnelin seinämien vaikutuksesta. Merkitään
tätä nopeudenlisää ΔU :lla ja vastaavaa suhteellista nopeuden-
lisää ϵ :lla, jolloin

$$\frac{\Delta U}{U} = \epsilon = \epsilon_{sb} + \epsilon_{wb} \quad (4.2.1.1.)$$

Tässä

alaindeksi sb viittaa kiinteään kuristeeseen ja
alaindeksi wb viittaa vanaveden kuristeeseen.

Termit ϵ_{sb} ja ϵ_{wb} voidaan lausua profiilin geometriasta,
mitatusta profiilivastuskertoimesta (c'_{do}) sekä tunnelin mi-
toista riippuvien tekijöiden avulla seuraavasti:

$$\epsilon_{sb} = \Lambda \sigma$$

(4.2.1.2.)

$$\epsilon_{wb} = \tau c'_{do}$$

Kertoimet σ ja τ ovat puhtaasti mallin ja tunnelin mi-
toista riippuvia kertoimia, joiden lausekkeet ovat:

$$\sigma = \frac{\pi^2}{48} \left(\frac{c}{h}\right)^2$$

(4.2.1.3.)

$$\tau = c/4h$$

Tässä

c = profiilin jänne

h = mittatilan korkeus

Tekijä Λ on mallin paksuudesta johtuva korjauskerroin, jolla on perusprofiilin (profiilin, josta on käyryys poistettu) painekerroin- ja paksuusjakautumasta riippuva analyytinen lauseke. Tässä on kuitenkin käytetty Λ :n arvoa, joka on saatu kahden N.A.C.A. -sarjan vastaavan perusprofiilin Λ -kerrointen (lähde /4./liite IX s. 4) keskiarvona (ks. kuva 10). Samaa tulokseen päästään myös P o p e n ja H a r p e r i n mukaan (lähde /3./s. 308).

Seuraavalla sivulla olevasta kuvasta 10 saadaan Λ :lle arvo:

$$\Lambda = 0,323$$

Kun kaavoihin (4.2.1.3.) sijoitetaan arvot

$$c = 0,8745\text{m}$$

vert sin 3

$$h = 2,0\text{m}$$

saadaan

?

$$\sigma = 0,03931$$

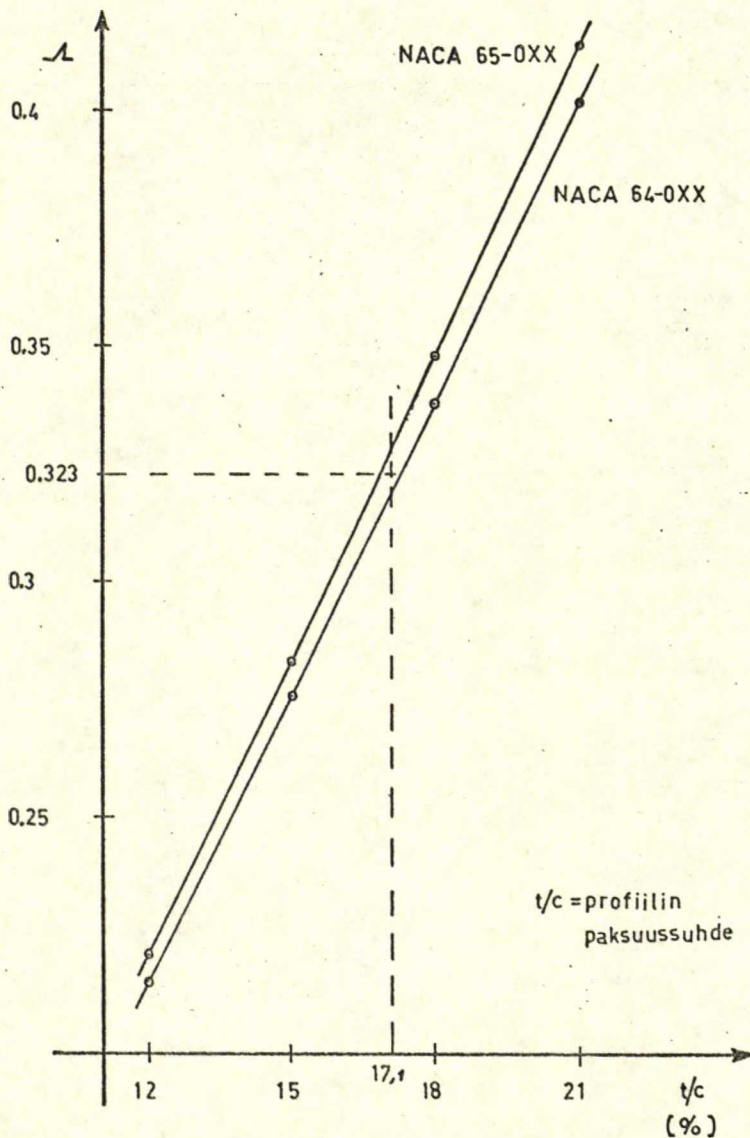
$$\tau = 0,10931$$

Kun nämä sijoitetaan edelleen yhtälöihin (4.2.1.1.) ja (4.2.1.2.), saadaan:

$$\epsilon_{sb} = 0,0127$$

$$\epsilon_{wb} = 0,10931 c'_{do} \quad (4.2.1.4.)$$

$$\epsilon = 0,0127 + 0,10931 c'_{do}$$



Kuva 10 Korjauskertoimen A profiilin paksuussuhteen funktiona N.A.C.A. 64- ja 65-sarjan profiileille

4.2.2. Korjaukset Reynoldsin lukuun ja kineettiseen paineeseen

Tuulitunnelin kiinteän mittalaitteiston kalibrointikäyrän mukaan (TKK, virtauslaboratorio) on kineettisen paineen näyttämään lisättävä 1,7%, jotta saadaan kineettinen paine mittatilan keskellä eli mallin kohdalla. Tunnelin virtauksen turbulentsisuuden vaikutus voidaan ottaa huomioon kertomalla kokeiden Reynoldsin luku tunnelin turbulenssitekijällä, jolloin saadaan tehollinen Reynoldsin luku. TKK:n tuulitunnelin turbulenssitekijäksi on H. A l a n e n (lähde /25./s. 57) määrittänyt 1,12. Kun nämä korjaukset yhdistetään kuristeen aiheuttamiin korjauksiin (esim. lähde /4./s. 36), saadaan korjatulle kineettiselle paineelle (q_0) ja korjatulle Reynoldsin luvulle (Re) mittatilan keskellä seuraavat lausekkeet:

$$q_0 = q'_0(1+2\epsilon) \quad (4.2.2.1.)$$

$$Re = 1,12Re'(1+\epsilon)$$

Tässä

$$q'_0 = 1,017q''_0 \quad (4.2.2.2.)$$

$$Re' = \left(1 + \frac{0,017}{2}\right) Re''$$

q''_0 ja Re'' ovat tunnelin kiinteiden mittalaitteiden avulla määritetyt kineettinen paine ja Reynoldsin luku.

Kun sijoitetaan suureet yhtälöistä (4.2.1.4.) ja (4.2.2.2.) yhtälöihin (4.2.2.1.), saadaan:

$$q_0 = 1,017q_0''(1,0127 + 0,10931c'_{do}) \quad (4.2.2.3.)$$

$$Re = 1,1295Re'(1,0127 + 0,10931c'_{do})$$

*lisaan mukaan
numero*

4.2.3. Korjaukset kohtauskulmaan, nostovoima-, pituusmomentti- ja vastuskertoimeen

Lähteen /4./ sivulla 36 on esitetty korjatuille kohtauskulmalle (α), nostovoimakertoimelle (c_1), pituusmomenttiker-
toimelle ($c_{m.25}$, profiilin neljännesjänteen suhteen), muoto-
vastuskertoimelle (c_{dm}) ja profiilivastuskertoimelle (c_{do})
seuraavat lausekkeet:

$$\alpha = \alpha' + \frac{\sigma}{2\pi}(c'_1 + 4c'_{m.25})$$

$$c_1 = c'_1(1 - \sigma - 2\epsilon)$$

$$c_{m.25} = c'_{m.25}(1 - 2\epsilon) + c'_1\sigma/4 \quad (4.2.3.1.)$$

$$c_{dm} = c'_{dm}(1 - 3\epsilon_{sb} - 2\epsilon_{wb})$$

$$c_{do} = c'_{do}(1 - 3\epsilon_{sb} - 2\epsilon_{wb})$$

Tässä pilkulla merkityt suureet ovat mitattuja arvoja, paitsi kerroin c'_{dm} , johon on tehty tyhjän tunnelin paine-
gradientin (dp/dx) vaikutuksen korjaus yhtälön

$$c'_{dm} = c''_{dm} - \Delta c_{dm} \quad (4.2.3.2.)$$

mukaan. Tässä c''_{dm} on mittaustuloksista laskettu muotovastus-
kerroin ja Δc_{dm} tunnelin painegradientista aiheutuva vastus-

lisä, joka määritellään (lähde /4./s. 22) yhtälöllä:

$$\Delta c_{dm} = -\left(\frac{\pi c^2 \Lambda}{8} \frac{dp}{dx}\right) / (q'_o c) \quad (4.2.3.3.)$$

Painegradientti (dp/dx) mallin kohdalla määritetään K. W a u h k o s e n mukaan (lähde /6./s. 58):

$$\frac{dp}{dx} = -\frac{0,55q'_o}{100} \frac{1}{m} \quad (4.2.3.4.)$$

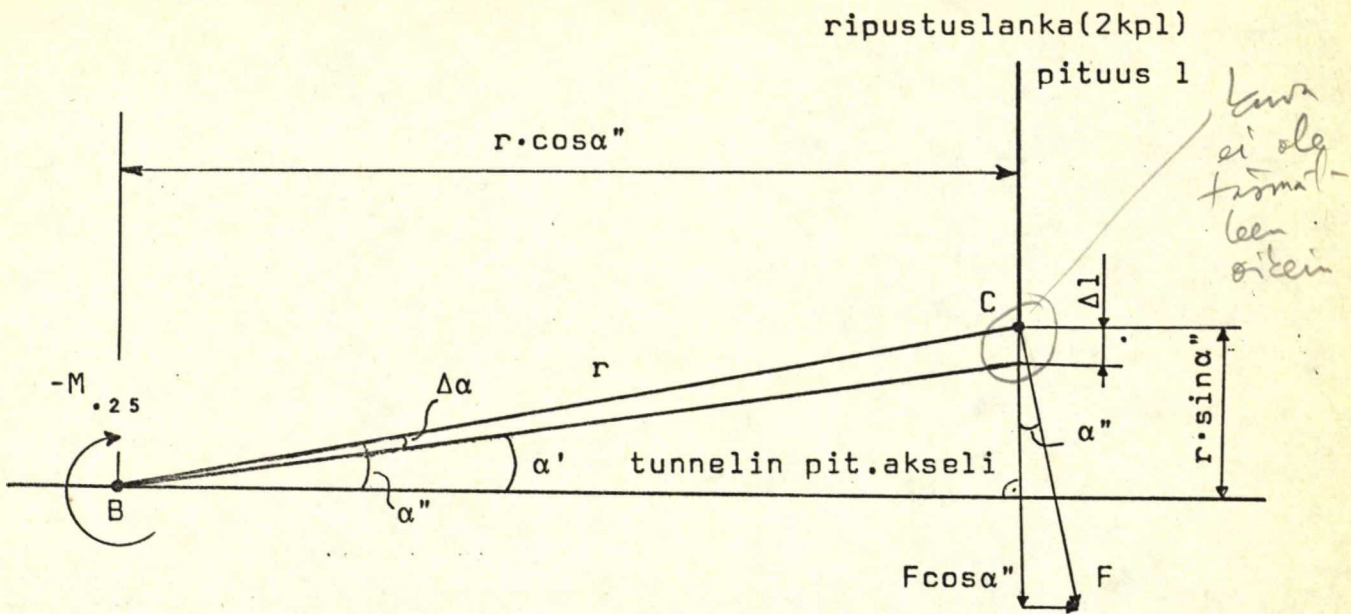
(Mallin etäisyys mittatilan alusta on 2,25 m.)

Tämä sekä arvot $\Lambda = 0,323$ ja $c = 0,8745$ m sijoitetaan yhtälöön (4.2.3.3.), joka edelleen sijoitettuna (4.2.3.2.):een antaa todelliselle, mitatulle muotovastuskertoimelle lausekkeen:

$$c'_{dm} = c''_{dm} - 0,00062 \quad (4.2.3.5.)$$

Mitatussa kohtauskulmassa (α') on otettava huomioon lankojen venymisen aiheuttama kulmanmuutos sekä virtauksen suuntaero tunnelin akseliin nähden. Tätä työtä tehtäessä ei virtauksen suuntaero ollut tiedossa, joten suunnan on oletettu yhtyvän tunnelin akselin suuntaan. Tästä aiheutuva mahdollinen virheen itseisarvo on todennäköisesti pienempi kuin $0,5^\circ$.

Lankojen venymän aiheuttama kohtauskulmamuuutos lasketaan kuvan 11 (seuraavalla sivulla) merkintöjen mukaisesti. Huom: malli oli ylösalaisin tunnelissa ja kuva on piirretty sen mukaisesti.



Kuva 11 Lankojen venymän aiheuttaman kohtauskulman muutoksen määrittäminen

Kuvassa 11

- α'' = vaa'an näyttämä kohtauskulma
- α' = korjattu kohtauskulma
- $\Delta\alpha$ = ripustuslankojen venymän aiheuttama muutos α'' :ssa
- l = ripustuslangan pituus
- Δl = ripustuslangan venymä
- A = ripustuslangan poikkipinta-ala
- piste B = etukiinnityspiste (neljännesjänteen päässä profiilin etureunasta)
- piste C = takakiinnityspiste
- r = B:n ja C:n välinen etäisyys
- $M_{.25}$ = koko mallin pituusmomentti
- F = M:n aiheuttama voimakomponentti C:ssä

Kuvan 11 merkintöjen perusteella voidaan kirjoittaa:

$$\sin \alpha' = \sin(\alpha'' - \Delta\alpha) \approx \frac{r \sin \alpha'' - \Delta l \cdot \cos \alpha''}{r}$$

?

$$\Delta l = \frac{Fl}{2AE} \quad (4.2.3.6.)$$

$$F = \frac{-M_{.25}}{r}$$

$$M_{.25} = c'_{m.25} q'_0 c S$$

Tässä

E = teräksen kimmomoduli

$c'_{m.25}$ = mitattu pituusmomenttikerroin

q'_0 = mitattu kineettinen paine

c = profiilin jänne

S = mallin pinta-ala

Lisäksi on oletettu, että koko mallin pituusmomenttikerroin on yhtä suuri kuin profiilin pituusmomenttikerroin.

Kun kaavat (4.2.3.6.) yhdistetään ja ratkaistaan α' , saadaan:

$$\alpha' = \arcsin \left(\sin \alpha'' + \frac{c'_{m.25} q'_0 c S \cos \alpha''}{2r EA} \right) \quad (4.2.3.7.)$$

Kun kaavaan (4.2.3.7.) sijoitetaan numeroarvoiksi:

$$c = 0,8745 \text{ m}$$

$$S = 0,8745 \text{ m}^2$$

$$l = 2,92 \text{ m}$$

$$r = 0,45 \text{ m}$$

$$E = 2,1 \cdot 10^6 \text{ kp/m}^2$$

$$A = 2,545 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \quad (\text{Ø } 1,8 \text{ mm lankaa}),$$

saadaan venymäkorjatulle kohtauskulmalle (α') laadutettu suureyhtälö:

$$\alpha' = \arcsin(\sin\alpha'' + 1,0318 \cdot 10^{-4} c_{m,25} q_o' \cos\alpha'' (\frac{m^2}{kp})) \quad (4.2.3.8.)$$

4.2.4. Saranamomenttikertoimen korjaus

Käytettävissä olleessa lähdekirjallisuudessa ei ole esitetty saranamomentin korjausta. Korjattu saranamomenttikerroin voidaan kuitenkin laskea kohdassa 4.2.5. esitetyn korjatun painejakautuman avulla.

4.2.5. Paine kertoimen korjaukset

Edellä esitetyt tuulitunnelikorjaukset on johdettu lähinnä vaakamittauksilla saatujen tulosten korjaamiseen, mutta niitä voidaan käyttää myös painemittauksilla saatujen kertoimien korjaamiseen. Profiilin painekerroinjakautuma voidaan myös korjata vastaamaan vapaan virtauksen olosuhteita ja tästä laskea vastaavat aerodynaamiset kertoimet. Paine kertoimen korjaus tapahtuu lähteen /27./ sivulla 14 esitetyllä tavalla. Korjatun paine kertoimen (C_p) lauseke tietyllä kohdalla profiilia on:

$$C_{pU} = \frac{p_U - p_o}{q_o} \quad (4.2.5.1.)$$
$$C_{pL} = \frac{p_L - p_o}{q_o}$$

Tässä indeksi U viittaa yläpintaan ja

L alapintaan

p_o on staattinen paine häiriintymättömässä virtauksessa

q_o on kineettinen paine " " "

p on staattinen paine profiilin pinnalla

Yhtälöt (4.2.5.1.) voidaan kirjoittaa myös muotoon

$$C_{pU} = 1 - \frac{[(1-C_{pf}) + 0,25P]^2}{1 - C_{pf}} \quad (4.2.5.2.)$$

$$C_{pL} = 1 - \frac{[(1-C_{pf}) - 0,25P]^2}{1 - C_{pf}}$$

Tässä

C_{pf} = perusprofiilin (profiili, jolta käyryys on poistettu) painekerroin ja

P = jänteen suuntainen vapaan virtauksen nostovoimajakautuma, jolle on johdettu tunnelivirtauksen jänteen suuntaisesta nostovoimajakautumasta (P^*), profiilin suhteellisesta X-koordinaatista ja mitatusta nostovoimakertoimesta (c'_j) riippuva lauseke:

$$P = P^* - \frac{4\sigma c'_j}{\pi} \sqrt{1 - (1-2X)^2} \quad (4.2.5.3.)$$

Tässä

σ = yhtälön (4.2.1.3.) mukainen kerroin

$$P^* = \frac{1}{1+2\epsilon} (C'_{pL} - C'_{pU}) \quad (4.2.5.4.)$$

Tässä

ϵ on määritetty yhtälössä (4.2.1.1.)

C'_{pL} on alapinnan mitattu painekerroin kohdalla X

C'_{pU} on yläpinnan mitattu painekerroin kohdalla X

Lauseke $(1-C_{pf})$ voidaan kirjoittaa muotoon: ²

$$1-C_{pf} = \left[\sqrt{1 - \frac{1}{1+2\epsilon} C'_{pU}} + \sqrt{1 - \frac{1}{1+2\epsilon} C'_{pL}} \right]^2 \quad (4.2.5.5.)$$

Korjatut painekertoimet saadaan yhtälöistä (4.2.5.2.), kun mitattujen painekertoimien avulla lasketaan lauseke $(1 - C_{pf})$ yhtälöstä (4.2.5.5.) ja lauseke P yhtälöistä (4.2.5.3.) ja (4.2.5.4.). Tässä menetelmässä tulee tietää ylä- ja alapinnan mitatut painekertoimet samoilla X -arvoilla. Kohdan 5.3.2. mukaan laskien, kun korjaamattomat suu-reet (pilkulliset) korvataan korjatuilla (pilkuttomilla), saadaan korjatusta painejakautumasta aerodynaamiset kertoimet, jotka vastaavat kohtien 4.2.2. ja 4.2.3. korjattuja Reynoldsin lukua ja kohtauskulmaa. Niiden tulisi likimain olla korjaamattomalla painejakautumalla laskettujen ja kohdan 4.2.3. mukaan korjattujen aerodynaamisten kerrointen suuruiset.

4.2.6. Korjaukset manometrulukemiin

Manometrulukemiin jouduttiin tekemään korjauksia, jotka johtuivat manometrinnesteiden tiheyksien erilaisuudesta, tunnelin staattisen paineen muuttumisesta virtauksen suunnassa ja tunnelin staattisen paineen eroista mittahallin ilmanpaineeseen verrattuna.

Mittauksissa käytettiin kahta 36 putkea sisältävää multimanometriä; suuremmalla mitattiin profiilin yläpinnan painejakautuma sekä vanaveden painejakautuma, pienempää käytettiin alapinnan painejakautuman mittaamiseen. Koska kineettisen paineen sekä tunnelin ja mittahallin paine-eron määrittämiseen käytetyissä Betz-manometreissä oli nesteinä tislattu vesi, muutettiin multimanometriä lukemat silikonimillimetreistä vesimillimetreiksi. Multimanometriä nesteiden suhteelliset tiheydet tislattuun veteen verrattuna oli-

vat: iso multimanometri 0,7914

pieni multimanometri 0,8032

Tiheysmittaukset suoritettiin lämpötilassa 19°C, joka oli mittahallin lämpötila tuulitunneliajojen aikana.

Tunnelin staattisen paineen muutoksen vaikutus kineettiseen paineeseen (määritettiin Betz-manometrillä) on esitetty kohdassa 4.2.2. Koska profiilimittauksissa multimanometriä referenssipaineena oli mittahallin ilmapaine, oli tuloksissa otettava huomioon tunnelin ja mittahallin välinen paine-ero (mitattiin Betz-manometrillä) sekä tunnelin staattisen paineen muuttuminen anturilta mallin kohdalle (Δp), joka saadaan lähteen /6./ kuvasta 7.3.2:

$$\Delta p = - \frac{2,25q'_0}{100} \quad (4.2.6.1.)$$

Tässä

q'_0 = kineettinen paine mallin kohdalla (mitattu)

4.2.7. Korjaukset vastusmittauksissa

Vastusmittauksissa suoritettujen manometrulukemien korjaukset on esitetty kohdassa 6.3. Korjaukset kineettiseen paineeseen, Reynoldsin lukuun ja kohtauskulmaan ovat samat kuin kohdissa 4.2.2. ja 4.2.3.

Jättövirtausharavalla mitattaessa tulisi ottaa lisäksi huomioon haravan putkien suuntaa vastaan kohtisuorassa oleva painegradientti, joka aiheutuu vanaveden nopeusjakautumasta. Kun kokonaispainetta mitataan virtauksessa, jossa on virtauksen suuntaa vastaan kohtisuorassa oleva painegradientti, ei pitotputken tehollinen keskiö yhdy sen geometri-

seen keskiöön, ts. putken tehollinen sijainti ei olekaan sama kuin sen geometrinen sijainti. Tehollinen keskiö siirtyy suurempaan paineeseen päin eli vanan tapauksessa ulospäin vanan keskiviivalta. Jos käytetään haravan putkien geometrisia koordinaatteja, saadaan siis vastuskertoimelle hieman todellisia arvoja pienempiä tuloksia. Koska käytävissä olleessa lähdekirjallisuudessa ei ollut tarkkaa tietoa gradientin vaikutuksen suuruudesta, ei tätä virhelähdettä ole eliminoitu tässä työssä. Lähteen /11./s. 44 mukaan on tästä aiheutuva virhe joissakin tapauksissa luokkaa 2%.

4.2.8. Äärellisestä sivusuhteesta johtuva kohtauskulman korjaus

Mallin äärellisestä sivusuhteesta johtuu, ettei virtaus ole 2-dimensionaalinen ja että nostovoimakertoimen kaltevuus jää todellista pienemmäksi, kuten kohdassa 2.3. on todettu. Tällöin on geometrinen kohtauskulma (α_g) tehollisen kohtauskulman (α_e) ja indusoidun kohtauskulman (α_i) summa. Indusoitu kohtauskulma riippuu profiilin nostovoimakerroimesta (c_1) ja mallin tehollisesta sivusuhteesta (A_H):

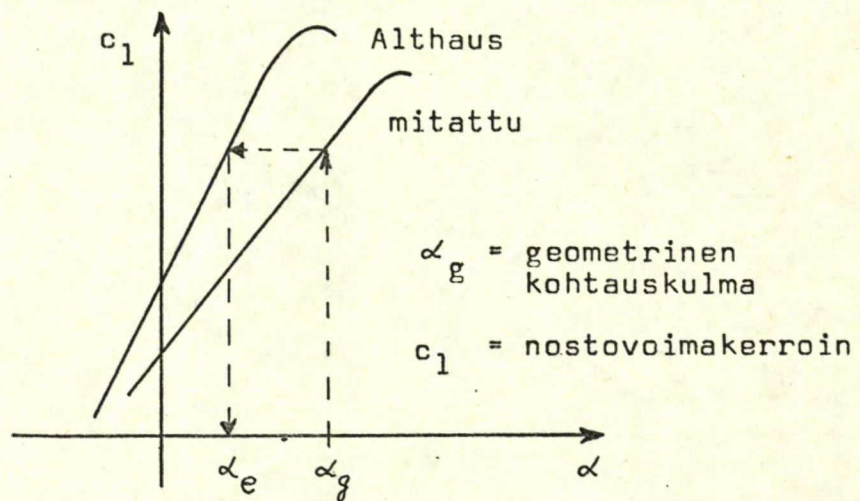
$$\alpha_g = \alpha_e + \alpha_i = \alpha_e + \frac{c_1}{\pi e A_H} \quad (4.2.8.1.)$$

Tässä e = kerroin, joka riippuu kärkivälin suuntaisen nostovoimakerroinjakautuman muodosta. Suorakaidejakautumalle $e=1$. ?

Tehollinen kohtauskulma saadaan siis kaavasta:

$$\alpha_e = \alpha_g - \frac{c_1}{\pi e A_H} \quad (4.2.8.2.)$$

Kerroin e määriteltiin Althausin mittaustulosten perusteella (lähde /24./) seuraavasti: geometriseksi kohtauskulmaksi valittiin mittaustulosten perusteella lasketun nostovoimakerroinkäyrän lineaariselta osalta mielivaltainen kohtauskulma, jota vastaavan nostovoimakertoimen arvolla saatiin Althausin käyrältä tehollinen kohtauskulma (ks. kuva 12).



Kuva 12 Tehollisen kohtauskulman (α_e) määrittäminen Althausin mittaustulosten avulla

Ratkaisemalla e yhtälöstä (4.2.8.2.) ja sijoittamalla em. kohtauskulmien ja nostovoimakertoimen arvot sekä mallin sivusuhte voidaan kertoimen e arvo määrittää.

