



Energia- ja ympäristötekniikan osasto  
En2010200 Energiatekniikan kandidaatintyö ja seminaari  
Virtaustekniikan laboratorio  
Kevät 2007

## **EPÄSYMMETRISEN SIIPIPROFILIN SUUNNITTELU ALISOONISEEN TUULITUNNELIIN**

Lappeenranta 16.4.2007

0259656 Veli-Matti Pentinsaari Ente 3

# SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO .....	5
2. TUULITUNNELIN KÄYTTÖ .....	6
2.1 Rakenne.....	6
2.2 Mittaustila .....	7
2.3 Tuulitunnelin painemittaukset.....	8
3. EPÄSYMMETRISEN SIIPIPROFIILIN SUUNNITTELU .....	13
3.1 Noste- ja vastusvoimat .....	14
3.1.1 Noste- ja vastusvoimakertoimet.....	17
3.2 Rajakerros .....	18
4. PAINEMITTAUSTEN SUUNNITTELU.....	19
4.1 Mittausreikien ja -putkien sijoitus.....	19
4.2 Sähköisten mittalaitteiden käyttö ja kytkentä .....	21
4.2.1 Siipiprofiilin mittalaite .....	21
4.2.2 Tuulitunnelin mittauslaite .....	22
5. TUNNELIN MITTATILAN LAADUN SELVITYS .....	24
5.1 Mittausreiät ja mittauskenttä.....	24
5.2 Pitot-staattiset mittaukset .....	26
6. JOHTOPÄÄTÖKSET .....	31

## LÄHTEET

LIITE 1. Tuulitunnelin käyttöohjeet.

LIITE 2. Koordinaattipisteet siipiprofiilin mallinnukseen.

## KUVALUETTELO

Kuva 1 Lappeenrannan teknillisen yliopiston tuulitunneli virtaustekniikan laboratoriossa .....	7
Kuva 2 Tuulitunnelin mittaustila .....	8
Kuva 3 Pitot-staattinen putki.....	10
Kuva 4 Pitot-staattinen putki mittatilassa .....	11
Kuva 5 Kokonaispaineharava .....	12
Kuva 6 NACA 7417 sivulta.....	13
Kuva 7 NACA 7417 painekäyrät ja nostovoiman resultantti .....	15
Kuva 8 Virtaus siipiprofiilissa .....	16
Kuva 9 Mittausreikien sijainti.....	19
Kuva 10 Paineenmittausletkut siiven sisällä .....	20
Kuva 11 Multimanometri .....	21
Kuva 12 Scanivalve Oy:n DSA 3218 Digital Sensor Arroy .....	22
Kuva 13 TSI:n 8702 DP-Calc -mittalaite.....	23
Kuva 14 Mittauspisteiden sijainti .....	25
Kuva 15 Virtauksen paine-, ja nopeusprofiili tuulitunnelin mittatilassa .....	28
Kuva 16 Näkymä imuaukolle .....	29
Kuva 17 Ehdotus puhaltimen uudesta sijainnista .....	32

# SYMBOLILUETTELO

## Roomalaiset

$A$	pinta-ala [m <sup>2</sup> ]
$AR$	muotokerroin
$D$	vastusvoima [N]
$L$	nostovoima [N]
$Q$	vastuserroin
$R_e$	Reynoldsin luku
$S$	keskihajonta
$V$	nopeus [m/s]
$X$	mittausarvo
$c$	jänteen pituus [m]
$c_d$	vastuserroin
$c_l$	nostovoimakerroin
$h$	mittatilan korkeus [m]
$l$	siiven pituus [m]
$n$	mittausten lukumäärä
$p$	paine [Pa]
$s$	siiven pituus [m]
$v$	nopeus [m/s]

## Kreikkalaiset

$\alpha$	kalibrointikerroin
$\varepsilon$	korjauserroin
$\mu$	viskositeetti [kg/sm]
$\rho$	tiheys [kg/m <sup>3</sup> ]
$\Delta$	muutos

## Alaindeksit

a	alapinta
dyn	dynaaminen
st	staattinen
tot	kokonais
y	yläpinta
1	johtoreuna
2	jättöreuna

## 1 JOHDANTO

Tässä tekniikan kandidaatin työssä perehdytään alisooneen tuulitunnelin rakenteeseen ja mittausvarmuuteen sekä suunnitellaan epäsymmetrinen siipiprofiili. Tutkimuksen kohteena on Lappeenrannan teknillisen yliopiston virtaustekniikan laboratorion tuulitunneli. Erityistarkastelun kohteena on tuulitunnelin rakenne, jonka muotoilu ja mahdolliset virtausesteet selvitetään. Tuulitunnelin virtausprofiili määritetään pitot-staattisten mittausten avulla, jotta saadaan tehtyä mahdollisimman luotettava analyysi virtauksen profiilista mittatilassa. Tällöin muiden mittausten tekeminen kyseisellä tunnelilla tulee luotettavammaksi, ja tunnelia voidaan käyttää luotettavammin esim. mittalaitteiden kalibroimiseen. Mittaussuurena tuulitunnelin tutkimisessa on dynaaminen paine, jonka avulla lasketaan virtausnopeudet mittatilan eri pisteissä. Työssä käsitellään myös muita tuulitunnelimittauksiin hyvin soveltuvia mittalaitteita.

Suunniteltava siipiprofiili on epäsymmetrinen, eli siipeen kohdistuu nostovoima jo kohtauskulmalla  $0^\circ$ . Mitoitetun ja mallinnetun siipiprofiilin nostovoimakertoimen ja vastuskerroin lasketaan. Nostovoimien kokeelliseksi selvittämiseksi siipiprofiiliin suunnitellaan paineenmittausjärjestelmä, jossa siiven pintaan porataan säännöllisin välimatkoin pieniä reikiä joihin asennetaan ohuet putket paineen