Koska kerroin e riippuu mallin kärkivälin suuntaisesta nostovoimajakautuman muodosta ja niin ollen myös siivekekulmasta, tulisi e :n arvo määrittää kullekin siivekekulmalle erikseen.

Koska suurilla siivekekulmilla ei ole A l t h a u s i n vastaavaa käyrää ja siivekekulmalla -8° voi saranapisteen eri sijainti (A l t h a u s i l l a ylä- ja alapinnan puolivälissä) aiheuttaa eroja, määritettiin e:n arvo vain siivekekulmalla 0° ja saatiin:

$$e = 1,71$$

Tässä käytettiin sivusuhteelle kohdassa 2.3. määritettyä tehollista arvoa 2,1. Kertoimen e tarkempi määrittäminen vaatisi lisätutkimuksia.

Äärellisen sivusuhteen aiheuttama korjaus tulee ottaa huomioon siinä vaiheessa, kun lasketaan profiilin nostovoima- ja muotovastuskerrointa yhtälöiden (5.3.2.1.3.) mukaan. Tällöin lasketaan ensin nostovoimakertoimen arvo ja sijoitetaan se yhtälöön (4.2.8.2.), joka puolestaan sijoitetaan uudelleen nostovoimakertoimen yhtälöön. Iterointia jatketaan tarpeeksi monta kierrosta, yleensä 2-3 kertaa riittää.

5. PROFIILIN PAINEMITTAUKSET

5.1. Yleistä

Mittaamalla staattisen paineen jakautuma mallin pinnalla voidaan määrittää kaksidimensionaalisessa tapauksessa profiilin aerodynaamiset kertoimet: nostovoima-, muotovastus-, pituusmomentti- sekä saranamomenttikertoimet. Nollavastuskerroin voidaan määrittää mittaamalla mallin kohdalla tapahtunut nopeushäviö. Kätevimmin tämä tapahtuu mittaamalla nopeusjakautuma jonkin matkaa mallin jättöreunan takaa. Kitkavastuksen osuutta voidaan arvioida vähentämällä kokonaisvastuksesta muotovastuksen osuus tai mittaamalla kokonaispainejakautuma lähellä mallin pintaa.

Vaikka aerodynaamisten kerrointen ^{mitta-}määrittämisestä painemittausten avulla pidetään usein voimamittausten vaihtoehtona tai tarkistuskeinona, saadaan painemittausten avulla perustietoa kappaleen aerodynaamisista ominaisuuksista. Painejakautumasta selviävät mm. seuraavat tärkeät tiedot:

- minimipaineen (eli maksiminopeuden) sijaintipaikka ja voimakkuus sekä $(Ma)_{krit}$
- maksimipaineen sijainti ja voimakkuus
- pintakuormituksen suuruus ja jakautuma
- rajakerroksen virtauksen laatu ja ulottuvuus
- painekeskiön sijainti
- profiilin minimivastuskerrointa vastaava kohtauskulma, joka on ^{yleensä?} saavutettu silloin, kun etureunan ylä- ja alapinnan välillä ei ole mainittavaa paine-eroa, ts. vir-

taus kohtaa profiilin "pehmeästi" |

Tämän vuoksi painemittaukset yhdessä virtauksen visualisoinnin kanssa yleensä suoritetaan punnitusmittausten lisäksi.

Painemittaukset soveltuvat lähinnä kaksidimensionaalisten tapausten ja pyörähdyskappaleiden tutkimiseen, koska tällöin saatavien datojen luku pysyy kohtuullisissa määrissä. Tämä pätee etenkin, jos tulokset tallioidaan valokuvaamalla multimanometreistä: Paineen digitaalimuuttajat (scanner-valve ja data logger) tekevät kuitenkin mahdolliseksi huomattavasti suurempien datamäärien käsittelyn. Painemittausten etuihin kuuluu lisäksi se, ettei ripustuselimien kitka vaikuta tulosten tarkkuuteen; samoin jäävät pois usein vaikeasti mitattavat tai arvioitavat interferenssit mallin ja ripustuselimen välillä.

Mallin nostovoima- ja pituusmomenttikerroin sekä myös arvio saranamomenttikertoimelle voidaan laskea tunnelin lattiaan ja kattoon vaikuttavan painejakautuman avulla. Tämä on edullista etenkin silloin, kun suoritetaan paljon profiilimittauksia, jolloin tuulitunnelimallin teko yksinkertaistuu, koska paineputkisto jää pois. Tällöin on vaivatonta tutkia myös modifikaatioiden vaikutusta profiilin ominaisuuksiin.

5.2. Kärkivälin suuntaisen painejakautuman mittaukset

5.2.1. Mittausten suoritus

Kärkivälin suuntaisen painejakautuman mittauksilla pyrittiin varmistumaan siitä, että virtaus mallin keskellä todella on kaksidimensionaalista, ts. painejakautuma kärkivälin

suunnassa on vakio keskiviivalta mahdollisimman lähelle päätylevyjä. Kärkivälin suuntainen painereikäjaotus selviää kuvasta 2.

Mittaukset suoritettiin samaan aikaan kuin lankakokeetkin. Multimanometrillä, johon paineletkut oli yhdistetty, otettiin muutama valokuva eri laskusiivekekulmilla ja Re-luvuilla tulosten havainnollistamiseksi, muuten riitti selvittää tasaisen paineen alue ja sen riippuvuus kohta- ja laskusiivekekulmasta sekä Re-luvusta ajopöytäkirjaan tehdyin merkinnöin.

5.2.2. Mittausten tulokset

Kärkivälin suuntaisen painejakautuman tasaisuus oli riippuvainen kolmesta tekijästä:

- kohtauskulmasta
- siivekekulmasta
- Reynoldsin luvusta

Jakautuman epätasaisuus pyrki lisääntymään kohtauskulman kasvaessa. Tämä oli selvästi havaittavissa etenkin lähestyttäessä sitä kohtauskulmaa, jolloin virtaus irtosi painereikien kohdalta eli 80%-viivalta. Myös tämän kohtauskulma-arvon jälkeen lisääntyi häiriöiden määrä.

Siivekekulmalla oli päinvastainen vaikutus: kulman kasvaessa häiriöiden osuus pieneni, ja malli oli pienillä siivekekulman arvoilla herkempi kohtauskulman ja Reynoldsin luvun muutoksille kuin suurilla.

Reynoldsin luvun kasvaessa lisääntyi häiriöiden osuus.

Nämä eivät olleet ainoastaan kärkivälin suuntaisia, vaan käsittivät koko virtauskentän. Reynoldsin lukualueen yläpäässä voitiin havaita virtauksen selvää pulssimaisuutta, mikä selvisi jo lankakokeiden yhteydessä.

Alapinnan painejakautuma oli yleensä erittäin tasainen; ainoastaan pienillä siivekekulmilla ($-8^{\circ} \dots 0^{\circ}$) oli pientä epätasaisuutta, joka ei kuitenkaan ulottunut päätylevystä mallin keskiviivalle päin pitemmälle kuin 25% kärkivälin puolikkaasta. Tämä etäisyys vastaa kuvan 6 esittämää häiriölevyettä painereikärvien kohdalla.

Yläpinnan jakautuma oli huomattavasti herkempi häiriölle. Pahimmassa tapauksessa häiriöalue saattoi ulottua päätylevystä 50%:n (kärkivälin puolikkaasta) etäisyydelle. Tällöin oltiin jo sellaisilla kohtauskulman arvoilla, että sakkaus oli alkanut ja paine-erot mallin keskiviivan ja päädyn välillä olivat luokkaa 10-15%. Normaalilla kohtauskulma-alueella olivat paine-erot 0-3% häiriöalueen ulottuessa 5-10% (kärkivälin puolikkaasta) etäisyydelle päätylevystä.

Painejakautuma kärkivälin suunnassa oli kokeiden perusteella riittävän tasainen aerodynaamisten kerrointen määrittämiseen painejakautuman avulla. Painereikärvien sijoittelussa tehtiin kuitenkin virhe, kun ne sijoitettiin profiilin takaosaan. Lähellä etureunaa olisi saatu arvokkaampia tuloksia, koska profiilin painejakautuman huippu sijaitsee siellä ja näin ollen myös häiriöiden osuus on suurin. Tämä seikka on syytä ottaa huomioon vastaavia mittauksia myöhemmin suoritettaessa.

5.3. Jänteen suuntaisen painejakautuman mittaukset

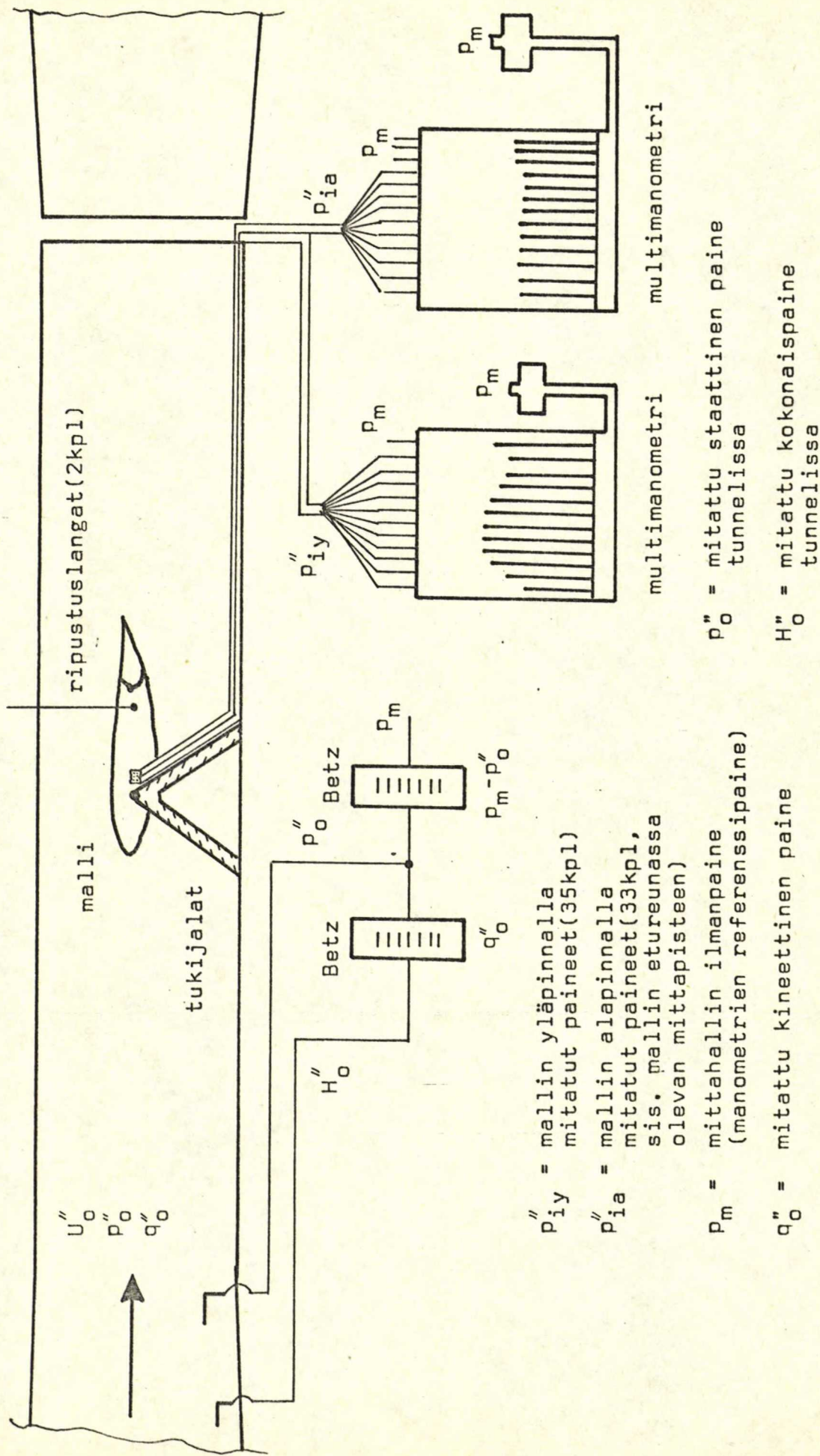
5.3.1. Mittausten suoritus

Käytettävissä oli kaksi 36 putken multimanometriä, joista toiseen kytkettiin ylä- ja toiseen alapinnan paineletkut. Painereikien X-koordinaatin ja manometrien putkien numeroiden vastaavuus selviää liitteessä II olevasta taulukosta. Kuvasta 12 käy ilmi painekytcentöjen periaate. Tunnelin kiinteän nopeudenmittalaitteiston antama kineettinen paine mitattiin Betz-manometrillä, samoin kuin tunnelin ja mittahallin staattinen paine-erokin. Multimanometreissä oli referenssi- eli säiliöpaineena mittahallin ilmanpaine, johon profiilin staattisia paineita verrattiin. Em. paineiden lisäksi rekisteröitiin mittahallin lämpötila ja paine (mmHg), tunnelin lämpötila sekä kohta- ja laskusiivekekulmat. Lisäksi tarkkailtiin multimanometriin nestepatsaiden värähtelyä.

Multimanometriin lukemien rekisteröinti tapahtui valokuvaamalla molemmat manometrit samalle negatiiville. Eri ajojen tunnistamiseen käytettiin juoksevaa koodinumeroa. Muut rekisteröidyt suureet kirjattiin ajopöytäkirjoihin.

Mittauksissa ajettiin kaikkiaan 37 eri polaaria. Tutkittavat kohtauskulmat kullekin polaarille määrättiin lähteen /24./ ja virtauskokeiden perusteella niin, että kokonostovoimapolaari lähes nollanostovoimakertoimesta sakkaukseen asti tulisi rekisteröidä. Kohtauskulmaa muutettiin polaarin alkuosalla 2° välein, loppuosalla 1° välein. Keskimäärin mitattiin kustakin polaarista 17 pistettä.

Painereikien sijainti käy ilmi kuvasta 1.



P''_{iy} = mallin yläpinnalla mitatut paineet (35kpl)
 P''_{ia} = mallin alapinnalla mitatut paineet (33kpl, sis. mallin etureunassa olevan mittapisteen)

P''_m = mittahallin ilmanpaine (manometrien referenssipaine)

q''_0 = mitattu kineettinen paine

P''_0 = mitattu staattinen paine tunnelissa

H''_0 = mitattu kokonaispaine tunnelissa

multimanometri multimanometri

Kuva 13 PaineKenttöjen periaate profiilin painejakautuman mittauksissa

Siivekekulma- ja Re-lukuyhdistelmät selviävät taulukosta 3.

Taulukko 3 Suoritetut profiilin painemittaukset eri Reynoldsin luvuilla (Re) ja siivekekulmilla (δ) (merkitty x:llä)

δ /aste	Re $\cdot 10^{-6}$							
	0,78	1,1	1,4	1,7	2,2	2,8	3,3	3,9
-8				x		x		x
-6				x		x	x	
-2		x		x		x		
0		x		x	x		x	
2	x		x	x				
6	x		x	x				
10	x		x	x				
15	x	x		x				
20	x			x			x	
50	x			x	x			
70	x			x			x	
90	x			x			x	

Yhdistelmät valittiin TKK:n kevytrakennetekniikan laboratorion henkilökunnan ehdotuksesta ja ne perustuvat laskusiivekkeen suunniteltuihin käyttöalueisiin.

5.3.2. Laskentamenetelmät

5.3.2.1. Perusyhtälöt

Profiilin aerodynaamisten kerrointen perusyhtälöt on esitetty lähteessä /1./s. 272-273 seuraavasti (pilkutetut

suureet merkitsevät korjaamattomia, mittaustuloksista laskettuja suureita):

Normaalivoimakerroin (c'_n)

$$c'_n = \int_0^1 (C'_{pL} - C'_{pU}) dX \quad (5.3.2.1.1.)$$

Tässä X on suhteellinen x-koordinaatti (x/c)

indeksi L viittaa alapintaan ja

U yläpintaan

$$C'_p = \frac{p' - p'_0}{q'_0} \quad (\text{paine kerroin profiilin pinnalla})$$

p' = mitattu paine profiilin pinnalla kohdassa X

p'_0 = häiriintymättömän virtauksen staattinen paine (mallin kohdalla)

q'_0 = häiriintymättömän virtauksen kineettinen paine (mallin kohdalla)

Jänteen suuntainen voimakerroin (c'_c)

$$c'_c = - \int_{Y_{X=0}}^{Y_{X=1}} (C'_{pL} - C'_{pU}) dY \quad (5.3.2.1.2.)$$

Tässä Y on profiilin suhteellinen y-koordinaatti (y/c)

Nostovoimakerroin (c'_l) ja muotovastuskerroin (c'_{dm})

Profiilin jänteen suhteen lasketuista kertoimista saadaan tunnetulla tavalla nostovoima- ja muotovastuskerroin ottamalla huomioon kohtauskulma (α'):

$$c'_l = c'_n \cos \alpha' - c'_c \sin \alpha' \quad (5.3.2.1.3.)$$

$$c'_{dm} = c'_n \sin \alpha' + c'_c \cos \alpha' - 0,00062$$

Kohtauskulmaan α' on sisällytetty lankojen venymän aiheuttama muutos kohdan 4.2.3. mukaan ja c'_{dm} :ssa on otettu huomioon kohdan 4.2.3. mukainen tunnelin painegradientin vaikutus.

Pituusmomenttikerroin ($c'_{m.25}$)

Profiilin jänteellä, neljännesjänteen päässä etureunasta sijaitsevan pisteen suhteen laskettu pituusmomentti saadaan painekerroinjakautuman pinta-alan momenttina seuraavasti (positiivinen momentti määritellään profiilin kohtauskulmaa lisääväksi):

$$c'_{m.25} = \int_0^1 (C'_{pL} - C'_{pU})(0,25 - X) dX - \int_{Y_X=0}^{Y_X=1} (C'_{pL} - C'_{pU}) Y dY \quad (5.3.2.1.4.)$$

Siivekkeen saranamomenttikerroin (c'_h)

Saranamomenttikerroin voidaan laskea samalla tavalla kuin pituusmomenttikerroinkin, mutta integrointi suoritetaan nyt vain laskusiivekkeen osalla. Positiivinen saranamomentti pyrkii suurentamaan siivekekulmaa. Koska saranamomenttikerroin referoidaan laskusiivekkeen jänteeseen (c_f) eikä koko profiilin jänteeseen (c), tulee X- ja Y-koordinaatit kertoa

suhteella c/c_f . Tällöin saadaan:

$$c'_h = \left(\frac{c}{c_f}\right)^2 \left[\int_{X_f}^1 (C'_{pL} - C'_{pU})(X_f - X) dX \right. \quad (5.3.2.1.5.)$$

?

$$\left. \int_{Y_{X=X_f}}^{Y_{X=1}} (C'_{pL} - C'_{pU})(Y_f - Y) dY \right]$$

Tässä X_f ja Y_f ovat saranapisteen suhteelliset koordinaatit

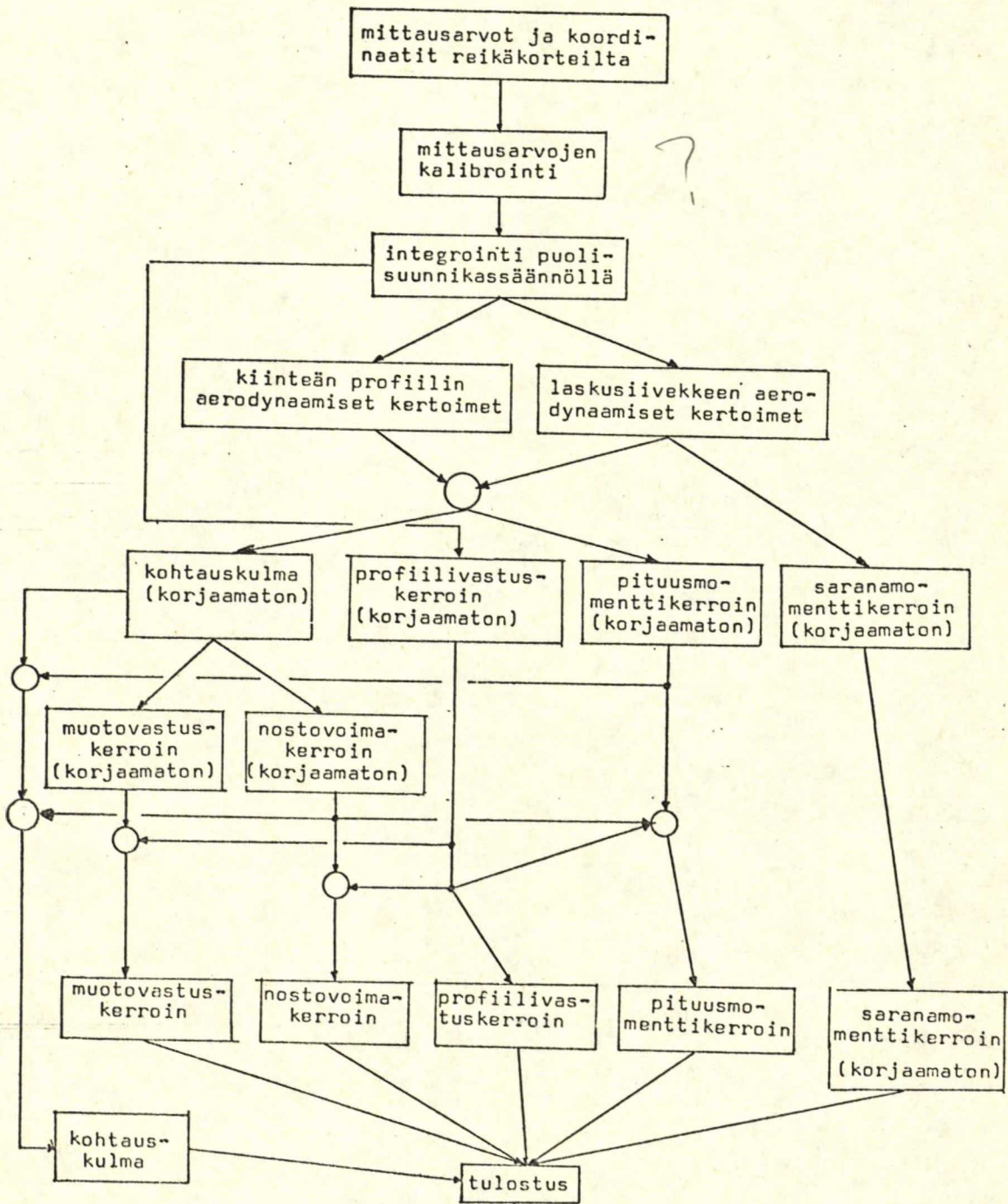
5.3.2.2. Tietokoneohjelmat

Laskujen suorittamisessa käytettiin TKK:n laskentakeskuksessa olevaa HP2000 -tietokonetta eräajomuodossa. Joitakin ajoja suoritettiin myös opetusministeriön Univac 1108 -tietokoneella. Ohjelmointikielinä olivat Fortran IV ja V. Käyrien piirtämiseen käytettiin HP2000 -koneeseen liitettyä piirturia. Integroinnit suoritettiin puolisuunnikkasääntöä käyttäen. Ohjelman lohkokaavio selviää kuvasta 14. Ohjelman listaus on liitteessä III.

5.3.3. Mittausten tulokset

5.3.3.1. Painekerroinjakautumat

Koska manometrulukemien tulkitseminen negatiivista ja lävistys reikäkorteille on työlästä, ei tämän työn puitteis-
sa ollut mahdollista käsitellä kuin muutama polaari. Tutki-
muksen kohteiksi valittiin siivekekulmat -8° , 0° , 70° ja 90° .
Reynoldsin luvuksi valittiin $1,7 \cdot 10^6$, paitsi kulmalla -8° ,
jolloin Re-luku oli $3,9 \cdot 10^6$. Siivekekulmalla 0° tutkittiin
myös Reynoldsin luku $3,3 \cdot 10^6$.

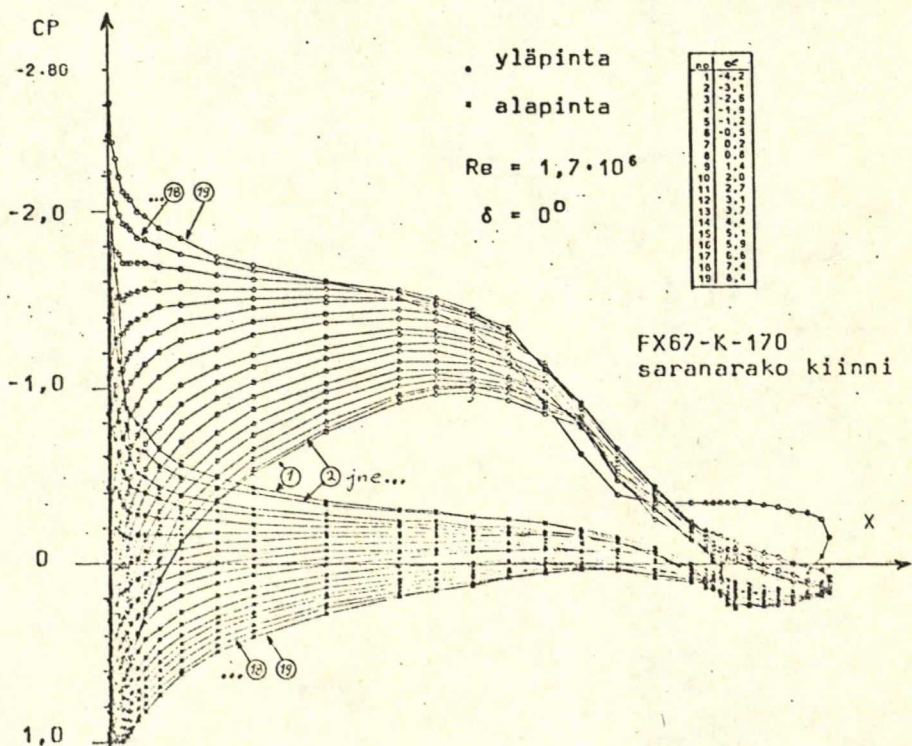
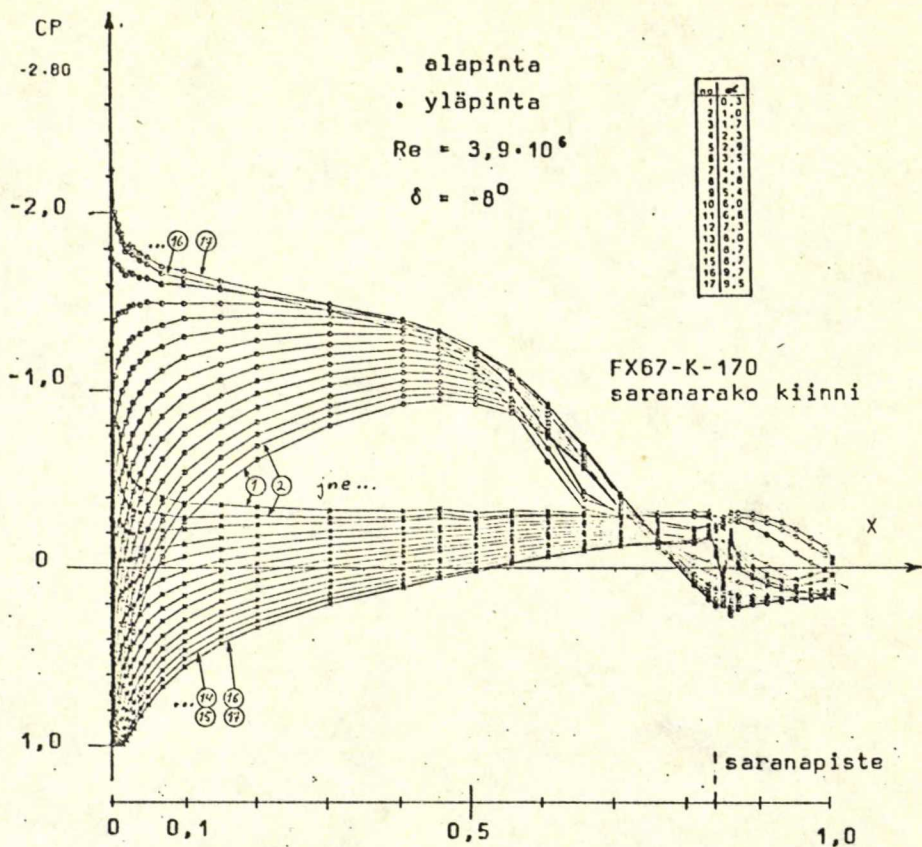


Kuva 14 Pääohjelman lohkokaavio

Kuvissa 15 ja 16 on esitetty mittaustuloksista lasketut korjaamattomat painekerroinjakautumat neljällä eri siivekekulmalla kohtauskulman funktiona. Kuvista voidaan tehdä seuraavia huomioita:

- Siivekekulmilla -8° ja 0° tapahtuu yläpinnan painejakautumassa äkillinen muutos suurilla kohtauskulmilla, jolloin virtaus irtoaa 65-70%:iin asti (tasainen painejakautuma). Tämä havaittiin jo lankakokeiden yhteydessä.
- Siivekekulmilla 70° ja 90° muutokset ovat rauhallisia, laskusiivekkeen yläpinnan virtaus on koko kohtauskulma-alueella irronnut ja alapinnan virtaus irronnut n. 70%:iin asti. Alapinnan tasaista painejakautumaa tulkittaessa on kuitenkin otettava huomioon, että pinta on saranaviivan jälkeen lähes X-akselin suuntainen, joten paineen muutokset ovat luonnollisesti pieniä.
- Jyrkkä heilahtelu alapinnan painekertoimessa siivekekulmilla -8° ja 90° heti saranapisteen jälkeen saattaa olla mittausvirhe, mutta voi johtua myös profiilissa tällöin olevasta epäjatkuvuuskohdasta, joskin painekertoimen muutos on vastakkaismerkkinen kuin virtauksen kiihtyminen tai hidastuminen em. epäjatkuvuuskohdassa edellyttäisi! Tämän seikan selvittäminen vaatisi lisätutkimuksia.
- Muutoskohdan sijaintia on vaikea tarkkaan arvioida. Yläpinnalla se sijoittuu välille 45-65%, alapinnalla välille 45-80% riippuen kohtaus- ja siivekekulmasta. Pienillä

*linjat piirretyt
kuvat*

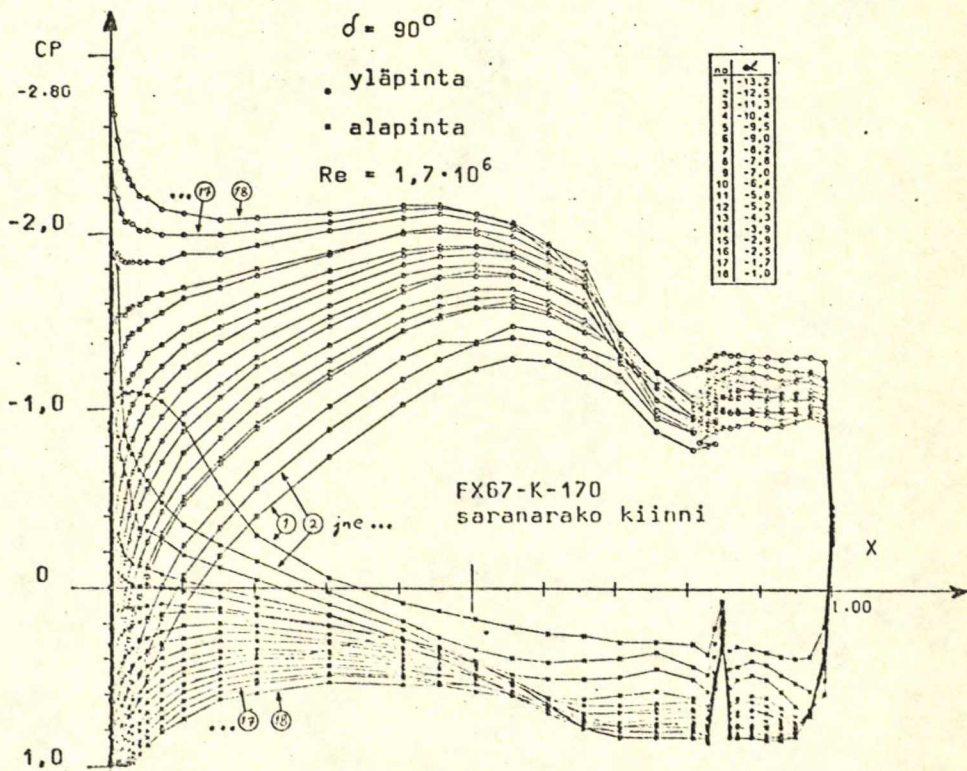
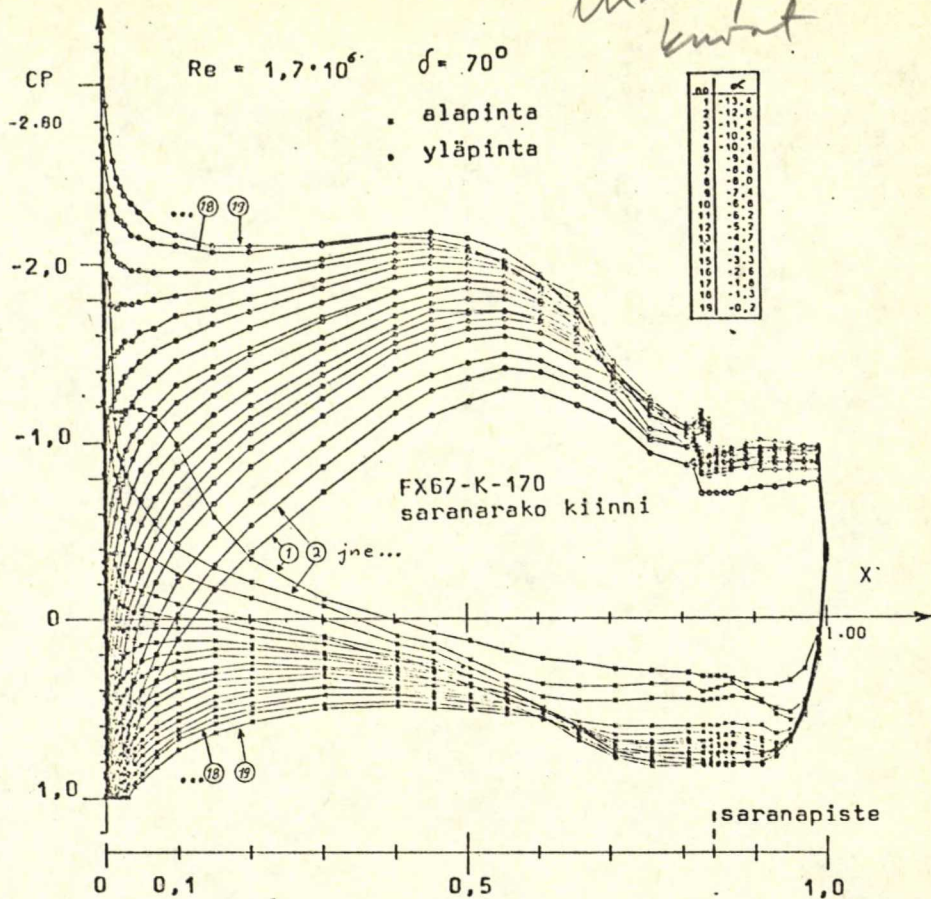


Kuva 15 Mitattu painekerroin (C_p) profiilin X-akselia pitkin kohtauskulman (α) funktiona kahdella eri siivekekulmalla (δ) ja Reynoldsin luvulla (Re)

Huom. X-akselin jaotus piirretty kuvioden väliin.

Huom. Siivekkeen jakautumat on piirretty siiveke normaaliasennossa ($\delta=0$).

*liian pienet
kuvat*



Kuva 16 Mitattu painekerroin (C_p) profiilin X-akselia pitkin kohtauskulman (α) funktiona kahdella eri siivekukulmalla (δ) ja Reynoldsin luvulla (Re)

Huom. X-akselin jaotus piirretty kuvioiden väliin.

Huom. Siivökkeen jakautumat on piirretty siiveke normaaliasennossa ($\delta=0$).

siivekekulmilla on muutoskohdan sijainti alapinnalla juuri ennen saranaviivaa, ts. laskusiivekkeen jännettä ei voida suurentaa nykyisestä profiilin vastusominaisuuksien huonontumatta.

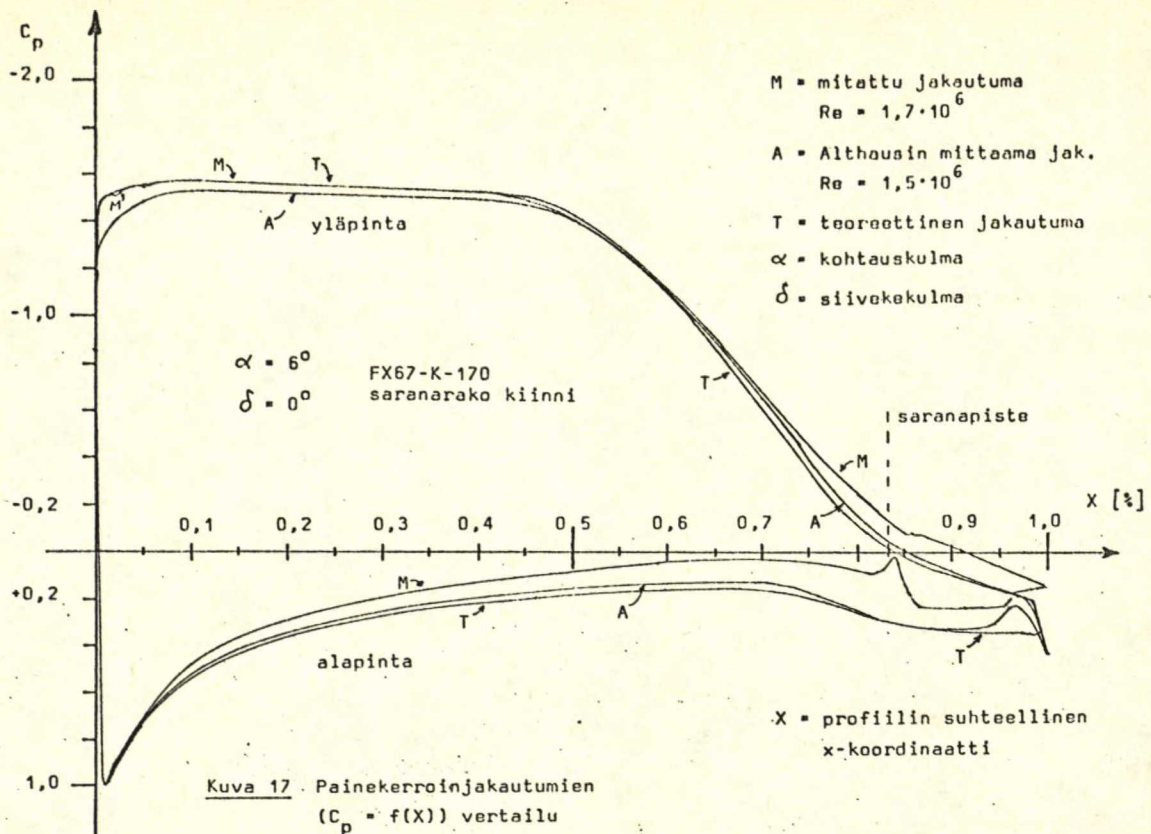
- Suurilla kohtauskulmilla etureunassa syntyvän painekerroinpiikin kasvaminen tapahtuu rauhallisesti. Ennen piikin muodostumista on yläpinnan painekerroin laminaariprofiileille tyypillisesti lähes vakio jänteen puoliväliin saakka.
- Patopisteen liikealue X-akselin suunnassa kohtauskulman kasvaessa on tutkitulla alueella 2-3%.

Kuvaan 17 on piirretty siivekekulmaa 0° ja kohtauskulmaa 6° vastaavat seuraavat painejakautumat:

- mittaustuloksista laskettu, korjaamaton jakautuma
- A l t h a u s i n mittaama jakautuma
- S m i t h & H e s s i n -menetelmällä laskettu teoreettinen jakautuma . *lähde ?*

Kuten havaitaan, yhtyy mitattu jakautuma yläpinnan etuosalla hyvin teoreettiseen, kun taas jättöreunaa lähestyttäessä noudattaa A l t h a u s i n jakautuma paremmin teoreettista. Alapinnalla on A l t h a u s i n jakautuma selvästi lähempänä teoreettista kuin mitattu jakautuma. Mitattu ja A l t h a u s i n jakautuma ovat kuitenkin niin lähellä toisiaan, että kohdan 4.2.8. mukainen kohtauskulman redusointi on suoritettu riittävällä tarkkuudella.

Huomattavin ero mitatun ja Althausin jakautuman välillä on alapinnalla; ero kasvaa siirryttäessä profiilin jättöreun-



naan päin. Tähän on todennäköisesti syynä painereikien sijainti samassa rivissä, niiden suhteellisen tiheä jaotus profiilin alapinnan etureunassa ja suositeltua suurempi halkaisija (ks. kohta 2.2.), jolloin olosuhteet ovat häiriöiden syntymiselle edulliset.

Käytettävissä olevassa kirjallisuudessa oli sangen ristiriitaisia tietoja interferenssin mahdollisuudesta. Käytetyllä valmistustekniikalla oli mahdollista asettaa paineputket tarkasti paikoilleen vain samaan riviin, ja toisaalta kärkivälin suunnassa eri etäisyyksillä sijaitsevien reikien sijainnin tarkistus olisi ollut vaikeaa. Tämän työn ollessa kirjoitusvaiheessa löytyi lähde /29/, jonka mukaan painereiän koolla voi olla huomattava vaikutus mitatun painekertoimen arvoon varsinkin profiilin etureunassa, missä paikallinen no-

peus on suuri ja pinnan kaarevuussäde pieni. Em. seikat huomioon ottaen päädyttiin samassa rivissä sijaitseviin paine-reikiin, mistä on saattanut aiheutua sekä alapinnan että mahdollisesti myös yläpinnan painejakautumaan häiriöitä, jotka vaikuttavat profiilin aerodynaamisiin kertoimiin.

5.3.3.2. Aerodynaamiset kertoimet

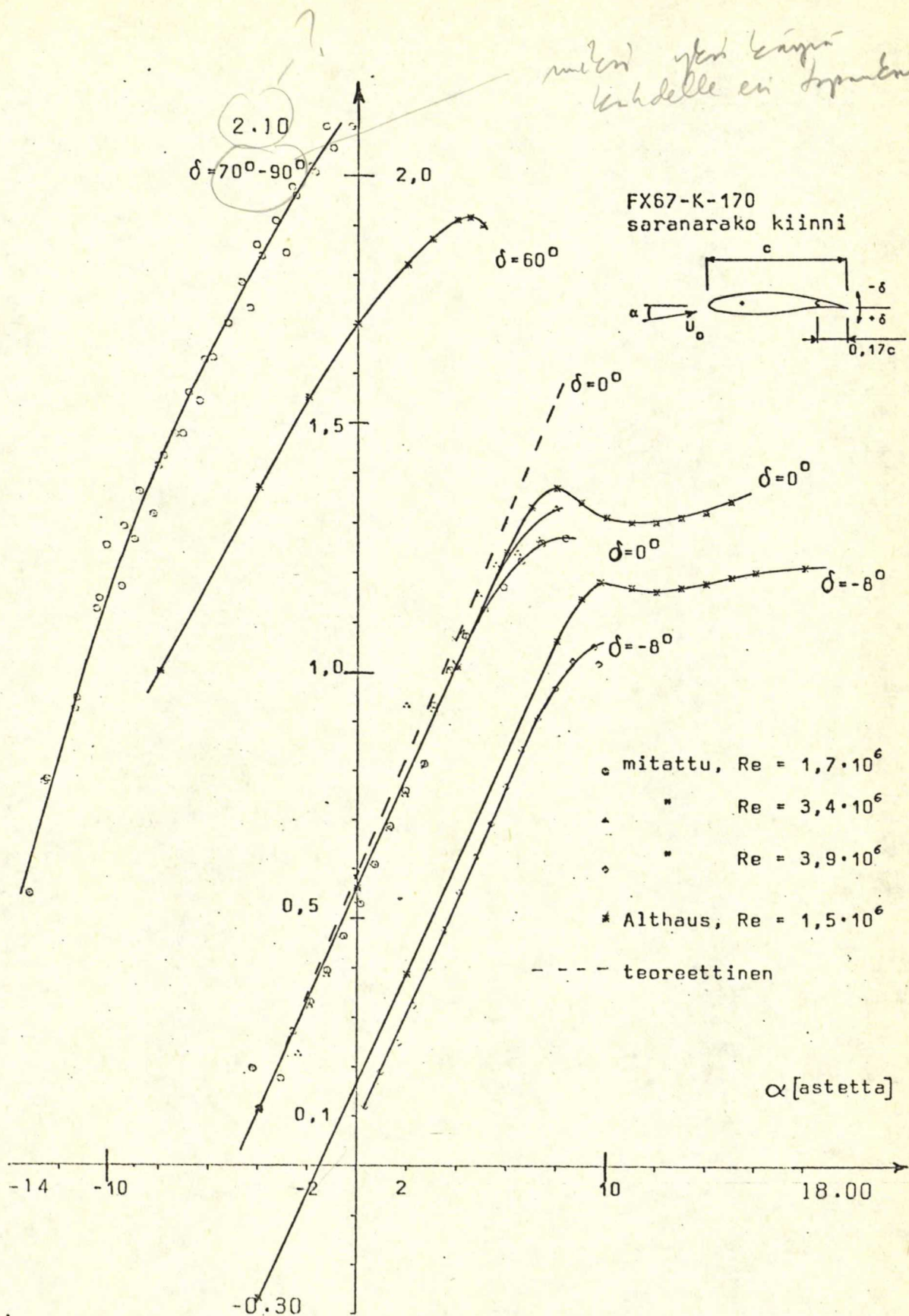
Kuvissa 18...20 on esitetty mittaustulosten perusteella lasketut nostovoima-, pituusmomentti- ja saranamomenttikerroin kohtauskulman funktiona siivekekulman ja Reynoldsin luvun ollessa parametreinä[⊙]. Vertailun vuoksi on piirretty myös Althausin mittaustuloksista sekä Smith&Hessin menetelmällä teoreettisesti lasketun nopeusjakautuman perusteella saatavat nostovoima- ja pituusmomenttikertoimet. Jälkimmäiset kertoimet ovat lineaarisia, koska teoria ei ota huomioon virtauksen irtoamista. Kohtauskulmat ovat kohdan 4.2.8. mukaan redusoituja; referenssikäyränä käytettiin Althausin mittaustulosta siivekekulmalla 0° .

a) Nostovoimakerroin, kuva 18

Sekä Althausin että mitatut käyrät vastaavat tilannetta, jolloin alapinnan saranarako on kiinni. Siivekekulmalla 0° ovat sekä mitatun että vertailukäyrän kaltevuudet ($c_{1\alpha}$) luonnollisesti samat. Nostovoimakertoimen kaltevuudeksi saadaan \times $0,114/\text{aste}$ ($=6,51/\text{rad}$), joka on hieman pienempi kuin teoreettisesti saatu arvo $0,121/\text{aste}$ ($=6,9/\text{rad}$). Mitattu arvo on hyvin lähellä N.A.C.A. 64- ja 65-sarjan saman paksuussuhteen omaavien profiilien $c_{1\alpha}$:aa ($=0,114...0,112$) (lähde /28./s.130).

⊙Tietokoneajojen listaukset ovat liitteessä IV.

x) Althaus saanut, ei selitys!



Kuva 18 Nostovoimakerroin (c_1) kohtauskulman (α) funktiona eri siivokekulmilla (δ) ja Reynoldsin luvuilla (Re)

Siivekekulmalla -8° on molempien käyrien nostovoimakertoimen kaltevuus sama kuin kulmalla 0° . Käyrät eivät kuitenkaan yhdy, mikä johtuu juuri siitä, että kohdassa 4.2.8. määritettiin kerroin e siivekekulmalla 0° . Kerrointa e muuttamalla saataisiin käyrät yhtymään, mutta tarkoitushan ei ole korjauskertoimien avulla päästä toisten mittaustuloksiin. Kertoimen e määrittäminen luotettavalla tavalla kaikille siivekekulmille vaatisi lisätutkimuksia, joita ei ole mahdollista sisällyttää tähän työhön.

Nostovoimakertoimen kaltevuus ei riipu profiilin käyristyksestä (pienet siivekekulman muutokset vastaavat vaikutukseltaan käyryyden muutosta) eikä Reynoldsin luvusta, mutta sen sijaan nostovoimakertoimen maksimiarvo suurenee Reynoldsin luvun kasvaessa. Suoritetuissa mittauksissa päästiin näihin yleisesti tunnettuihin tosiseikkoihin. - Nostovoimakertoimen maksimiarvo jää kuitenkin n. 8% Althausin tuloksia pienemmäksi ja käyrän huipun muoto loivemmaksi. Ilmiö muistuttaa pinnan karheuden vaikutusta, mutta sellaista se tuskin on, koska pinnan laatu oli erinomainen. Kuten kuvan 17 yhteydessä todettiin, on painereikien tiheä sijoitus etureunalla saattanut aiheuttaa häiriöitä, joiden vaikutus on samanluonteinen kuin pinnan karheuden.

Suurilla siivekekulmilla eroavat tulokset huomattavasti Althausin tuloksista. Tärkein vaikuttava tekijä on varmasti kerroin e (4.2.8.), joka tässä tapauksessa on liian pieni, koska siivekekulmalla on huomattava vaikutus kärkivälin suuntaiseen nostovoimajakautumaan. Mittaustuloksia ei kuitenkaan ole syytä epäillä täysin vääriksi, sillä A b b o t t and

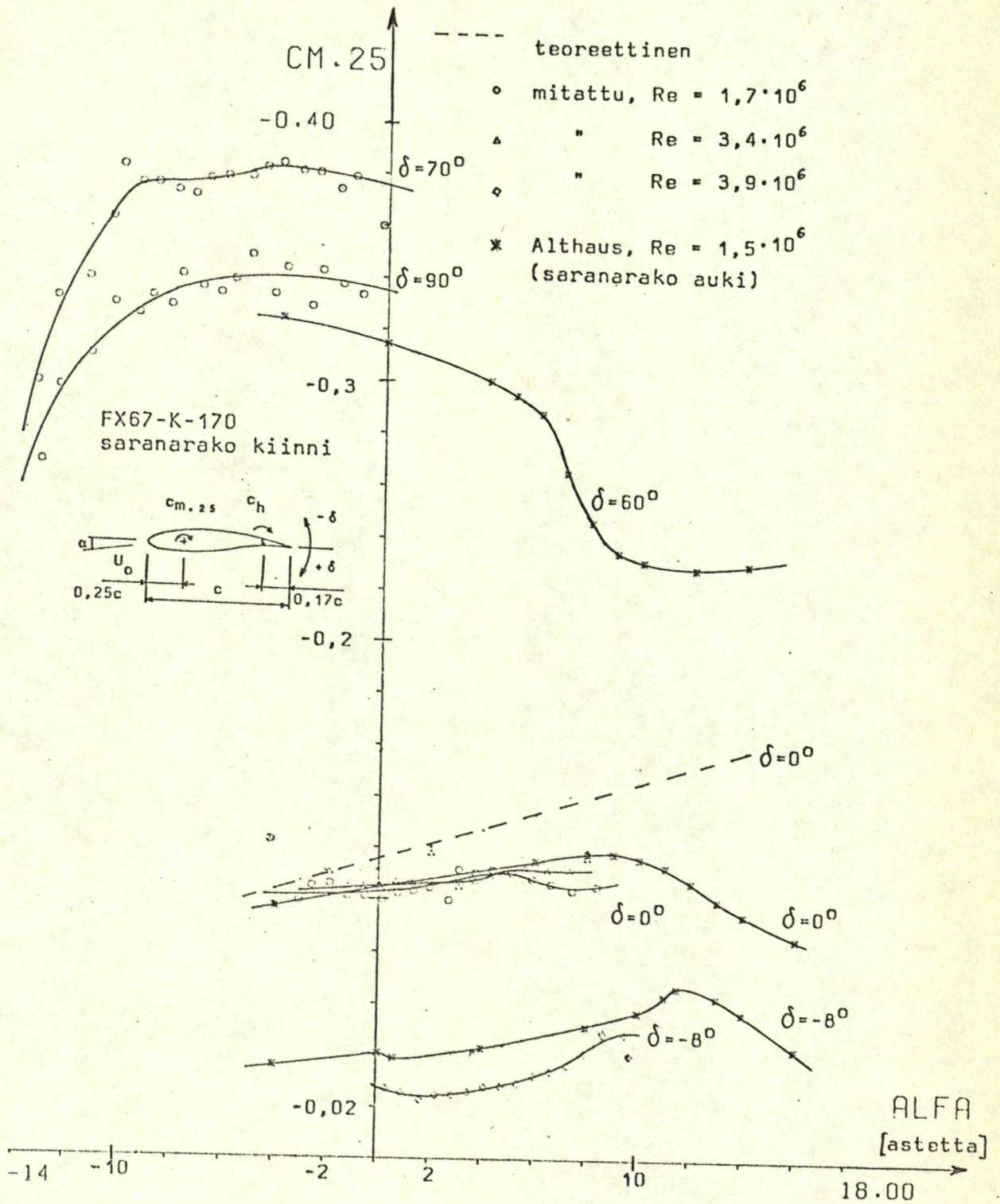
D o e n h o f f i n (lähde /28./s. 197) mukaan on N.A.C.A. 65- ja 66-sarjan profiileilla 60° - 70° :en siivekepoikkeutuskulmilla saatava nostovoimakertoimen maksimiarvo n. 80% suurempi kuin poikkeutuskulmalla 0° , joten Althausin tulokset tässä tapauksessa (lisäys vain 40%) vaikuttavat liian pieniltä.

Nostovoimakerroinkäyrän kaarevuus on lähteen /28./ mukaan tyypillinen suurilla siivekekulmilla. Kuvasta 18 saatava keskimääräinen (käyrän segmentin) nostovoimakertoimen kaltevuus on suunnilleen sama kuin siivekekulmalla 0° ja selvästi suurempi kuin Althausin tulos 60° :lla. Nostovoimakertoimen arvo ei enää näytä suurenevan, kun siivekekulmaa lisätään 70° :sta 90° :seen. Tämä vastaa C a h i l l i n esittämiä tuloksia (lähde /20./s. 5).

b) Pituusmomenttikerroin (neljännesjänteen suhteen), kuva 19

Siivekekulmalla 0° yhtyvät mittaustulokset hyvällä tarkkuudella Althausin tuloksiin. Nostovoimakerroinpolaarin lineaarista osaa vastaavilla kohtauskulmilla on pituusmomenttikerroin lähes lineaarinen. Erot Althausin ja mitatuissa arvoissa lineaarisen alueen jälkeen johtuvat samasta syystä kuin erot nostovoimakertoimen maksimiarvoissa. Molemmat mittaustulokset ovat selvästi pienemmät kuin teoreettisesti saadut tulokset. Reynoldsin luvun kaksinkertaistumisella ei ole merkittävää vaikutusta.

Siivekekulmilla -8° , 70° ja 90° eroavat tulokset selvästi Althausin arvoista. Huomattavin syy tähän on se, että Althausin mittauksissa on saranarako ollut auki, jolloin paineen



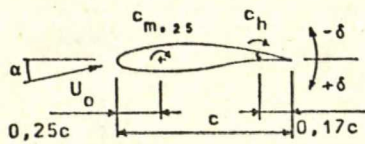
Kuva 19 Pituusmomenttikerroin ($c_{m,25}$) kohtauskulman (α) funktiona eri siivekekulmilla (δ) ja Reynoldsin luvuilla (Re)

tasaantumista pääsee tapahtumaan. Kertoimella e on myös oma vaikutuksensa, joka tosin kohdistuu lähes yksinomaan teholliseen kohtauskulmaan. Käyrien muodot ovat kuitenkin lähellä toisiaan. Pituusmomenttikertoimen itseisarvo pienenee siirtäessä siivekekulmasta 70° 90° :seen. Mittaustulosten suuri hajonta kulmalla 90° johtuu tällöin esiintyneestä paineiden pulssimaisesta värähtelystä.

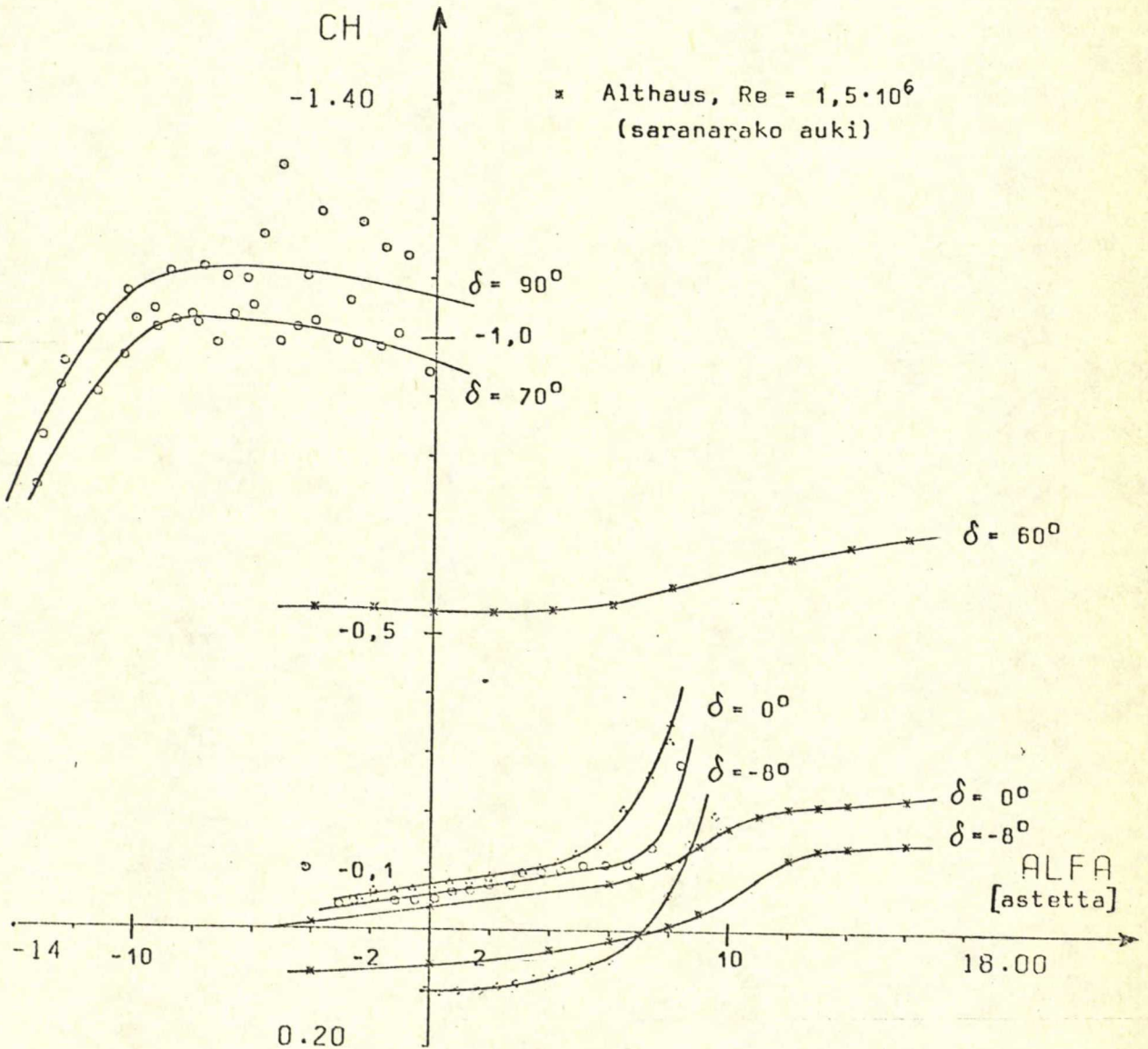
c) Saranamomenttikerroin, kuva 20

Saranamomenttikertoimia verrattaessa on otettava huomioon, että Althausin mittauksissa oli saranarako auki. Mittaustuloksissa pienillä siivekekulmilla esiintyvä kertoimen itseisarvon jyrkkä kasvu, joka tapahtuu lähellä nostovoimakerroimen maksimiarvoa vastaavaa kohtauskulmaa, johtuu juuri siitä, että paineiden tasaantumista ei pääse tapahtumaan. Kuten kuvasta 15 nähdään, on paine-ero ylä- ja alapinnan välillä saranaviivan kohdalla varsin pieni, jolloin paineiden tasaantumisella on momenttikertoimiin vähäinen vaikutus, joka kuitenkin suurenee jyrkästi kohtauskulman kasvaessa. Suurilla siivekekulmilla (kuva 16) on paine-ero suuri ja tasaantumisen vaikuttaa huomattavasti momenttikertoimiin. Kohtauskulman kasvaessa on siivekekulmilla 70° ja 90° odotettavissa pienillä siivekekulmilla esiintyvä kertoimen itseisarvon jyrkkä kasvu, joka ei kuitenkaan ole yhtä voimakas (vrt. Althaus 60°). Mittaustulosten hajonta johtuu paineiden pulssimaisesta värähtelystä. Reynoldsin luvulla on selvästi pienentävä vaikutus saranamomenttikertoimeen.

FX67-K-170
saranarako kiinni



- o mitattu, $Re = 1,7 \cdot 10^6$
- " $Re = 3,4 \cdot 10^6$
- ◊ " $Re = 3,9 \cdot 10^6$



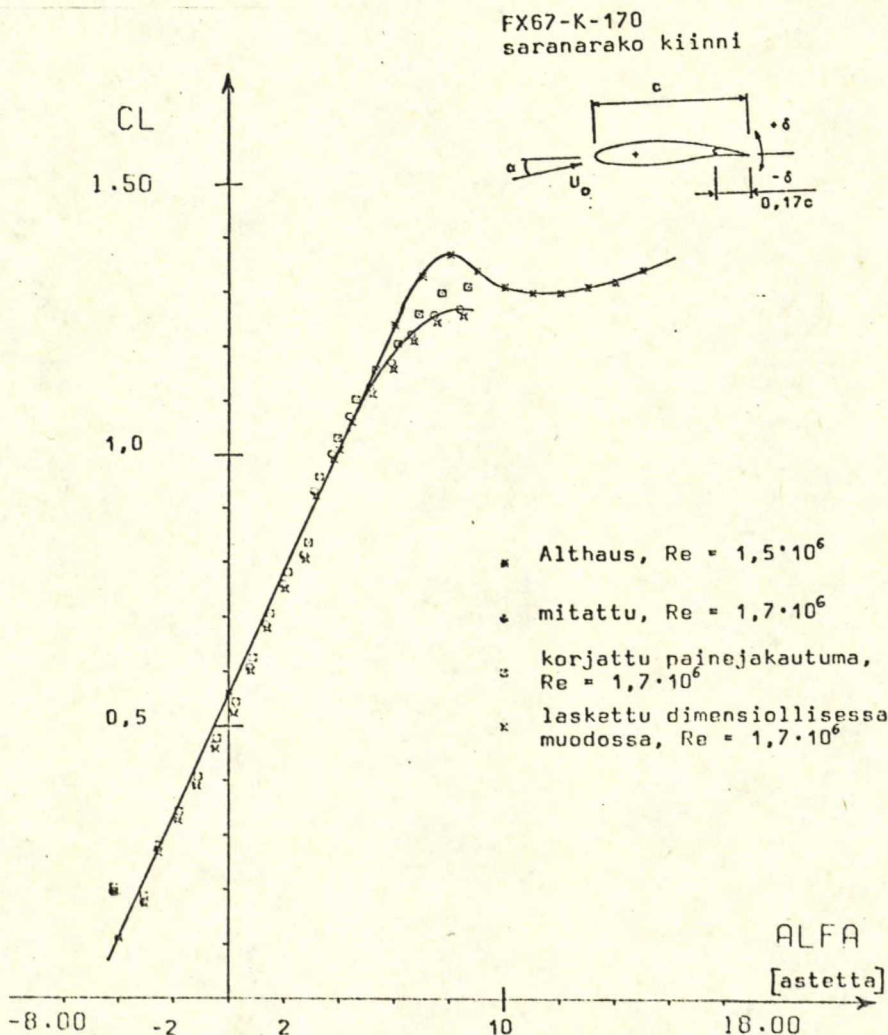
x Althaus, $Re = 1,5 \cdot 10^6$
(saranarako auki)

Kuva 20 Saranamomenttikerroin (c_h) kohtauskulman (α) funktiona eri siivekekulmilla (δ) ja Reynoldsin luvuilla (Re)

5.3.3.3. Laskentamenetelmien vertailu

Kuvaan 21 on piirretty siivekekulmaa 0° vastaava nostovoimakerroinpolaari

- kohdan 4.2.3. mukaisesti korjattuna (sama kuin kuvien 18...20 "mitattu" käyrä),
- korjatulla painejakautumalla (kohta 4.2.5.) laskettuna,
- kohdan 4.2.3. mukaisesti korjattuna, mutta dimensiollisessa muodossa laskettuna (muutos dimensiottomaksi on suoritettu vasta laskun lopussa) sekä
- vertailun vuoksi Althausin saamat tulokset.



Kuva 21 Laskentatavan vaikutus nostovoimakertoimeen

Laskentamenetelmillä ei näytä olevan merkittävää vaikutusta nostovoimakertoimeen, paitsi korjatulla painejakautumalla laskettaessa, jolloin saadaan hieman suurempi nostovoimakertoimen arvo kuin kohdan 4.2.3. mukaan. Maksimi-arvo ei kuitenkaan ulotu aivan Althausin tulokseen, ja huippu on edelleen loivempi kuin Althausin käyrässä.

Pituusmomenttikertoimeen ei laskentamenetelmän vaihto vaikuttanut sen enempää kuin nostovoimakertoimeenkaan. Pituusmomenttikerroin korjatulla painejakautumalla laskettuna oli n. 2-3% pienempi kuin mitattu kerroin koko kohtauskulma-alueella (kuva 22). Sen sijaan saranamomenttikerroin korjatusta painejakautumasta laskettuna eroaa mitatusta arvosta suhteellisesti paljon enemmän (kuva 23), mikä johtuu kahdesta tekijästä:

- Paine kertoimen korjaus on laskusiivekkeen osuudella suhteellisen suuri (liite V).
- Saranamomenttikertoimeen ei ole suoritettu tuulitunnelikorjausta (kohta 4.2.4.).

Dimensiollisena laskeminen ei vaikuta pituus- eikä saranamomenttikertoimeen enempää kuin nostovoimakertoimeenkaan, joten näitä käyriä ei ole piirretty kuviin 22 ja 23.

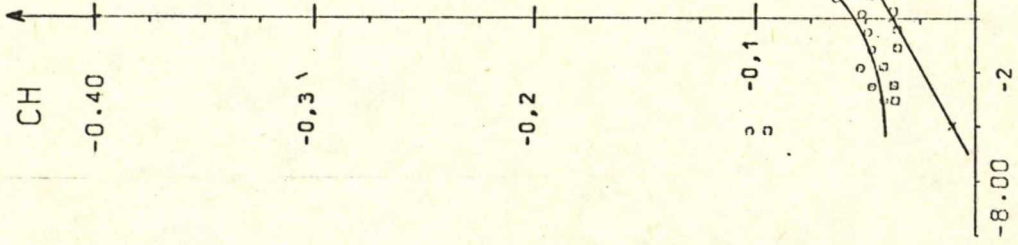
5.4. Yhteenveto profiilin painemittauksista

Saadut tulokset vastaavat odotetulla tavalla Althausin mittaamia arvoja. Ainoa yllätys oli nostovoimakertoimen maksimi-arvon jääminen vertailutuloksia pienemmäksi, minkä syyn var-

*Althaus, $Re = 1,5 \cdot 10^6$ (saranareko auki)

o mitattu, $Re = 1,7 \cdot 10^6$

o korjattu painejakautuma, $Re = 1,7 \cdot 10^6$

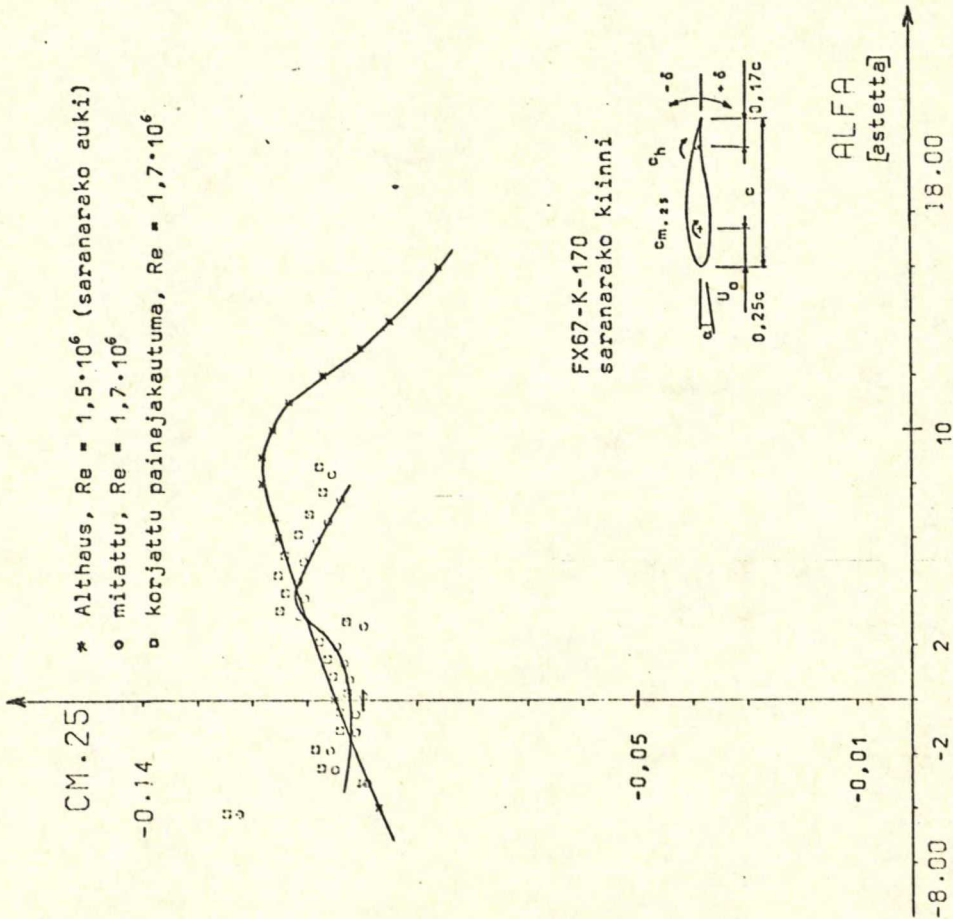


Kuva 23 Laskentatavan vaikutus saranamomenttikertoimeen

* Althaus, $Re = 1,5 \cdot 10^6$ (saranareko auki)

o mitattu, $Re = 1,7 \cdot 10^6$

o korjattu painejakautuma, $Re = 1,7 \cdot 10^6$



Kuva 22 Laskentatavan vaikutus pituusmomenttikertoimeen

mistaminen olisi vaatinut lisätutkimuksia. Lisämittauksia olisivat vaatineet ensinnäkin kertoimen e (kohta 4.2.8.) määrittäminen kullekin siivekekulmalle sekä toiseksi niiden polaarien jatkaminen, joiden nostovoimakertoimessa ei kohtauskulman suuren redusoinnin vuoksi päästy maksimiarvoon saakka. Koska tuulitunnelissa kuitenkin oli samaan aikaan käynnissä muita tutkimuksia ja kaksidimensionaalisen mittatilan asennustyöt aloitettiin, ei lisämittauksiin ollut mahdollisuutta.

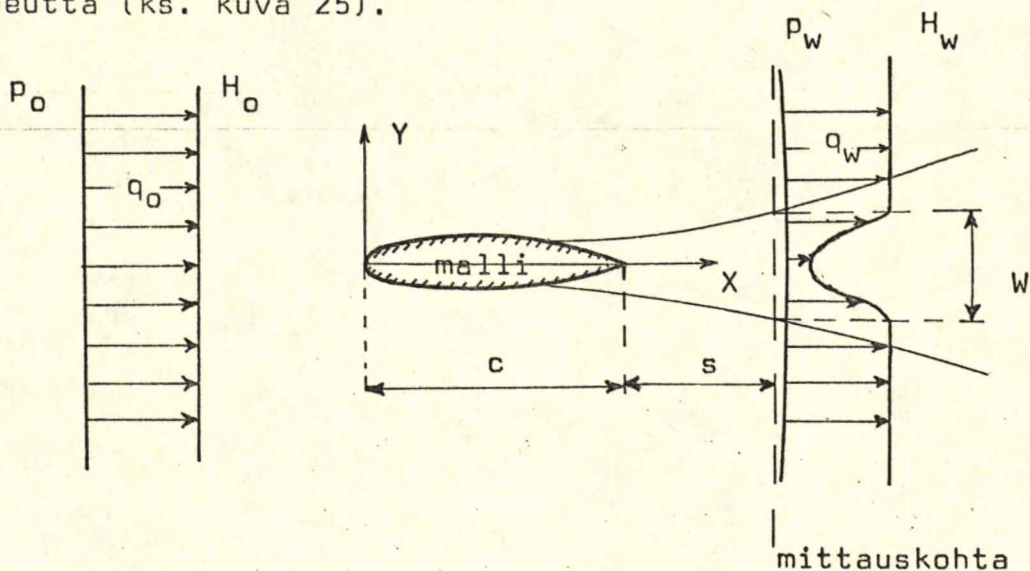
Datojen tulkitseminen negatiiveilta, lävistys ja tarkistus on niin työlästä, että tässä yhteydessä on ollut mahdollista esittää vain murto-osa rekisteröidystä aineistosta. Samasta syystä ei ollut järkevää suorittaa mittausten uusintoja hajonan selville saamiseksi. Joissakin polaarin yksityisissä pisteissä suoritettiin mittausten uusimisia, mutta hajonta oli sängen vaihteleva eikä sen perusteella voida tehdä johtopäätöksiä mittausten tarkkuudesta.

Laskentamenetelmiä tarkasteltaessa voidaan todeta, että vastaisuudessa kannattaa painemittausten yhteydessä käyttää painejakautuman korjausta, joka antaa tarkempia tuloksia. Tällöin saadaan myös saranamomenttikerroin vapaan virtauksen olosuhteita vastaavaksi. Tosin painejakautuman korjauksessa ei ole otettu huomioon tunnelin staattisen paineen gradientin vaikutusta, joka on vaikea määrittää analyttisesti, koska se riippuu kappaleen muodosta (lähde /30./s. 65). Gradientin vaikutus on kuitenkin yleensä pieni vastuskerrointa lukuun ottamatta (ks. kohta 4.2.3.2.).

6. VASTUSMITTAUKSET

6.1. Yleistä

Kun kappale on virtauksessa, muodostuu sen taakse vanavesi, jossa virtausnopeus on pienempi kuin häiriintymättömän virtauksen nopeus; on tapahtunut nopeushäviötä. Nopeus vanavedessä ei ole vakio, vaan se on pienin keskellä ja lähestyy laidoille siirryttäessä häiriintymättömän virtauksen nopeutta (ks. kuva 25).



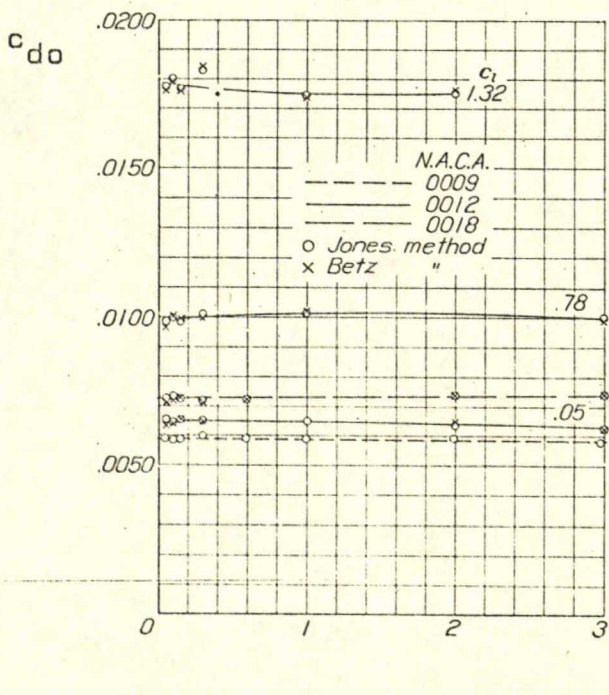
Kuva 25 Vanaveden muodostuminen mallin taakse

Profiilivastus voidaan määrittää virtauksessa tapahtuvasta liikemäärän häviöstä aikayksikköä kohden. Lähteessä /12./ on esitetty profiilivastuskertoimen (c_{d0}) lausekkeen johto perusteellisesti, joten tässä ei siihen puututa. Sen sijaan tarkastellaan saman lähteen perusteella niitä tekijöitä, jotka vaikuttavat mittaustarkkuuteen.

a) Jättöreunasta lasketun mittausetäisyyden vaikutus

Etäisyyksillä 0,15c...3c mitattaessa on vastusarvojen hajonta n. 3%, joten ottaen mittaustarkkuudet huomioon voidaan tuloksia pitää riippumattomina mittausetäisyydestä.

Lähellä mallia on vanavesi kapea ja nopeusgradientit suuria, kaukana mallista taas vanavesi on leveä ja gradientit pieniä. Molemmat ääritapaukset aiheuttavat hankaluuksia, koska jättövirtausharavaa ei voida valmistaa kovin pieneksi putkien keskinäisen interferenssin vuoksi ja pienillä nopeuseroilla ja -gradienteilla on mittaustarkkuus pieni. Mittaukset on sen vuoksi suoritettava "sopivan" matkan päästä profiilin jättöreunasta. Kuvassa 26 on esitetty profiilivastuskertoimen riippuvuus mittausetäisyydestä.



Kuva 26

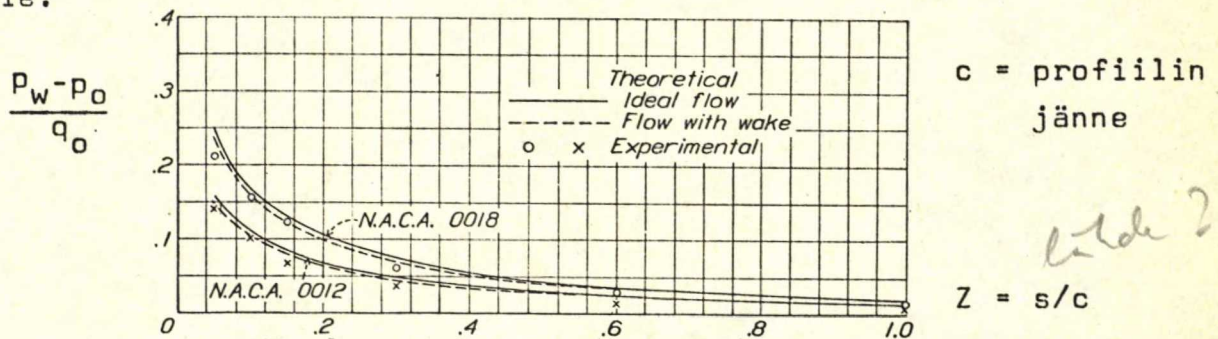
Mitatun profiilivastuksen (c_{do}) riippuvuus mittauskohdan etäisyydestä jättöreunasta (s)

c = profiilin jänne

b) Turbulenssin vaikutus vanaveden staattiseen paineeseen

Tutkimusten mukaan on turbulenssin vaikutus n. 2% lähellä jättöreunaa. Virhe pienenee mentäessä myötävirtaan, kohdalla 0,6c on ero teoreettiseen tapaukseen hävinnyt kokonaan. Ku-

vassa 27 on esitetty mallin edellä ja jäljessä vallitsevien staattisten paineiden suhteellinen ero teoreettisesti lasketuna sekä mittaustuloksista saatuna kahdelle eri NACA-profiilille.



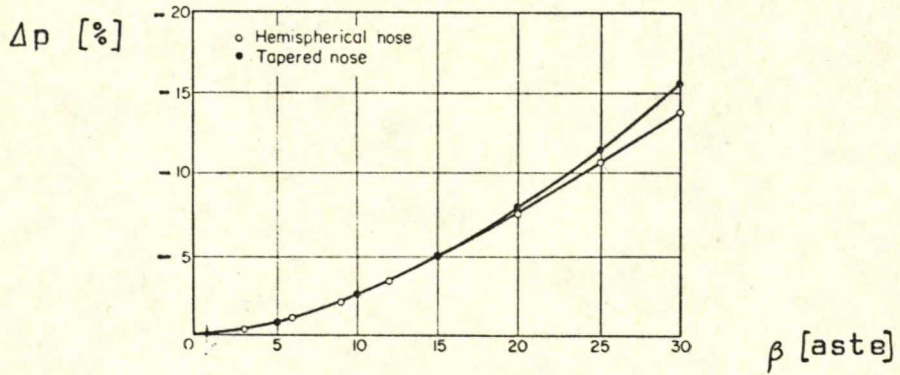
Kuva 27 Teoreettinen ja mitattu mallin edessä ja jäljessä vallitsevien staattisten paineiden suhteellinen erotus $((p_w - p_o)/q_o)$ jättöreunasta lasketun etäisyyden (s) funktiona

c) Nostovoiman vaikutus

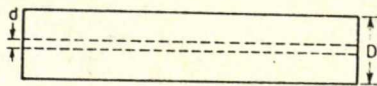
Edellä sanottu pätee tarkasti vain, kun profiililla ei ole nostovoimaa, ts. indusoitunut virtaus on nolla. Tilanne huononee, jos virtauksen irtoamista on päässyt tapahtumaan. Tällöin ei saada rekisteröidyksi sitä energiaa, joka kuluu pyörteiden synnyttämiseen, ja vastusarvoista saadaan liian optimistisia. Menetelmän tarkkuus huononee siten suurilla laskusiiveke- ja kohtauskulmilla.

d) Virtauksen suunnan aiheuttamat virheet

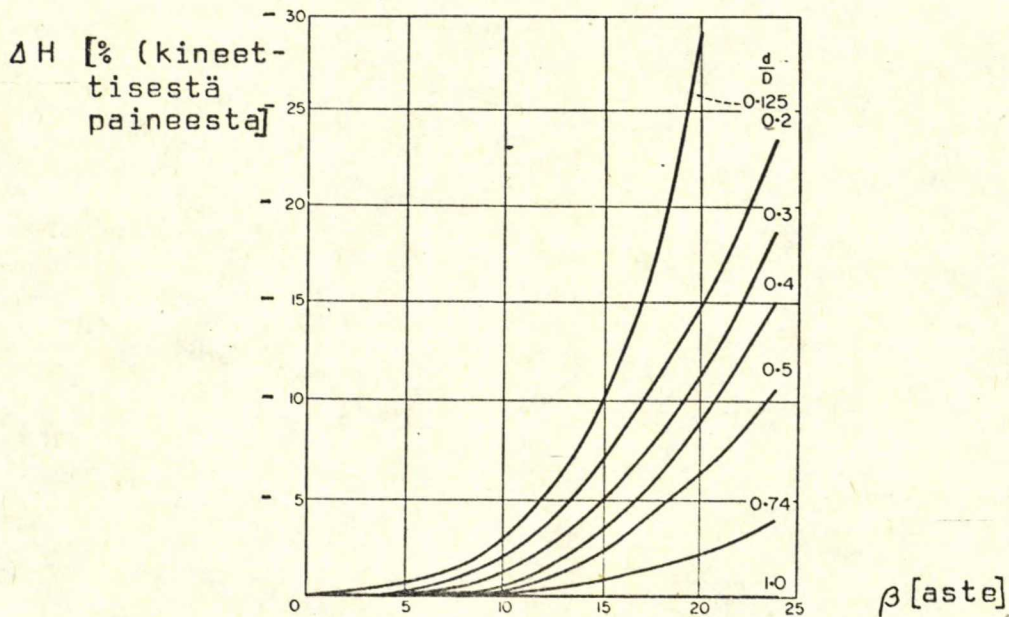
Jättövirtauskanavan paineputkien tulisi olla mahdollisimman tarkasti virtauksen suuntaiset. Mikäli haravan suunta eroaa virtauksen suunnasta, muuttuvat paineanturien antamat lukemat. Staattisen paineen putket ovat herkempiä virtauksen suuntavirheille kuin kokonaispaineputket. Kuvissa 28 ja 29 on esitetty pitotputken ja staattisen paineen putken näyttämä virhe virtauksen suuntaeron funktiona.



Kuva 28 Staattisen paineen putken näyttämän muutos (Δp) putken kohtauskulman (β) funktiona *lähde?*



Pitotputken geometria

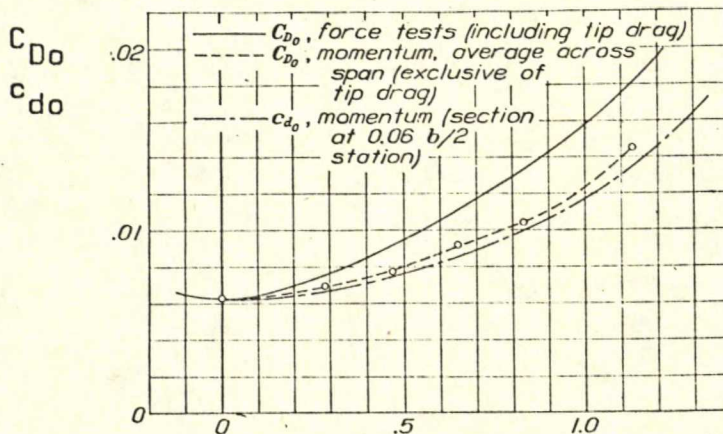


Kuva 29 Pitotputken näyttämän muutos (ΔH) putken kohtauskulman (β) funktiona

e) Menetelmän tarkkuus

Liikemäärämenetelmällä saatujen vastusarvojen tarkkuutta voidaan arvioida vertaamalla niitä voimamittausten antamiin tuloksiin.

Mikäli mallilla ei ole nostovoimaa, on ero voimamittauksiin verrattuna alle kaksi prosenttia. Verrattaessa tuloksia silloin, kun nostovoimakerroin eroaa nollasta, on voimamittauksista vähennettävä indusoidun vastuksen osuus, jolloin vastuskertoimet ovat keskenään vertailukelpoisia. Esimerkiksi N.A.C.A. 0012 -profiilille erot vastuskertoimessa vaihtelevat yhdestä prosentista nollanostovoimalla 22 prosenttiin nostovoimakertoimen arvolla 1.0 (ks. kuva 30).



C_L = kokonaisnostovoimakerroin
 C_{D0} = kokonaisvastuskerroin
 c_l = profiilin nostovoimakerroin
 c_{d0} = profiilivastuskerroin

lode?

Kuva 30 Voimamittauksilla ja liikemäärämenetelmällä saatujen vastuskertoimien vertailu

Erot johtuvat pääasiassa mallin kärkien ympäri tapahtuvan paineentasaantumisen synnyttämistä pyörteistä. Jos profiilivastus määritetään alueelta, joka ulottuu korkeintaan

0.39 * mallin kärkivälin etäisyydelle keskiviivan molemmin puolin, on kärkipyörteiden vaikutus pieni ja ero voimamittauksiin verrattuna alle 2,5 prosenttia nostovoimakertoimeen $c_1 = 1,0$ asti. Nostovoimakertoimen kasvaessa huononee liikemäärämenetelmän luotettavuus entisestäänkin, koska virtauksen alkaessa irrota syntyy pyörteitä, joiden sitomaa energiaa ei saada mitatuksi.

Edellä mainitut lukuarvot liittyvät malliin (profiili N.A.C.A. 0012), jossa paineen tasaantuminen kärkien ympäri pääsee vapaasti tapahtumaan. Mikäli tasaantumista estetään päätylevyillä tai ripustamalla malli kaksidimensionaaliseen mittatilaan, saadaan liikemäärämenetelmällä edellistä luotettavampia tuloksia.

6.2. Haravan valmistus

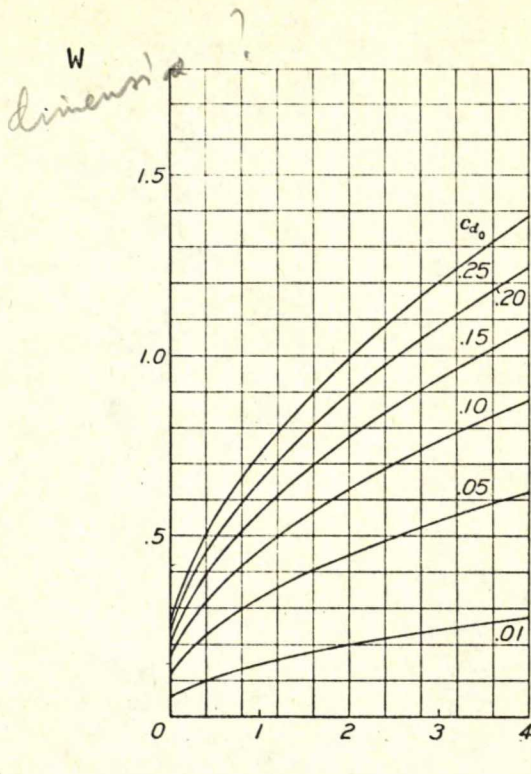
Jättövirtausharava valmistettiin TKK:n virtauslaboratoriossa.

Haravan dimensioita määrättäessä käytettiin hyväksi lähteen /13./ sivulla 21 olevaa käyrästöä, josta selviää vana-veden leveyden riippuvuus profiilivastuskertoimesta ja jättöreunasta lasketusta etäisyydestä (kuva 31).

A l t h a u s i n (lähde /24./) mukaan saadaan profiilivastuskertoimelle maksimiarvo:

$$(c_{do})_{\max} \approx 0,2$$

Tällöin on siivekekulma (σ) 90° ja nostovoimakerroin (c_1) 1,8. Profiili on FX67-K-150, joka vastaa tutkimuksen kohteena olevaa profiilia, mutta jonka paksuussuhde on 15%, joten sille mitattuja arvoja voidaan käyttää tässä alkutietoina.



$c = \text{profiilin jänne}$
 $W = 1,36c_{d0}^{\frac{1}{2}} (Z+0,15)^{\frac{1}{2}}$

$Z = s/c$

Kuva 31 Vanaveden leveys (W) jättöreunasta lasketun etäisyyden (s) funktiona eri profiilivastuskertoimilla (c_{d0})

Jättövirtausharava oli helpoimmin kiinnitettävissä mitatilan lattiaan kohdalle, jonka etäisyys mallin jättöreunasta oli $0,5c$. Kuvan 31 mukaan saadaan tällöin vanaveden maksimileveydeksi likimain $0,5c$.

Interferenssin vuoksi tulisi pitotputkien etäisyyden toisistaan olla vähintään kaksi kertaa putken ulkohalkaisija. Käytetyt putkien koot selviävät seuraavasta taulukosta.

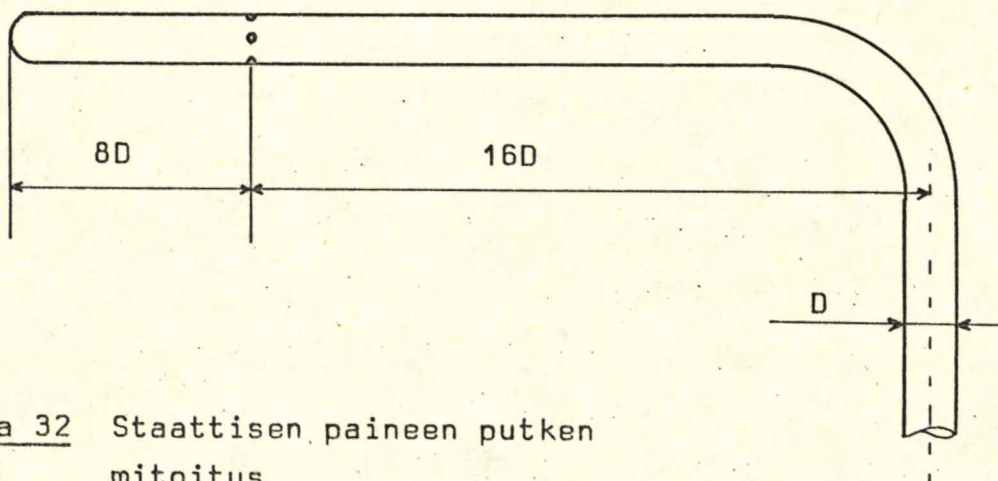
Taulukko 4

Jättövirtausharavassa käytettyjen paineputkien dimensioita

	ulkohalk. (D)/mm	sisähalk. (d)/mm	d/D
pitotputki	2	1	0,5
staattisen paineen putki	3	2	0,67

Pitotputkien minimietäisyydeksi valittiin $3D = 6$ mm ja lukumääräksi 31 kpl. Staattisen paineen putkia sijoitettiin haravaan 3 kpl. Putkien sijainti selviää liitteessä VI olevasta piirustuksesta. Valitulla pitotputkien sijoittelulla saatiin haravan mitta-alueen leveydeksi 368 mm ($0,42c$), joka kuvan 31 mukaan vastaa vastuskerrointa $c_{do} = 0,15$, kun mittausetäisyys on edellä mainittu $0,5c$. Tämän katsottiin riittävän, koska suurilla nostovoimakertoimen arvoilla ei mittauksia kannata suorittaa epätarkkuuden vuoksi.

Staattisen paineen putkien reikien paikat määrättiin lähteen /23./ mukaan:



Kuva 32 Staattisen paineen putken mitoitus

Käytetyn putken ulkohalkaisija (D) oli 3 mm, joten kuvassa 32 esiintyvälle suureille saadaan arvot:

$$8D = 24 \text{ mm,}$$

$$16D = 48 \text{ mm, jonka tilalle valittiin kuitenkin}$$

$23D = 69$ mm, koska putken varsi oli suhteellisen paksu ja suuntautui vinosti eteenpäin, jolloin sen vaikutus staattisen paineen lisäykseen reikien kohdalla on ilmeisesti suu-

rempi kuin standardin mukaisella staattisen paineen putken varrella.

Painereiät porattiin halkaisijaltaan 0,8 mm:n poralla 90^o:en välein. Putkien viimeistelyyn kiinnitettiin erityistä huomiota.

Haravan kiinnitysjalustan ja suunnansäätömekanismin rakenne sekä korkeuden säätömahdollisuus selviävät liitteen VI piirustuksista. Haravan suuntaa voitiin muuttaa ajon aikana, kun taas korkeuden säätöä varten oli tunneli pysäytettävä.

6.3. Haravan kalibrointi

Haravan mittaustarkkuuden selville saamiseksi suoritettiin kalibrointi tunnelissa ilman mallia. Lähteessä /6./ esitetyn tuulitunnelin virtauksen kalibroinnin ja suoritettujen lisämittausten perusteella tiedetään, mikä kineettisen ja staattisen paineen tulisi olla haravan kohdalla. Vertaamalla näitä arvoja haravan antamiin voidaan määrittää tarvittavat korjauskertoimet.

Koska profiilivastuksen laskemisessa tarvitaan kineettinen paine vanavedessä sekä häiriintymättömän virtauksen ja vanaveden staattisten paineiden erotus (ks. kohta 6.5.), määrättiin korjauskertoimet suoraan näille suureille.

Painekytkenät olivat kuvan 35 mukaiset (ilman mallia).

Kalibrointiajot suoritettiin haravan kahdella eri korkeusasetuksella: haravan keskipiste 30 mm ja 300 mm tunnelin keskiviivan yläpuolella (ääriasemat), kolmella eri kineettisellä paineella: 14, 63 ja 134 mm H₂O (lukemat Betz-manometrin näyttämiä) sekä virtauksen ja haravan suunnan välisen

kulman (β) vaihdellessa välillä $-11^{\circ} \dots +9^{\circ}$ (merkkisääntö selviää kuvasta 33). Manometrin näyttämät valokuvattiin.

Haravan paineanturien etäisyys mittatilan alusta oli 308 cm. Tällä kohdalla ovat kineettinen paine (q_{oh}) ja staattinen paine (p_{oh}) seuraavat:

$$q_{oh} = (1,017 + 2 \cdot 0,0013) q_0'' \quad (6.3.1.)$$

$$p_{oh} = p_0'' - \frac{2,25 + 0,28}{100} q_0'$$

Tässä q_0'' ja p_0'' ovat tunnelin kiinteistä mittalaitteista saatavat lukemat ja q_0' on kineettinen paine mittatilan keskipisteessä ($=1,017 q_0''$). Kerroin 0,0013 vastaa nopeuden kasvamista siirryttäessä keskipisteestä haravan kohdalle, jolloin kineettisen paineen lisäys on kaksinkertainen, ja 0,28 staattisen paineen laskua vastaavalla matkalla. Kertoimet on saatu lähteen /6./ kuvista 7.3.1 ja 7.3.2 sekä TKK:n virtauslaboratoriossa suoritetuista kiinteän nopeudenmittauslaitteiston uusituista kalibroinneista. Kun vielä q_0'' muutetaan kineettisen paineen yhtälössä vesimillimetreistä silikoniöljymillimetreiksi (mmSil) jakamalla ko. öljyn tiheydellä 0,7914, saadaan yhtälöistä (6.3.1.):

$$q_{oh} \text{ (mmSil)} = 1,288 q_0'' \text{ (mmH}_2\text{O)} \quad (6.3.2.)$$

$$(p_0'' - p_{oh}) \text{ (mmH}_2\text{O)} = 0,0257 q_0' \text{ (mmH}_2\text{O)}$$

Kineettisen paineen korjauskerroin (K) ja staattisten paineiden erotuksen korjauskerroin (S) saadaan jakamalla yhtälöiden (6.3.2.) molemmat puolet vastaavilla mitatuilla suureilla, jolloin

$$K = q_{oh}''/q_h'' = 1,288q_o''(\text{mmH}_2\text{O})/(H_h''-p_h'')(\text{mmSil})$$

$$S = \frac{p_o''-p_{oh}''}{p_o''-p_h''} = \frac{0,0257q_o''}{p_o''-p_h''} \quad (6.3.3.)$$

Tässä on

q_h haravan antama kineettinen paine

p_h haravan antama staattinen paine

H_h haravan antama kokonaispaine

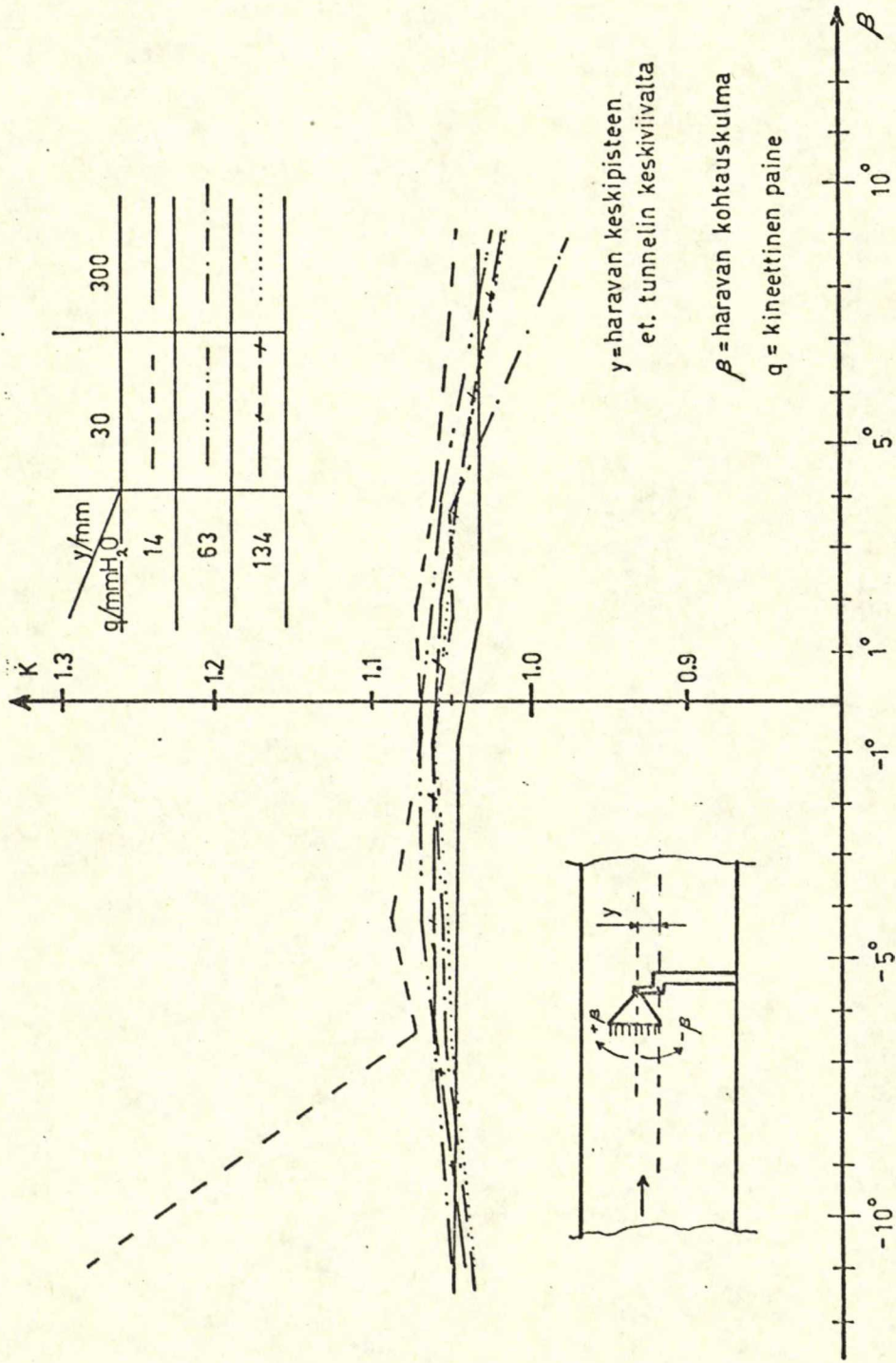
Kalibrointiajoista saadut mittaustulokset käsiteltiin BASIC-kielisellä HARKAL-ohjelmalla (liite VII). Korjauskertoimet K ja S haravan kohtauskulman funktiona, tunnelin kineettisen paineen ja haravan sijainnin pystytasossa ollessa parametreinä, selviävät kuvista 33 ja 34. Numeeriset tulokset ovat ohjelman listauksen yhteydessä (liiteVIII). Profiilivastuskertoimia laskettaessa käytettiin korjauskertoimina kalibrointitulosten keskiarvoja kohtauskulman arvolla $\beta=0$. Kertoimiksi saatiin tällöin

$$K = 1,057$$

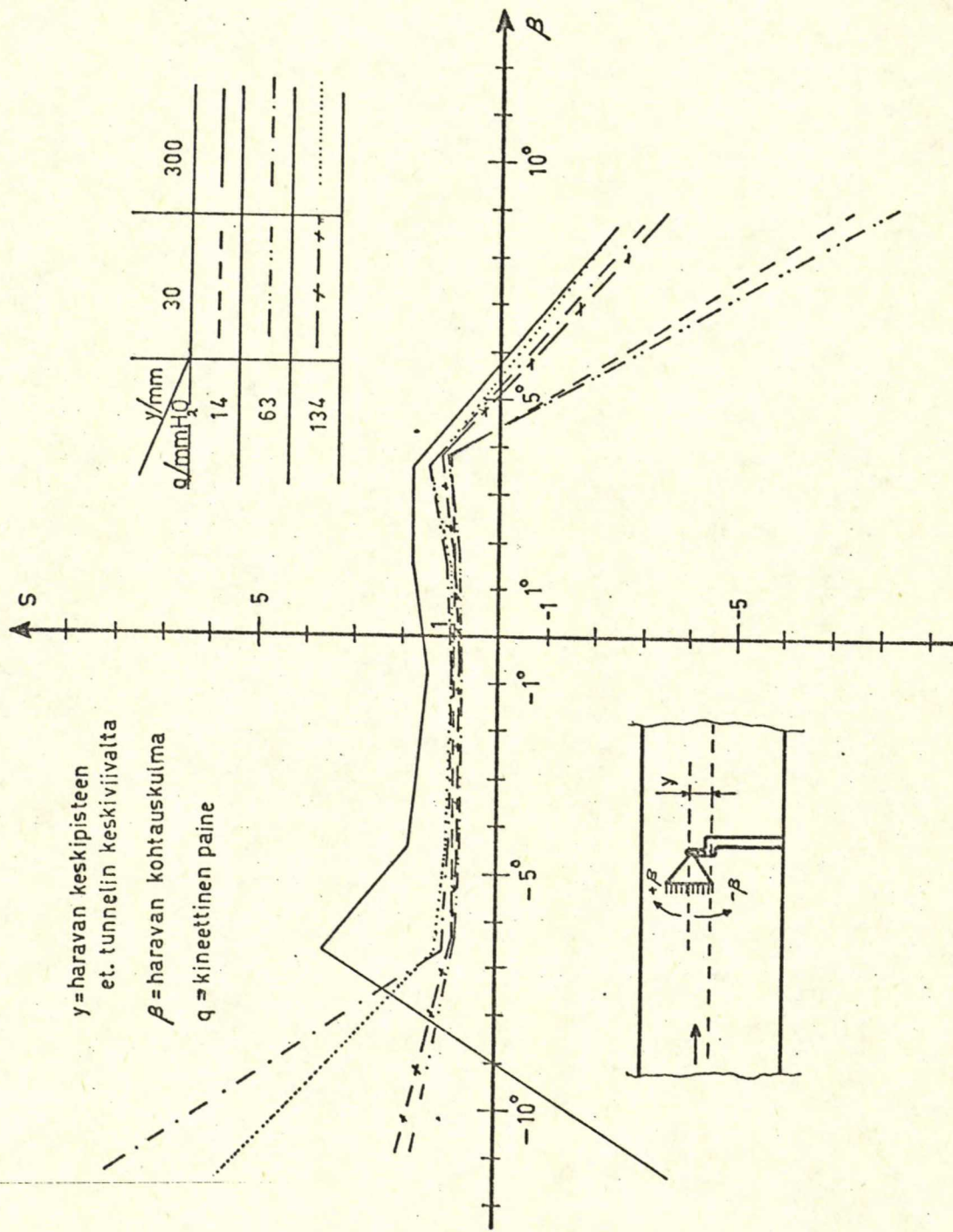
$$S = 1,021$$

Kuvista 33 ja 34 havaitaan, että korjauskertoimet K ja S ovat lähes vakioita välillä $\beta = -6^\circ \dots +3^\circ$, jonka jälkeen S muuttuu voimakkaasti, kun taas K:n muutos on vähäinen - staattisen paineen putki on herkempi suuntavirheille kuin pitotputki. Korjauskertoimen S käyrästön se osa, joka ulottuu negatiivisille arvoille, on käyttökeltoton (kerroin 0 on jo mahdoton) ja osoittaa haravan laadussa olevan vikaa. Korjauskertoimen K muutos on juuri päinvastainen kuin kuvassa 29 on esitetty, mikä myöskin johtunee valmistusvirheistä

Onko S:n määrittely järjellä?



Kuva 33 Haravan kalibrointi, kineettisen paineen korjauskerroin K



Kuva 34 Haravan kalibrointi, staattisen paineen korjauskerroin S

tai -epätarkkuuksista. Pienillä kineettisillä paineilla ovat tulokset epäluotettavia, mikä johtuu multimanometrin lukematakkkuuden ($\pm 0,5\text{mm}$) riittämättömyydestä.

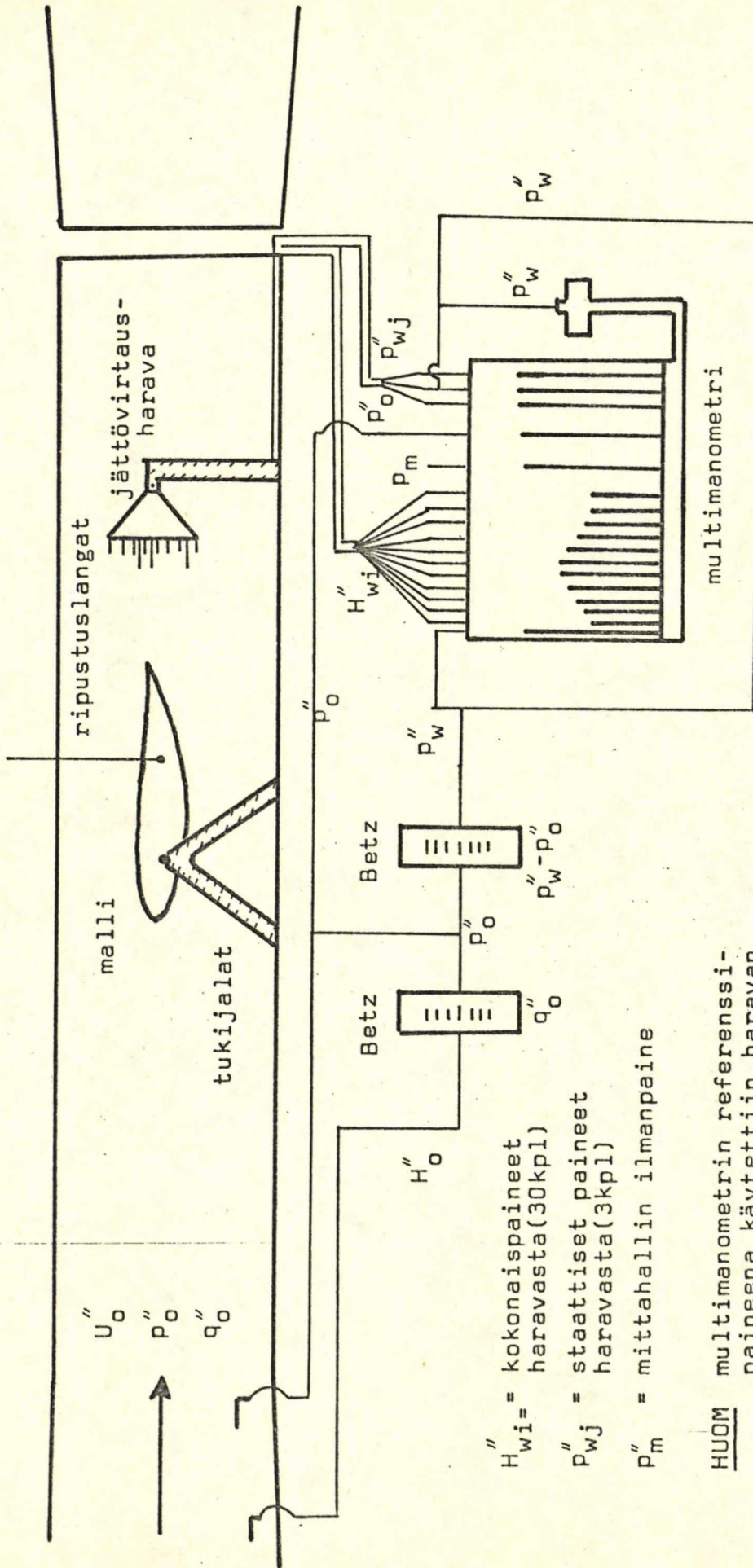
Haravan kulman säätötarkkuus ajon aikana oli $\pm 0,5^\circ$. Mikäli tarkkuus olisi ollut parempi, olisi kuvista 33 ja 34 ollut mahdollista määrittää likimain tunnelin virtauksen suunta-poikkeama absoluuttisesta 0-viivasta. Korjauskerroin-käyrillä on havaittavissa ääriarvo negatiivisilla kulmilla eli virtaus mittatilassa suuntautuu lievästi ylöspäin vaakatasosta.

Haravalle voidaan kokonaisuudessaan antaa arvosana välttävä. Tämän työn puitteissa ei kuitenkaan ollut aikaa suorittaa useita haravan säätöjä ja kalibrointeja, joilla olisi ollut mahdollista saavuttaa tarkempia tuloksia.

6.4. Mittausten suoritus

Vastusmittauksissa käytiin lävitse samat polaarit kuin kohdan 5.3. jänteen suuntaisen painejakautuman mittauksissakin. Siivekekulman $\delta = 90^\circ$ mittaukset jätettiin kuitenkin suorittamatta, koska virtaus oli pyörteistä ja multimanometrin nestepatsaat heiluilivat niin voimakkaasti, ettei luotettavia tuloksia olisi ollut mahdollista saada. Mittauksissa käytetyt painekytkenät selviävät kuvasta 35.

Mittausten suoritustapa erosi profiilimittauksista siten, että yhdestä polaarista voitiin samalla haravan korkeusasetuksella mitata vain 2-5 pistettä, koska vanavesi siirtyi ylöspäin kohtauskulmaa lisättäessä. Koska tunneli jouduttiin pysäyttämään säätöjen välillä, oli tästä odotetta-



H''_{wi} = kokonaispaineet haravasta (30kpl)
 p''_{wj} = staattiset paineet haravasta (3kpl)
 p''_m = mittahallin ilmanpaine

HUOM multimanometrin referenssipaineena käytettiin haravan keskikohdan staattista painetta

H''_o = kokonaispaine mittalaitteista
 p''_o = staattinen paine mittalaitteista
 q''_o = kineettinen paine mittalaitteista

Kuva 35 Painekytkentöjen periaate vastusmittauksissa

vissa epätarkkuuksia tuloksiin olosuhteiden ja säätöjen muut-
tuessa hieman.

Harava säädettiin virtauksen suuntaiseksi mallin jättö-
reunaan kiinnitetyn, n. 0,5 m pitkän langan toimiessa virta-
uksen suuntailmaisimena. Virtauksen kulmavirhe pyrittiin pi-
tämään välillä $-6^{\circ} \dots +3^{\circ}$.

6.5. Laskentamenetelmät

Lähteessä /12./ on esitetty profiilivastuskertoimen lau-
sekkeen johtaminen ja päädytty J o n e s i n kaavaan (ks.
kuva 25):

$$c'_{do} = \frac{2}{c} \int_{-W/2}^{W/2} \frac{H_w - p_w}{H_o - p_o} \left(1 - \frac{H_w - p_o}{H_o - p_o}\right) dy_w \quad (6.5.1.)$$

Tässä

H = kokonaispaine

p = staattinen paine

alaindeksi w viittaa vanaveteen ja

o häiriintymättömään virtaukseen

Lausekkeiden

$$H_w - p_w = q_w \text{ ja}$$

$$H_o - p_o = q_o$$

arvot saadaan multimanometrillä ja tunnelin kiinteästä mit-
talaitteistosta suorittamalla kohtien 4.2.6. ja 6.3. mukai-
set korjaukset. Lauseke $(H_w - p_o)$ voidaan kirjoittaa muotoon:

$$H_w - p_o = (H_w - p_w) + (p_w - p_o)$$

Termin ($p_w - p_0$) arvot saadaan korjaamalla kohdan 6.3. mukaisesti Betz-manometrillä mitattu suure ($p_w'' - p_0''$).

Profiilivastuskertoimen tuulitunnelikorjaukset on esitetty kohdassa (4.2.3.). Integrointi kaavassa (6.5.1.) suoritettiin puolisuunnikkasäännöllä pääohjelman yhteydessä (kohta 5.3.2.2.).

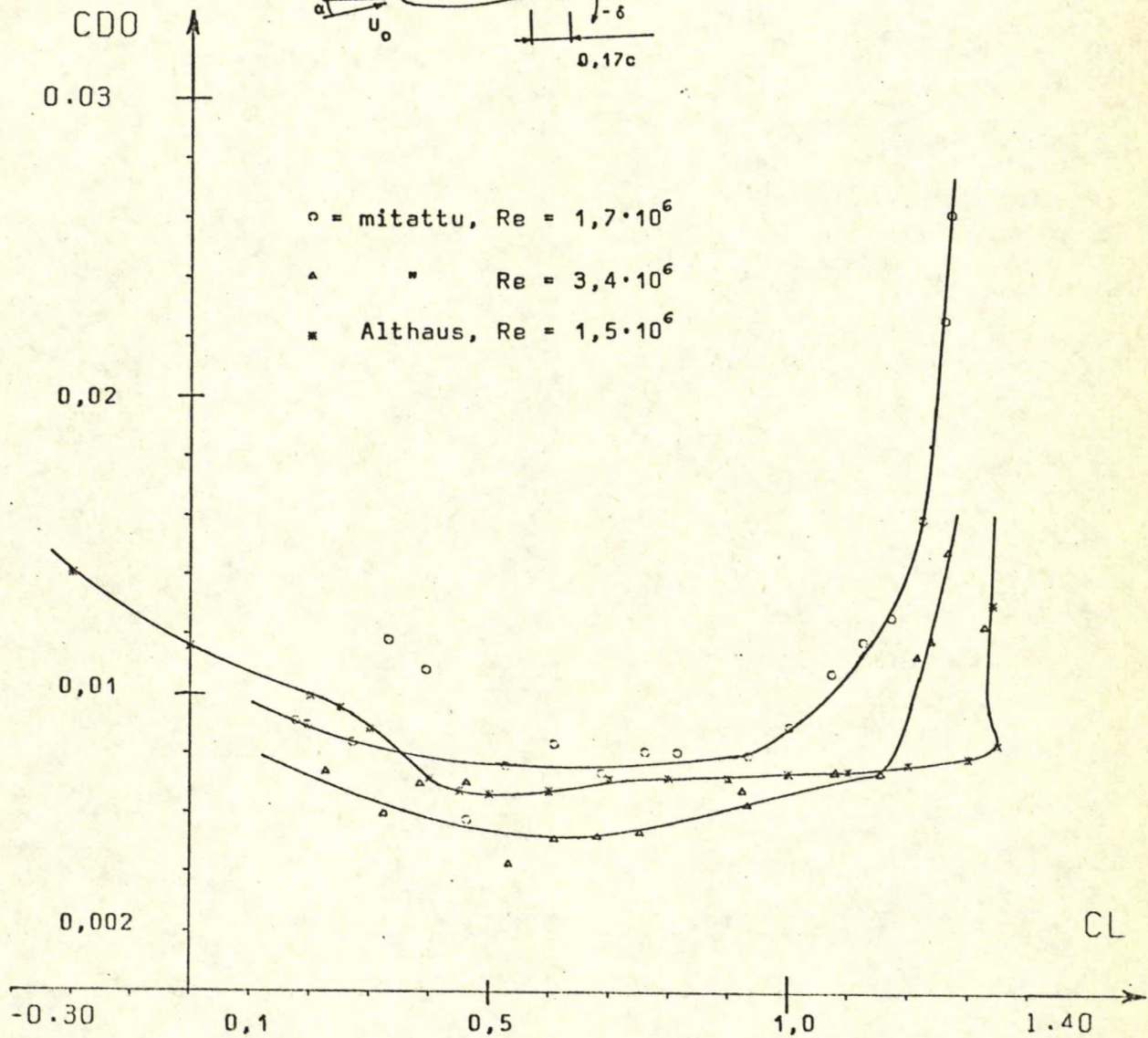
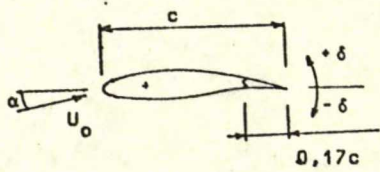
6.6. Mittausten tulokset

Kuviin 36 ja 37 on piirretty vastusmittausten tulokset siivekekulmilla 0° ja -8° sekä vastaavat Althausin tulokset. Siivekekulmilla 70° ja 90° ei ollut mahdollista saada luotettavia tuloksia siivekkeen aiheuttamien pyörteiden voimakkuuden ja vanaveden suuren leveyden vuoksi. Tietokoneleistaukset on esitetty liitteessä IV.

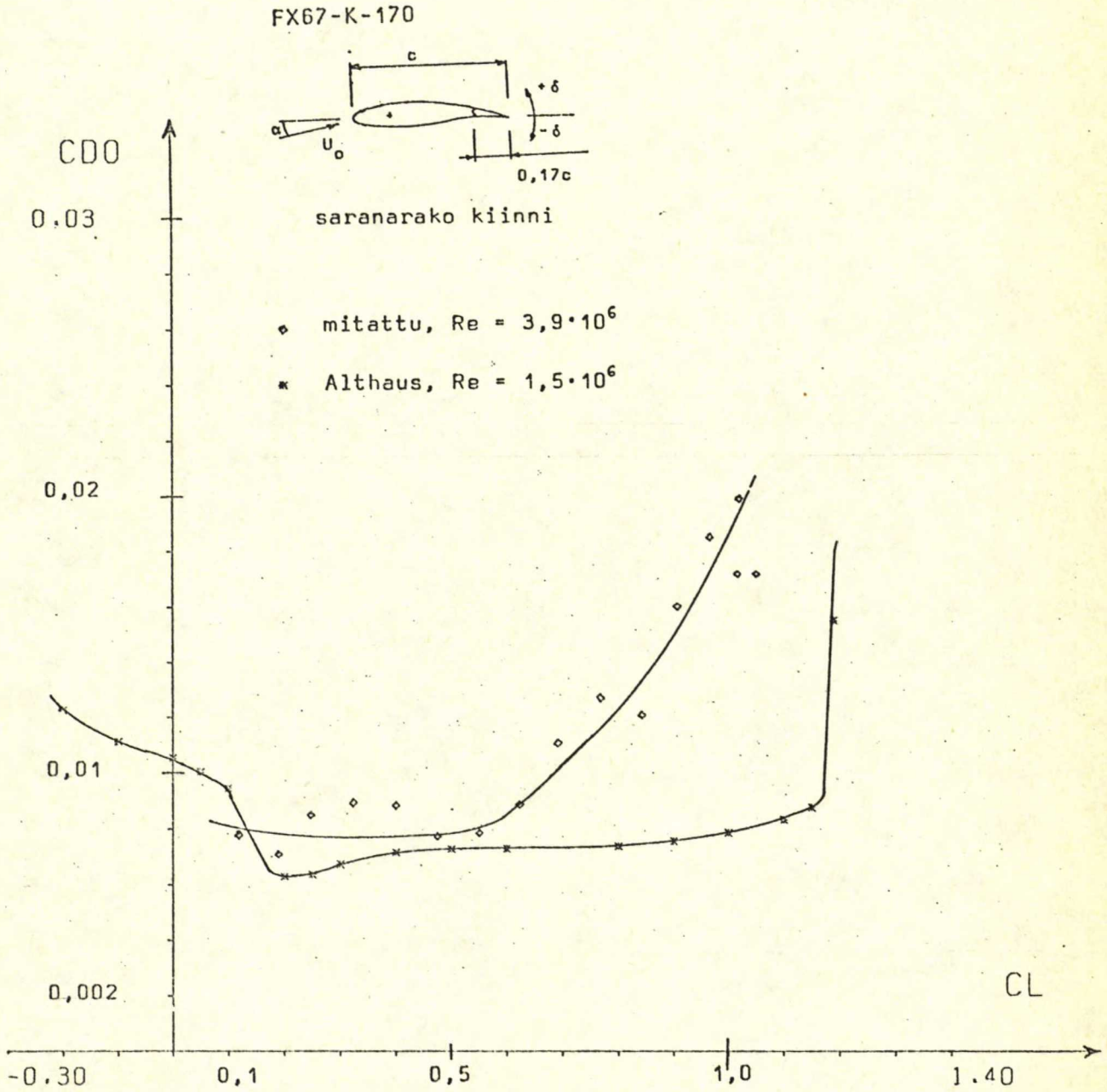
Mittaustulosten suuri hajonta johtuu siitä, että vastuspolaarista voitiin ajaa vain 2...5 pistettä kerrallaan. Tämän jälkeen tunneli täytyi pysäyttää ja haravan korkeussäätöä muuttaa, jolloin olosuhteet koko polaarin alueella eivät olleet samat. Hajonta noudatti selvästi näitä säätövälejä. Tästä johtuu, että kuviin 36 ja 37 on piirretty mittaustuloksia vastaavat "verhokäyrät".

Mitatuissa polaareissa ei vastuksen kasvu vastuskuopan jälkeen ole yhtä äkillinen kuin Althausilla ja vastuskuoppa on vertailuarvoja kapeampi. Tähän on osittain syynä se, että nostovoimakerroinpolaarin huippu oli loivempi kuin Althausilla ja maksimi-arvot jäivät pienemmiksi. Lankakokeet ja painejakautumamittaukset osoittivat kuitenkin, että muutoskohdan

FX67-K-170
sarjarakko kiinni



Kuva 36 Profiilivastuskerroin (c_{D0}) nostovoimakertoimen (c_L)
funktiona siivekekulmalla $\delta = 0^\circ$



Kuva 37 Profiilivastuskerroin (c_{D0}) nostovoimakertoimen (c_l)
funktiona siivekekulmalla $\delta = -8^\circ$

siirtyminen eteenpäin ja tästä johtuva vastuksen kasvu tapahtuu huomattavasti nopeammin kuin vastusmittaukset osoittavat. Syynä tähän on em. olosuhteiden jaksottainen muuttuminen. Haravan kalibroinnissa (kohta 6.3.) käytetyt keskiarvokertoimet aiheuttavat myös virhettä mittaustuloksiin (vrt. liite VIII) samoin kuin virtauksessa esiintyneet värähtelytkin.

6.7. Yhteenveto vastusmittauksista

Mittauksissa käytetty haravan säätömekanismi oli sangen alkeellinen. Jotta kohdassa 6.6. mainitut virheet olisi voinut välttää, olisi haravan korkeussäädön pitänyt olla jatkuva toiminen ja suunnan säädön tarkempi. Althausin käyttämässä laitteistossa haravan säätö vanan keskelle ja suuntaaminen virtauksen suuntaiseksi tapahtuu automaattisesti paine-eroantureiden ohjaamana. Vasta tällaisilla järjestelyillä voidaan päästä vastusmittauksissa vaadittavaan tarkkuuteen. Olosuhteisiin nähden ovat saavutetut tulokset kuitenkin sangen hyvät. Muotovastuskerroin(liite IV) on vielä lähes kerta luokkaa liian suuri, huolimatta äärellisen sivusuhteen aiheuttaman kohtauskulman korjauksen tuomasta parannuksesta. Asia vaatisi lisätutkimuksia.

TIIIVISTELMÄ

Tätä työtä aloitettaessa oli tarkoituksena saada PIK-20-purjekoneen suunnittelussa tarvittavaa tietoa käytetyn laskusiivekeprofiilin ominaisuuksista. Tutkimusten viivästymisen takia ei tähän päämäärään kuitenkaan päästy, vaan PIK-20:n ensimmäinen prototyyppi on tätä kirjoitettaessa jo kokoonpanovaiheessa. Viivästyminen johtui työn laajuudesta: työvoiman puutteen vuoksi tekijä joutui osallistumaan paljon aikaa vieviin mallin rakennus- ja asennustöihin. Pelkästään mittausten suoritus ja tulosten käsittely muodostaa jo laajan tehtävän. Viivästymistä lisäsi sekin, että tutkimukset tehtiin ansio-työn ohella, jolloin neuvottelut henkilökunnan kanssa vaikeutuivat.

Tulosten tarkkuus ei myöskään täyttänyt sille asetettuja vaatimuksia, koska päätylevyjen vaikutus oli odotettua heikompi. Tämän vuoksi jouduttiin käyttämään mallin äärellisestä sivusuhteesta aiheutuvaa korjauskerrointa, joka oli määritettävä vertailutulosten perusteella. Näin ollen ei päästy itsenäisiin mittaustuloksiin.

Tulokset antoivat kuitenkin varmuuden siitä, ettei käytetty laskusiivekekonstruktio aseta koneelle rakenteellisesti suurempia vaatimuksia kuin Althausin tulosten perusteella voidaan päätellä. Profiilin virtausominaisuudet eivät myöskään muuttuneet niin, että se vaikuttaisi koneen lento-ominaisuuksiin. Näistä seikoista varmistuminen olikin eräs työn päämääriä.

TKK:n tuulitunneliin ollaan parhaillaan asentamassa seinämien rajakerrosimulla varustettua 2-dimensionaalista mittatilaa, jossa on mahdollista suorittaa profiilimituksia sekä painemittausten että sähköistetyn vaa'an avulla. Mittatilan valmistuttua saadaan poistetuksi tätä työtä vaikeuttaneet mallin sivusuhteen vaikutus ja tulosten käsittelyn hitaus. Koska laskusiivekkeiden käyttöä purjelennossa on tutkittu sängen vähän, kannattaisi suorittaa lisätutkimuksia uusitussa mittatilassa. Näin saataisiin optimoiduksi siivekkeiden käyttö termiikkilennossa ja nopeassa matkalennossa. Vasta tällöin voitaisiin laskusiivekkeitä käyttää parhaalla mahdollisella tavalla.

Kaikki tässä työssä kertynyt materiaali säilytetään TKK:n Kevytrakennetekniikan laboratoriossa.

LÄHDELUETTELO

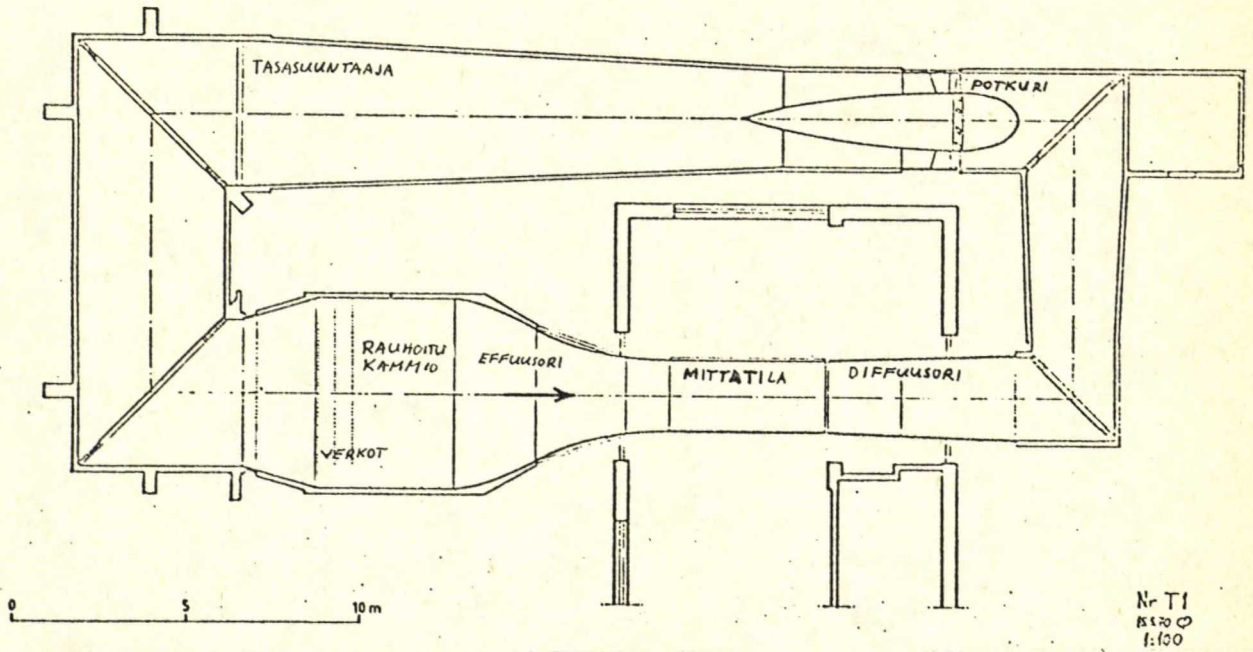
- /1./ Pankhurst R.C. & Holder D.W.: Wind Tunnel Technique.
Sir Isaac Pitman & Sons, Ltd, Lontoo 1952 (702s)
- /2./ Gorlin S. & Slezinger I.: Wind Tunnels and Their
Instrumentation.
Israel Program for Scientific Translations,
Jerusalem 1966 (592s)
- /3./ Pope A. & Harper J.: Low-Speed Wind Tunnel Testing.
John Wiley & Sons, Inc., New York 1966 (511s)
- /4./ Laine S.: Tutkimus tuulitunnelin seinämien ja
mallin välisestä interferenssistä kokoonpuristu-
mattomassa virtauksessa.
Diplomityö, Helsinki 1966 (115s)
- /5./ Lemmetyinen J.: Erään moottorilentokoneen pienois-
mallin tuulitunnelikokeet.
Diplomityö, Helsinki 1971 (77s)
- /6./ Wauhkonen K.: Alisoonsisen tuulitunnelin virtauksen
kalibrointi.
Diplomityö, Helsinki 1971 (99s)
- /7./ Schlichting/Truckenbrodt: Aerodynamik des Flug-
zeuges, Zweiter Band. 1. painos
Springer-Verlag, Berlin 1960 (485s)
- /8./ Ower E. and Pankhurst R.C.: The Measurement of
Air Flow.
Pergamon Press, Lontoo 1966 (367s)

- /9./ Gray W.E.: A Simple Visual Method of Recording Boundary Layer Transition (Liquid Film).
R.A.E. TN No Aero 1816, Lontoo 1946 (13s)
- /10./ Maltby R.L. and Keating R.F.: Flow Visualisation in Low-Speed Wind Tunnels: Current British Practise.
R.A.E. TN No Aero 2715, Lontoo 1960 (18s)
- /11./ The Cambridge University Aeronautics Laboratory: Measurement of Profile Drag by the Pitot-Traverse Method.
A.R.C. R&M No 1688, Lontoo 1936 (46s)
- /12./ Goett H.J.: Experimental Investigation of the Momentum Method for Determining Profile Drag.
NACA Report No 660, 1939 (7s)
- /13./ Silverstein A., Katzoff S. and Bullivant W.K.: Downwash and Wake behind Plain and Flapped Airfoils.
NACA Report No 651, 1939 (28s)
- /14./ Silverstein A. and Katzoff S.: Design Charts for Predicting Downwash Angles and Wake Characteristics.
NACA Report No 648, 1939 (25s)
- /15./ Goett H.J. and Bullivant W.K.: Tests of NACA 0009, 0012 and 0018 Airfoils in the Full-Scale Tunnel.
NACA Report No 647, 1939 (10s)
- /16./ Gracey W.: Wind Tunnel Investigation of a Number of Total-Pressure Tubes at High Angles of Attack.
NACA Report No 1303, 1957 (10s)
- /17./ Pinkerton R.M.: The Variation with Reynolds Number of Pressure Distribution over an Airfoil section.
NACA Report No 613, 1938 (10s)

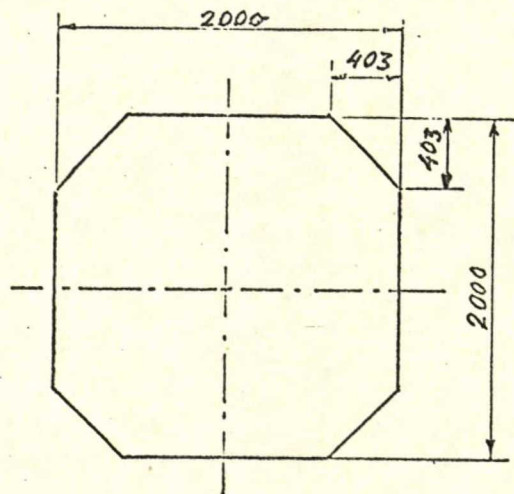
- /18./ Schubauer G.B. and Klebanoff P.S.: Contributions on the Mechanics of Boundary-Layer Transition.
NACA Report No 1289, 1955 (11s)
- /19./ von Doenhoff A.E. and Horton E.A.: A Low-Speed Experimental Investigation of the Effect of Sand-Paper Type of Roughness on Boundary-Layer Transition.
NACA Report No 1349, 1958 (16s)
- /20./ Cahill J.F.: Summary of Section Data on Trailing-Edge High-Lift Devices.
NACA Report No 938, 1940 (30s)
- /21./ Thomas F. und Laude J.: Vergleichsmessungen an Laminarflügeln mit starrer und flexibler Wölbungs-
klappe,
Aero-Revue 11/69, 1969 (4s)
- /22./ DeJager E.M. and van de Vooren A.I.: Tunnel Wall Corrections for a Wing-Flap System between Two Parallel Walls.
NLR-TRW.7, Amsterdam 1965 (19s)
- /23./ Laine S.: Rajakerrosteorian sovellutuksia.
TKK:n luentomoniste 1970 (45s)
- /24./ Althaus D.: Stuttgarter Profilkatalog I.
Institut für Aerodynamik und Gasdynamik der
Universität Stuttgart, Stuttgart 1972
- /25./ Alanen H.: Alisoonisen tuulitunnelin turbulenssi-
asteen määrittäminen kuimalanka-anemometrillä.
Diplomityö, Helsinki 1972 (57s)
- /26./ Wortmann F.X.: On the Optimization of Airfoils
with Flaps.
Soaring, May 1970 (5s)

- /27./ Allen H.J. and Vincenti W.G.: Wall Interference in a Two-Dimensional Flow Wind Tunnel , with Consideration of the Effect of Compressibility. NACA Report No 782, 1944 (30s)
- /28./ Abbott I.H. and von Doenhoff A.: Theory of Wing Sections.
Dover Publications Inc, New york, 1958 (693s)
- /29./ Slooff J.W.: Pressure Measurements on an Airfoil Designed for a "Rooftop" Type of Pressure distribution at a Critical Mach Number of 0,688.
NLR-TN T.157, Amsterdam 1968 (15s)
- /30./ Glauert H.: Wind Tunnel Interference on Wings, Bodies and Airscrews.
ARC R&M No 1566, Lontoo, 1933 (75s)
- /31./ Schlichting H.: Grenzschicht-Theorie.
Verlag G. Braun, Karlsruhe, 1964 (736s)

LIITE I



Kuva 1 Tuulitunneli ylhäältä kuvattuna



Kuva 2 Mittatilan poikkileikkaus

LIITE II

Taulukko 1 Painereikien X-koordinaatin (% alkuperäisestä jätteestä) ja multimanometrien putkien numeroiden vastaavuus

Yläpinnan arvot ovat suuremmasta ja alapinnan pienemmästä multimanometristä.

putken no	X yläp.	X alap.	putken no	X yläp.	X alap.
1	0,1	0	19	60	60
2	0,5	0,5	20	65	65
3	1	1	21	70	70
4	1,5	1,5	22	75	75
5	2	2	23	80	80
6	2,5	2,5	24	82	82
7	3	3	25	82 [⊕]	84
8	4	4	26	83 [⊕]	85
9	5	5	27	84	86
10	7	7	28	85	88
11	10	10	29	86	90
12	15	15	30	88	92
13	20	20	31	90	94
14	30	30	32	92	96
15	40	40	33	94	98
16	45	45	34	96	rp
17	50	50	35	98	rp
18	55	55	36	rp	rp

rp = referenssipaine

⊕ = siivekkeen kaarevalla jatkeella

Taulukko 2 Profiilin koordinaatit
(YU = yläpinta, YL = alapinta)

FX 67-K-170					
X	YU	YL	X	YU	YL
.99 983	.00 027	.00 005	.40 245	.13 526	-.03 480
.99 039	.00 243	.00 044	.37 059	.13 370	-.03 501
.97 347	.00 631	.00 105	.33 920	.13 119	-.03 499
.94 844	.01 201	.00 124	.30 866	.12 783	-.03 474
.91 573	.01 991	.00 037	.27 886	.12 365	-.03 425
.87 592	.03 040	-.00 197	.25 000	.11 870	-.03 354
.85 355	.03 689	-.00 386	.22 221	.11 305	-.03 261
.82 967	.04 437	-.00 625	.19 562	.10 677	-.03 145
.80 438	.05 287	-.00 913	.17 033	.09 994	-.03 011
.77 779	.06 229	-.01 236	.14 645	.09 263	-.02 856
.75 000	.07 233	-.01 572	.12 408	.08 490	-.02 682
.72 114	.08 259	-.01 896	.10 332	.07 685	-.02 490
.69 134	.09 263	-.02 187	.08 427	.06 856	-.02 282
.66 072	.10 208	-.02 437	.06 699	.06 011	-.02 062
.62 941	.11 063	-.02 654	.05 156	.05 158	-.01 827
.59 755	.11 808	-.02 844	.03 806	.04 309	-.01 580
.56 520	.12 429	-.03 012	.02 656	.03 487	-.01 321
.53 270	.12 919	-.03 155	.01 704	.02 722	-.01 057
.50 000	.13 274	-.03 272	.00 961	.01 912	-.00 815
.46 730	.13 490	-.03 365	.00 428	.01 292	-.00 514
.43 474	.13 571	-.03 435	.00 107	.00 653	-.00 217

Pääohjelman listaus

```

0001 FTN4
0002 PROGRAM FINAL
0003 INTEGR P,PP(1),HFP(1,20),HVP(1,20),LIUK
0004 RFAL XY(30),XA(35),YY(30),YA(35),HY(30),BETA(1),MPY(1,20,30),
0005 *MPA(1,20,35),KINPA(1,20),PAERO(1,20),REFPAY(1,20),REFPAA(1,20),
0006 *ALFA(1,20),HREFPA(1,20),MKINPA(1,20),
0007 *HPAERO(1,20),MPH (1,20,30),CM,CN,CC,CH,CDM,CD0,
0008 *CNY,CNA,CCY,CCA,CNL,CCL,CMLY,CNLA,CCLY,CCLA,CHCN,CHCC,
0009 *APU1,APU2,APU3,APU4,APU5,APU6,VALI1,VALI2,XV,YV,RE
0010 C
0011 C
0012 C KOORDINAATTIEN SISAANLUKU
0013 C
0014 READ(5,*) (PP(L),BETA(L), L=1,1)
0015 HEAD(5,*) LUK,VALI1,VALI2
0016 READ(5,*) (XY(N), N=1,LIUK)
0017 READ(5,*) (XA(N), N=1,35)
0018 READ(5,*) (YY(N), N=1,LIUK)
0019 READ(5,*) (YA(N), N=1,35)
0020 READ(5,*) (HY(N), N=1,30)
0021 DO 20 N=1,LIUK
0022 XY(N)=XY(N)/.99
0023 YY(N)=YY(N)/.99
0024 20 CONTINUE
0025 DO 30 N=1,35
0026 XA(N)=XA(N)/.99
0027 YA(N)=YA(N)/.99
0028 30 CONTINUE
0029 C
0030 C
0031 C MITTAUSARVOJEN SISAANLUKU
0032 C
0033 L=1
0034 READ(5,*) ((MPY(L,N,K), K=2,(LUK=3)),N=1,PP(L))
0035 READ(5,*) (REFPAY(L,N),KINPA(L,N),PAERO(L,N),ALFA(L,N),N=1,PP(L))
0036 READ(5,*) ((MPA(L,N,K),K=1,33),N=1,PP(L))
0037 DO 53 N=1,PP(L)
0038 DO 52 K=(LUK-1),28,-1
0039 MPY(L,N,K)=MPY(L,N,K=2)
0040 52 CONTINUE
0041 DO 53 K=34,26,-1
0042 MPA(L,N,K)=MPA(L,N,K=1)
0043 53 CONTINUE
0044 READ(5,*) (REFPAA(L,N),N=1,PP(L))
0045 READ(5,*) (HEP(L,N),HVP(L,N),HREFPA(L,N),MKINPA(L,N),HPAERO(L,N),
0046 *N=1,PP(L))
0047 READ(5,*) ((MPH(L,N,K), K=HEP(L,N)=1,HVP(L,N)=1), N=1,PP(L))
0048 RE=(KINPA(L,1)+KINPA(L,PP(L)))/2.0
0049 RE=0.08745*SQRT(2.0*9.81*RE/1.225)/1.37
0050 RE=1.1295*1.0127*RE
0051 WRITE(6,500) BETA(L), RE
0052 500 FORMAT(9X,"BETA=",F6.2,20X,"RE=",F4.2,"*10**6")
0053 WRITE(6,700)
0054 700 FORMAT(/,9X,"ALFA",9X,"CL",8X,"CDM",9X,"CD0",
0055 *9X,"CM",25X,7X,"CH",/)
0056 C
0057 C
0058 C REFEROINTI HITTATILAN KESKIPISTEeseen JA
0059 C KULMIEN MUUNTO RADIAANEIKSI
0060 C
0061 BETA(L)=0.01745329*BETA(L)

0062 DO 1000 N=1,PP(L)
0063 ALFA(L,N) =.01745329*ALFA(L,N)
0064 KINPA(L,N) =1.017*KINPA(L,N)
0065 PAERO(L,N)=PAERO(L,N)+.022*KINPA(L,N)
0066 HPAERO(L,N)=1.0212*HPAERO(L,N)
0067 MKINPA(L,N)=1.0196*MKINPA(L,N)
0068 C
0069 C
0070 C MANDMETRILUKEMIEN KORJAAMINEN
0071 C
0072 MPY(L,N,26)=MPY(L,N,28)+(MPY(L,N,25)+MPY(L,N,28))*
0073 *VALI1/(VALI1+.010863)
0074 MPY(L,N,27)=MPY(L,N,28)+(MPY(L,N,25)+MPY(L,N,28))*
0075 *VALI2/(VALI1+.010863)
0076 MPA(L,N,25)=(MPA(L,N,24)+MPA(L,N,26))/2.0
0077 DO 70 K=2,LIUK-1
0078 MPY(L,N,K)=REFPAY(L,N)-MPY(L,N,K)
0079 MPY(L,N,K)=(7.914*MPY(L,N,K)+PAERO(L,N))/KINPA(L,N)
0080 70 CONTINUE
0081 DO 80 K=1,34
0082 MPA(L,N,K)=REFPAA(L,N)-MPA(L,N,K)
0083 MPA(L,N,K)=(8.032*MPA(L,N,K)+PAERO(L,N))/KINPA(L,N)
0084 80 CONTINUE
0085 MPY(L,N,1)=MPA(L,N,1)
0086 MPY(L,N,LIUK)=(MPY(L,N,LIUK=1)+MPA(L,N,34))/2.0
0087 MPA(L,N,35)=MPY(L,N,LIUK)
0088 C
0089 C
0090 C AFRODYNAAMISET KERTOIMET
0091 C

```

```

0009 C
0090 C AERODYNAAMISET KERTOIMET
0091 C
0092 C CM=0,0
0093 C CN=0,0
0094 C CC=0,0
0095 C CH=0,0
0096 C CNI=0,0
0097 C CNL=0,0
0098 C CCL=0,0
0099 C CHCN=0,0
0100 C CHCC=0,0
0101 C
0102 C
0103 C KIINTEAN PROFIIILIN OSIUS
0104 C
0105 C
0106 C YLAPINTA
0107 C
0108 C DO 100 K=1,25
0109 C
0110 C NORMAALIVOIMAKERROIN (CN)
0111 C
0112 C CNY=(MPY(L,N,K+1)+MPY(L,N,K))/2,0*(XY(K+1)-XY(K))
0113 C CN=CN-CNY
0114 C
0115 C NORMAALIVOIMAKERROIN (CC)
0116 C
0117 C CCY=(MPY(L,N,K+1)+MPY(L,N,K))/2,0*(YY(K+1)-YY(K))
0118 C CC=CC-CCY
0119 C
0120 C MOMENTTIKERROIN (CM0,25)
0121 C
0122 C CM=CM-CNY*(0,25*(XY(K+1)+XY(K))/2,0)

0123 C **CCY*(YY(K+1)+YY(K))/2,0
0124 100 CONTINUE
0125 C CC=CC-0,05*(MPY(L,N,26)+MPY(L,N,27))/2,0
0126 C CH=CH-0,00962*(MPY(L,N,26)+MPY(L,N,27))/2,0
0127 C
0128 C
0129 C
0130 C ALAPINTA
0131 C DO 120 K=1,24
0132 C
0133 C NORMAALIVOIMAKERROIN (CN)
0134 C
0135 C CNA=(MPA(L,N,K+1)+MPA(L,N,K))/2,0*(XA(K+1)-XA(K))
0136 C CN=CN+CNA
0137 C
0138 C NORMAALIVOIMAKERROIN (CC)
0139 C
0140 C CCA=(MPA(L,N,K+1)+MPA(L,N,K))/2,0*(YA(K+1)-YA(K))
0141 C CC=CC-CCA
0142 C
0143 C MOMENTTIKERROIN (CM0,25)
0144 C
0145 C CM=CM+CNA*(0,25*(XA(K+1)+XA(K))/2,0)
0146 C **CCA*(YA(K+1)+YA(K))/2,0
0147 120 CONTINUE
0148 C
0149 C
0150 C LAIPAN OSUUS
0151 C
0152 C
0153 C YLAPINTA
0154 C
0155 C DO 130 K=27,(LUK-1)
0156 C
0157 C NORMAALIVOIMAKERROIN (CNL)
0158 C
0159 C CNLY=(MPY(L,N,K+1)+MPY(L,N,K))/2,0*(XY(K+1)-XY(K))
0160 C CNL=CNL-CNLY
0161 C
0162 C NORMAALIVOIMAKERROIN (CCL)
0163 C
0164 C CCLY=(MPY(L,N,K+1)+MPY(L,N,K))/2,0*(YY(K+1)-YY(K))
0165 C CCL=CCL+CCLY
0166 C
0167 C SARANAMOMENTTIKERROIN (CH)
0168 C
0169 C CHCN=CHCN-CNLY*(0,030304*(XY(K+1)+XY(K))/2,0)
0170 C CHCC=CHCC+CCLY*((YY(K+1)+YY(K))/2,0+0,004)
0171 130 CONTINUE
0172 C
0173 C
0174 C ALAPINTA
0175 C
0176 C
0177 C NORMAALIVOIMAKERROIN (CNL)
0178 C

```

```

0172 C
0173 C
0174 C      ALAPINTA
0175 C
0176 C
0177 C      NORMAALIVOIMAKERROIN (CNL)
0178 C
0179      DO 140 K=25,34
0180      CNLA=(MPA(L,N,K+1)+MPA(L,N,K))/2.0*(YA(K+1)-YA(K))
0181      CNL=CNL+CNLA
0182 C
0183 C      NORMAALIVOIMAKERROIN (CCL)

0184 C
0185      CCLA=(MPA(L,N,K+1)+MPA(L,N,K))/2.0*(YA(K+1)-YA(K))
0186      CCL=CCL+CCLA
0187 C
0188 C
0189 C      SARANAMOMENTTIKERROIN (CH)
0190 C
0191      CHCN=CHCN+CNLA*(0.838384-(XA(K+1)+XA(K))/2.0)
0192      CHCC=CHCC+CCLA*((YA(K+1)+YY(K))/2.0+0.004)
0193 140 CONTINUE
0194      CCL=CCL+.051*(MPY(L,N,26)+MPY(L,N,27))/2.0
0195      CHCC=CHCC+.00844*(MPY(L,N,26)+MPY(L,N,27))/2.0
0196 C
0197 C
0198 C      YHOISTAHINEN KIINTEAAN PROFIIILIIN
0199 C
0200      APU3=CNL*COS(BETA(L))-CCL*SIN(BETA(L))
0201      APU4=CNL*SIN(BETA(L))+CCL*COS(BETA(L))
0202      CN=CN+APU3
0203      CC=CC+APU4
0204 C
0205 C      LAIPAN RESULTANTTIVOIMIEN VAIKUTUSPISTE (XV,YV)
0206      XV=ABS(CHCN/CNL)
0207      YV=ABS(CHCC/CCL)
0208      APU5=SQRT(XV*YV+YV*YV)
0209      APU6=ABS(ATAN(YV/XV))
0210      APU6=APU6+BETA(L)
0211      XV=APU5*COS(APU6)+.588384
0212      YV=APU5*SIN(APU6)+.004
0213      CM=CM+APU3*XV+APU4*YV
0214      CH=38.2928*(CHCN+CHCC)
0215 C
0216 C
0217 C      LANKOJEN VENYMAN KORJAUS
0218 C
0219      A=SIN(ALFA(L,N))+0.00010318*CM*KINPA(L,N)*COS(ALFA(L,N))
0220      B=SQRT(1.0-A*A)
0221      ALFA(L,N)=ATAN(A/B)
0222 C
0223      ALF=ALFA(L,N)
0224      DO 145 K=1,5
0225 C      NOSTOVOIMAKERROIN CL
0226      CL=CN*CCS(ALFA(L,N))-CC*SIN(ALFA(L,N))
0227      ALFA(L,N)=ALF-CL/11.3
0228 C
0229 C      MUOTOVASTUSKERROIN CDM
0230      CDM=CN*SIN(ALFA(L,N))+CC*COS(ALFA(L,N))-0.00062
0231 145 CONTINUE
0232 C
0233 C
0234 C      PROFIIILIVASTUSKERROIN (CD0)
0235 C
0236      DO 150 K=(HEP(L,N)-1), (HVP(L,N)-2)
0237      APU1=SQRT((HREFPA(L,N)-MPH(L,N,K+1))*8.36395/HKINPA(L,N))*
0238      *(1-SQRT(((HREFPA(L,N)-MPH(L,N,K+1))*8.36395
0239      *-HFAERO(L,N))/HKINPA(L,N)))
0240      APU2=SQRT((HREFPA(L,N)-MPH(L,N,K))*8.36395/HKINPA(L,N))*
0241      *(1-SQRT(((HREFPA(L,N)-MPH(L,N,K))*8.36395
0242      *-HFAERO(L,N))/HKINPA(L,N)))
0243      CD0=CD0+(APU1+APU2)*(HY(K+1)-HY(K))
0244 150 CONTINUE
0245 C
0246 C
0247 C      TUULITUNNELINORJAUKSET
0248 C
0249      ALFA(L,N)=(ALFA(L,N)+0.0062548*(CL+4.0*CM))/0.01745329
0250      CM=CM*(0.9746-0.21862*CD0)+0.009825*CL
0251      CL=CL*(0.9353-0.21862*CD0)
0252      CDM=CDM*(0.9619-0.21862*CD0)
0253      CD0=CD0*(0.9619-0.21862*CD0)
0254 C
0255 C
0256 C      TUULOSTUS
0257 C
0258      WRITE(6,750) ALFA(L,N),CL,CDM,CD0,CM,CH
0259      WRITE(4,754) ALFA(L,N),CL,CDM,CD0,CM,CH
0260 750 FORMAT(9X,F5.2,7X,F5.3,5X,F7.5,6X,F7.5,4X,F7.5)
0261 1500 CONTINUE
0262      ENDFILE 10B
0263      END
0264      ENDS

```

Pääohjelman ajojen listaukset

20-6-1973

RETA= 0,00

RE=3,93*10**6

ALFA	CL	CDM	CDR	CM,25	CH
.33	.119	.01287	.00778	-.02702	.10719
.97	.190	.01152	.00708	-.02556	.10500
1,60	.246	.01116	.00848	-.02291	.10563
2,20	.324	.01082	.00893	-.02478	.09777
2,91	.400	.00931	.00881	-.02497	.09217
3,50	.476	.00775	.00772	-.02602	.08378
4,13	.551	.00608	.00784	-.02812	.07556
4,76	.623	.00691	.00884	-.02845	.06996
5,41	.692	.00684	.01104	-.02948	.06035
6,01	.768	.00515	.01271	-.03042	.05110
6,63	.843	.00487	.01208	-.03428	.02114
7,29	.907	.00481	.01600	-.03662	.00573
7,97	.967	.00612	.01851	-.04123	-.05985
8,67	1,022	.00069	.01991	-.04953	-.14759
8,00	1,021	.00929	.01991	-.04879	-.14716
9,72	1,017	.01340	.01718	-.04052	-.16922
9,53	1,051	.01362	.01718	-.04877	-.19525

RETA= .00

RE=1,71*10**6

ALFA	CL	CDM	CDR	CM,25	CH
-4,20	.196	.00873	.00894	-.12248	-.10288
-3,00	.176	.01563	.00908	-.09915	-.04170
-2,55	.271	.01257	.00836	-.10496	-.04706
-1,86	.331	.01312	.01181	-.10580	-.05235
-1,17	.394	.00062	.01081	-.10114	-.04718
-.51	.463	.01045	.00575	-.10115	-.04877
.16	.528	.00819	.00758	-.09974	-.05163
.75	.608	.00544	.00832	-.10221	-.06336
1,35	.687	.00344	.00734	-.10321	-.06699
1,97	.760	.00238	.00606	-.10459	-.07502
2,71	.814	.00141	.00805	-.09962	-.07542
3,00	.933	-.00374	.00796	-.11140	-.09694
3,73	1,003	-.00689	.00892	-.11031	-.09829
4,37	1,073	-.00743	.01072	-.11154	-.10168
5,11	1,126	-.00676	.01179	-.11050	-.10963
5,80	1,172	-.00408	.01260	-.10810	-.11035
6,61	1,224	-.00370	.01592	-.10006	-.11168
7,43	1,259	-.00006	.02262	-.10374	-.14089
8,36	1,270	.00675	.02617	-.10532	-.28067

20-6-1973

RETA= .00

RE=3,37*10**6

ALFA	CL	CDM	CDR	CM,25	CH
-2,30	.226	.01731	.00736	-.10205	-.05153
-1,80	.323	.01193	.00592	-.10977	-.06513
-1,10	.385	.01245	.00604	-.10431	-.06434
-.50	.463	.01066	.00698	-.10473	-.06856
.00	.533	.00940	.00424	-.10486	-.07202
.66	.610	.00763	.00510	-.10655	-.07917
1,30	.681	.00581	.00518	-.10612	-.07985
1,95	.751	.00484	.00532	-.10687	-.08641
2,00	.932	-.00265	.00627	-.11767	-.09182
3,00	.023	-.00227	.00676	-.10466	-.09824
3,00	1,001	-.00412	.00729	-.10701	-.10609
4,27	1,000	-.00708	.00743	-.10909	-.11553
4,80	1,156	-.00940	.00734	-.11159	-.12909
5,50	1,215	-.00803	.01129	-.11214	-.14293
6,40	1,239	-.00168	.01103	-.11122	-.20251
7,30	1,265	.00678	.01481	-.11137	-.26262
7,90	1,328	.01964	.01226	-.11612	-.31957
7,90	1,328	.02236	.01226	-.11848	-.34999

20-8-1973

RETA= 74,4P

RE=1,69*1P**6

ALFA	CL	CDM	CDØ	CM,25	CH
-13,4	.552	.14151	.13151	-.29833	-.74462
-12,6	.776	.13488	.12783	-.33149	-.91321
-11,4	.924	.12405	.12381	-.33906	-.99270
-10,5	1,126	.11515	.12116	-.36239	-.96473
-10,1	1,254	.11989	.04454	-.38256	-1,0260
-9,30	1,292	.11009	.12490	-.37560	-1,0123
-8,76	1,362	.11086	.12416	-.37579	-1,0252
-8,02	1,413	.10887	.12423	-.37282	-1,0210
-7,36	1,477	.09378	.12711	-.37127	-.98741
-6,70	1,560	.09867	.12493	-.37744	-1,0345
-6,15	1,627	.09744	.12621	-.37550	-1,0501
-5,23	1,700	.09322	.00000	-.37844	-.99054
-4,66	1,784	.09158	.00000	-.38216	-1,0155
-4,05	1,860	.08547	.00000	-.38385	-1,0257
-3,20	1,908	.07910	.00000	-.38490	-.99455
-2,63	1,976	.07298	.00000	-.38030	-.98874
-1,63	2,018	.07077	.00000	-.37389	-.98346
-1,25	2,099	.07125	.00000	-.37872	-1,0053
-.21	2,099	.06628	.00000	-.35988	-.94159

20-8-1973

RETA= 90,2P

RE=1,69*1P**6

ALFA	CL	CDM	CDØ	CM,25	CH
-13,2	.548	.19750	.00000	-.26789	-.82700
-12,5	.782	.18114	.00000	-.29601	-.95301
-11,3	.946	.18401	.00000	-.30933	-1,0241
-10,4	1,148	.17497	.00000	-.32939	-1,0733
-9,47	1,172	.17438	.00000	-.32525	-1,0434
-8,96	1,265	.18634	.00000	-.33224	-1,0277
-8,20	1,316	.15794	.00000	-.32871	-1,0347
-7,81	1,433	.16678	.00000	-.34070	-1,1153
-7,03	1,477	.16360	.00000	-.33586	-1,0995
-6,36	1,543	.15682	.00000	-.33366	-1,0960
-5,82	1,631	.16976	.00000	-.33881	-1,1703
-5,19	1,702	.19863	.00000	-.34837	-1,2864
-4,31	1,732	.14430	.00000	-.33335	-1,1211
-3,86	1,837	.16599	.00000	-.34354	-1,2091
-2,87	1,844	.12839	.00000	-.32869	-1,0609
-2,47	1,958	.14863	.00000	-.34247	-1,1924
-1,70	2,005	.13837	.00000	-.33733	-1,1499
-.95	2,055	.13010	.00000	-.33333	-1,1368

BETA = siivekekulma (Huom. tekstissä Ø!)

RE = Reynoldsin luku

ALFA = kohtauskulma

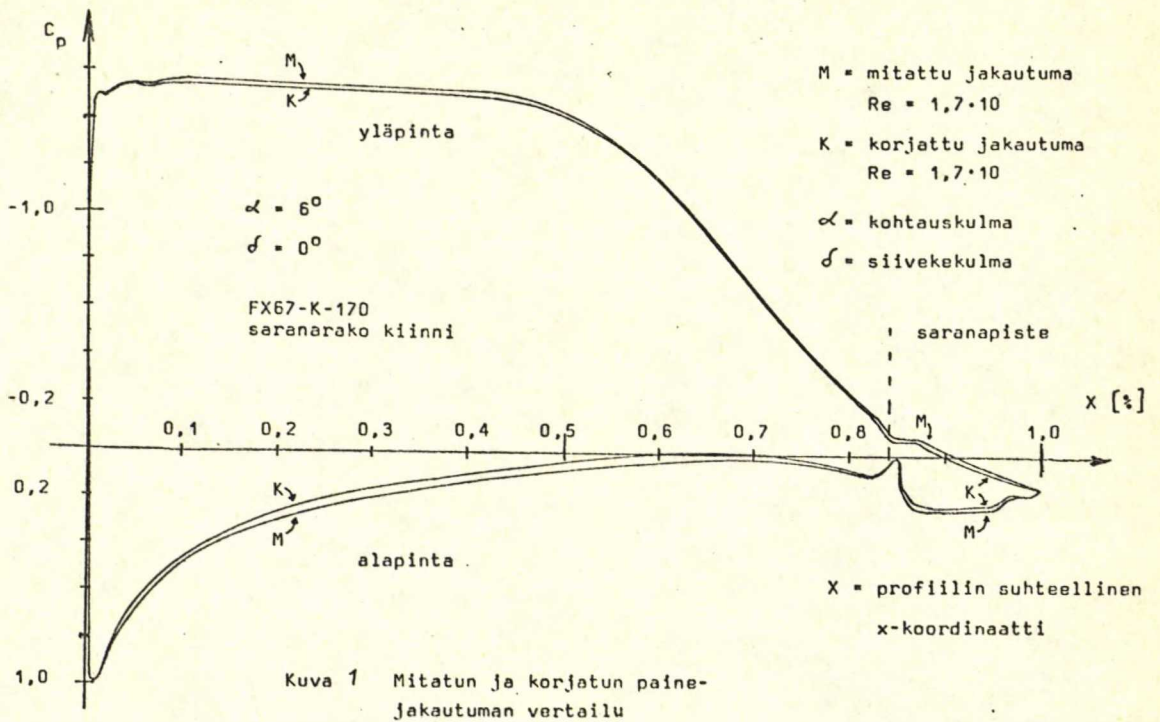
CL = profiilin nostovoimakerroin

CDM = profiilin muotovastuskerroin

CDØ = profiilivastuskerroin

CM,25 = profiilin pituusmomenttikerroin (neljännesjännteen suhteen)

CH = profiilin saranamomenttikerroin



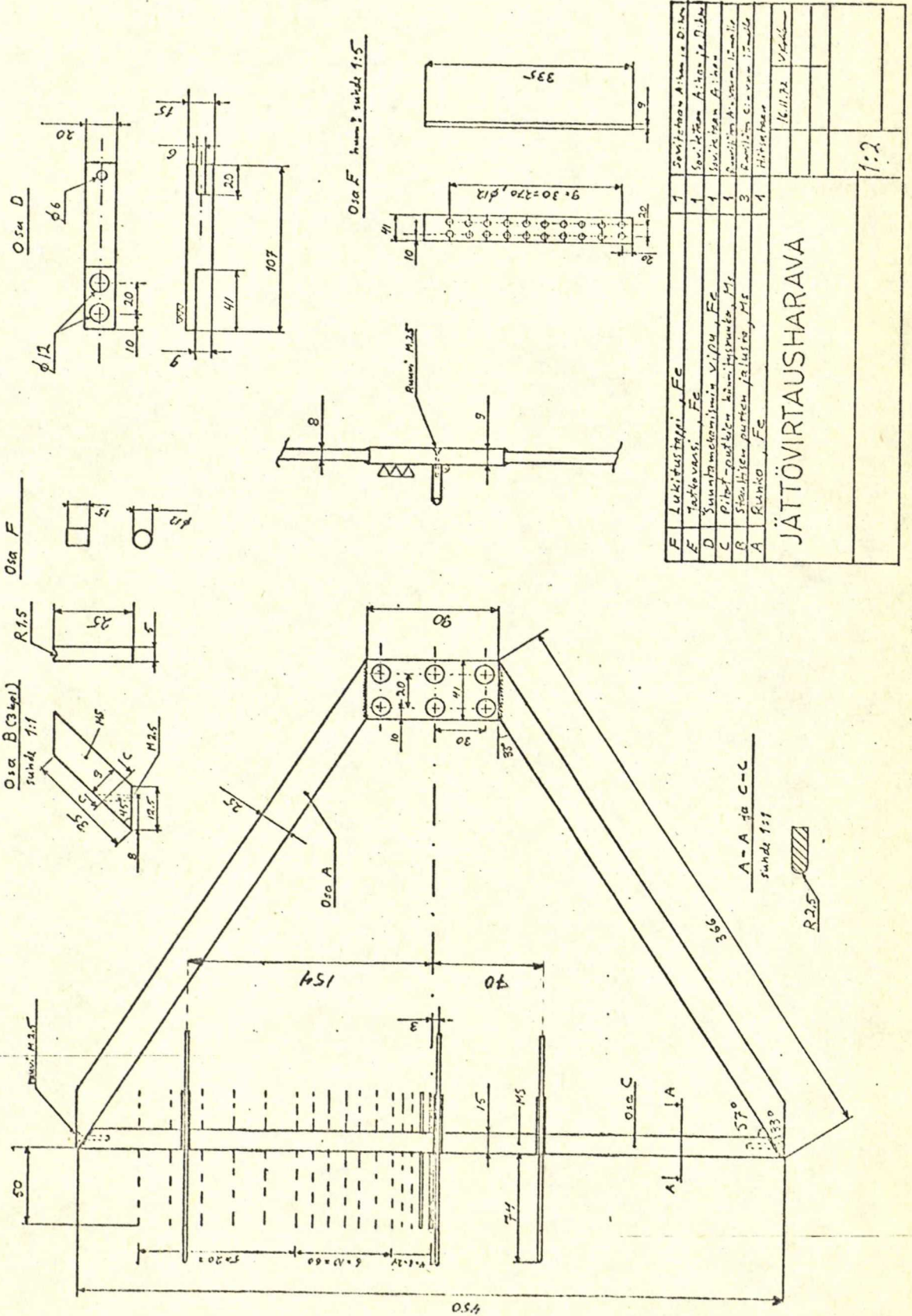
Lisäselvitys, joka koskee sivulla 8 esitettyä pinnan karheuden vaikutusta muutoskohtaan.

Esitetty kriittinen Reynoldsin luku ($Re_{kriit} = 680$) liittyy hiekkapaperimaisen jyväskarheuden jyvästen maksimikokoon. Käytettäessä jyväskarheuden nimelliskokoa on $Re_{kriit} = 415$, jolloin $d_{kriit} = 0,1$ mm.

Schlichting (lähde /31./s. 505) antaa jyväkoko perustuvaksi kriittiseksi arvoksi $Re_{kriit} = 120$, josta kriittiseksi jyväkooksi saadaan $d_{kriit} = 0,03$ mm.

Mallin pinnan sileys täytti myös molemmat em. jyväkoon asettamat vaatimukset.

Jättövirtausharavan rakenne

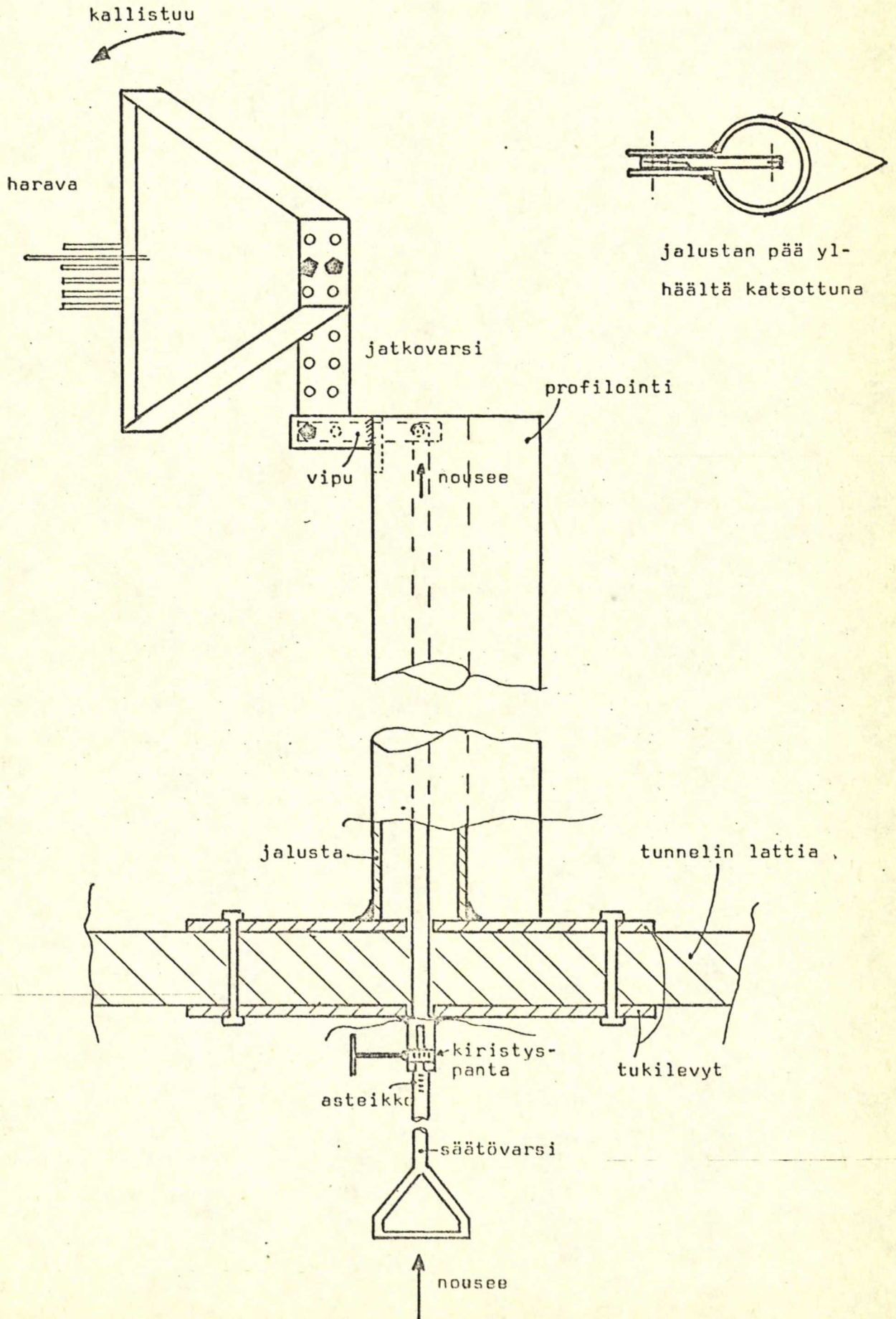


F	Lukitusliike, Fe	1	Seurakone A:n osat
E	Tapakan, Fe	1	Seurakone A:n osat
D	Seurakone A:n osat	1	Seurakone A:n osat
C	Pöytä-pöytä-käytösruutu, M3	1	Seurakone A:n osat
B	Sisäisen pinnan jalkus, M3	3	Seurakone A:n osat
A	Runko, Fe	1	Seurakone A:n osat
			16.11.73

JÄTTÖVIRTAUSHARAVA

1:2

Jättövirtaharavan suunnan ja korkeuden säätömekanismin periaate



HARKAL-ohjelman listaus

RUN
HARKAL

```

10 REM V KOKKONEN, DIPLOMITYO
20 REM 05.04.1973
30 REM OHJELMA SUORITTAAN JÄLITÖVINTAUSHARAVAN KALIBROINNIN KINEETTI-
40 REM SEN JA STAATTISEN PAINEN SUHTEEN
50 REM VERTAILUPAINEENA (SAILIOPAINEENA) KALIBROINNISSA OLI
55 REM HARAVAN STAATTINEN PAINE.
60 REM LUKEMIA MULTIMANOMETRISTA OVAT: A JA H (SAILION NESTEKORKEUS),
70 REM EKKA B (VAASTAAN HARAVAN KORONAISE- JA STAATTISEN PAINEN SUHTEESTA),
80 REM G ON ELÄLLISISTÄ LASKETTU KINEETTINEN PAINE. BETZ-MANOMETRIEN
85 REM LUKEMIA OVAT J (KINEETTINEN PAINEN) JA K (=PO-PW). L ON HARAVAN
90 REM KOHTAUSKULMA. X JA Y OVAT LASKETTAVAT KORJAUSKERROKSET.
91 PRINT ""
99 FILES V1,V2,V3,V4,V5,V6
100 DIM G(42),X(42),Y(42)
110 DIM A(42),B(42),H(42),J(42),K(42),L(42)
120 MAT READ A,B,H,J,K,L
125 MAT K=(-1)*K
130 PRINT "*****"
140 PRINT "HARAVAN KALIBROINTI, (H-P):N KORJAUSKERROIN"
150 PRINT "*****"
160 PRINT "HARAVAN KESKIKOHTA 300MM TUNNELIN KESKIVIIIVAN YLAPUOLELLA"
170 PRINT ""
180 PRINT TAB(7);"Q/MMH20";TAB(15);"14";TAB(30);"63";TAB(47);"134"
190 PRINT "BETA/ASTE"
200 FOR N=1 TO 42
210 Y(N)=.0257*J(N)/K(N)
220 Q(N)=(A(N)+H(N))/2-B(N)
230 J(N)=1.288*J(N)
240 X(N)=J(N)/Q(N)
250 NEXT N
260 FOR N=1 TO 7
270 PRINT L(N);TAB(14);X(N);TAB(29);X(15-N);TAB(46);X(N+14)
280 NEXT N
290 PRINT ""
300 PRINT "*****"
310 PRINT "HARAVAN KALIBROINTI, (H-P):N KORJAUSKERROIN"
320 PRINT "*****"
330 PRINT "HARAVAN KESKIKOHTA 30MM TUNNELIN KESKIVIIIVAN YLAPUOLELLA"
340 PRINT ""
350 PRINT TAB(7);"Q/MMH20";TAB(15);"14";TAB(30);"63";TAB(47);"134"
360 PRINT "BETA/ASTE"
370 FOR N=1 TO 7
380 PRINT L(N+21);TAB(14);X(N+21);TAB(29);X(16-N);TAB(46);X(N+35)
390 NEXT N
400 PRINT ""
410 PRINT "*****"
420 PRINT "HARAVAN KALIBROINTI, (PO-PW):N KORJAUSKERROIN"
430 PRINT "*****"
440 PRINT "HARAVAN KESKIKOHTA 300MM TUNNELIN KESKIVIIIVAN YLAPUOLELLA"
450 PRINT ""
460 PRINT TAB(7);"Q/MMH20";TAB(15);"14";TAB(30);"63";TAB(47);"134"
470 PRINT "BETA/ASTE"
480 FOR N=1 TO 7
490 PRINT L(N);TAB(14);Y(N);TAB(29);Y(15-N);TAB(46);Y(N+14)
500 NEXT N
510 PRINT "*****"
520 PRINT "HARAVAN KALIBROINTI, (PO-PW):N KORJAUSKERROIN"
530 PRINT "*****"
540 PRINT "HARAVAN KESKIKOHTA 30 MM TUNNELIN KESKIVIIIVAN YLAPUOLELLA"
550 PRINT ""
560 PRINT TAB(7);"Q/MMH20";TAB(15);"14";TAB(30);"63";TAB(47);"134"
570 PRINT "BETA/ASTE"
580 FOR N=1 TO 7
590 PRINT L(N+21);TAB(14);Y(N+21);TAB(29);Y(16-N);TAB(46);Y(N+35)
600 NEXT N
610 LATA 485.5,485.5,485.5,485.5,486,486,486,514,514,514,514,514,514
620 LATA 514,574.5,574.5,574.5,574.5,574.5,574.5,574.5,575,568.5,495,494.5
630 LATA 494.5,494.5,494.5,494.5,497.5,497.5,497.5,497.5,497.5,502,501.5,501
640 LATA 501,501,501,501
650 LATA 468,468,468,468,468,468,468,430,436,436,437,436.5,436.5,435
660 LATA 408,410.5,411,412,411,410,405.5,551,477.5,477.5,477.5,477.5
670 LATA 477,0,420,420.5,421,421,420.5,420,417.5,331,336,337,337.5,338
680 LATA 337.5,334.5
690 LATA 485.5,485.5,485.5,485.5,485.5,485.5,485.5,514,514,514,514
700 LATA 514,514,514,574.5,574.5,574.5,574.5,574.5,574.5,575,568.5
710 LATA 494.5,494.5,494.5,494.5,494.5,494.5,497.5,497.5,497.5,497.5,497.5
720 LATA 502,501,501,501,501,501,501,501
730 LATA 14.25,14.2,14.2,14.2,14.2,14.2,14.2,63.55,63.55,63.4,63.4
740 LATA 63.45,63.4,63.5,133.9,133.8,133.6,133.7,133.5,133.7,133.7
750 LATA 14.2,14.2,14.15,14.1,14.15,14.15,1,63.15,63.63,63.1,63.63.1,63.1
760 LATA 134.6,134.3,134.5,134.7,134.4,134.6,134.7
770 LATA .1,-.1,-.2,-.25,-.2,-.2,.15,.55,-1.1,-1.5,-1.7,-1.7,-1.5
780 LATA -.2,-.6,-2.8,-3.4,-3.8,-3.5,-2.4,1.4,.05,-.35,-.4,-.4,-.4
790 LATA -.4,0,-.95,-1.9,-2.1,-2.2,-2,-1.5,2.1,-2.9,-3.8,-4.5,-4.5
800 LATA -3.9,-1.7
810 LATA -11.47,-6.67,-4.47,-.83,1.57,3.62,8.83,8.83,3.62,1.57,-.83
820 LATA -4.47,-6.67,-11.47,-11.47,-6.67,-4.47,-.83,1.57,3.62,8.83
830 LATA 9.08,3.87,1.82,-.58,-4.22,-6.42,-11,-11.22,-6.42,-4.22,-.58
840 LATA 1.82,3.87,9.08,9.08,3.87,1.82,-.58,-4.22,-6.42,-11.22
850 END

```

HARKAL-ohjelman tulostus

 HARAVAN KALIBROINTI, (H-P):N KORJAUSKERROIN K

HARAVAN KESKIKOHTA 300MM TUNNELIN KESKIVIIIVAN YLAPUOLELLA

BETA/ASTE	Q/MMH2O 14	63	134
DIVIDE BY ZERO - WARNING ONLY IN LINE 210			
-11.47	1.0488	1.03529	1.03581
-6.67	1.04512	1.05367	1.05082
-4.47	1.04512	1.0545	1.05246
-0.83	1.04512	1.06051	1.05973
1.57	1.0304	1.04691	1.05167
3.62	1.0304	1.04939	1.04684
8.83	1.0304	.974434	1.01596

 HARAVAN KALIBROINTI, (H-P):N KORJAUSKERROIN K

HARAVAN KESKIKOHTA 30MM TUNNELIN KESKIVIIIVAN YLAPUOLELLA

BETA/ASTE	Q/MMH2O 14	63	134
9.08	1.04512	1.0223	1.01383
3.87	1.06027	1.05549	1.04677
1.82	1.07207	1.06071	1.05632
-5.8	1.06828	1.06938	1.06112
-4.22	1.08807	1.06768	1.06201
-6.42	1.07207	1.06071	1.06034
-11	1.288	1.04951	1.042

 HARAVAN KALIBROINTI, (PO-PL):N KORJAUSKERROIN J

HARAVAN KESKIKOHTA 300MM TUNNELIN KESKIVIIIVAN YLAPUOLELLA

BETA/ASTE	Q/MMH2O 14	63	134
-11.47	-3.66225	8.15975	5.73538
-6.67	3.6494	1.08625	1.22809
-4.47	1.8247	.959215	1.00986
-0.83	1.45976	.958459	.904234
1.57	1.8247	1.08625	.980271
3.62	1.8247	1.48476	1.4317
8.83	-2.43293	-2.96952	-2.45435

 HARAVAN KALIBROINTI, (PO-PL):N KORJAUSKERROIN J

HARAVAN KESKIKOHTA 30 MM TUNNELIN KESKIVIIIVAN YLAPUOLELLA

BETA/ASTE	Q/MMH2O 14	63	134
9.08	-7.2988	-8.10835	-3.45922
3.87	1.04269	1.08111	1.19018
1.82	.909137	.80955	.909645
-5.8	.905925	.737123	.769287
-4.22	.909137	.771	.777573
-6.42	.909137	.852158	.886979
-11	1.70141E+38	1.70837	2.03635

DNF.

BETA = haravan kohtauskulma
 Q = kineettinen paine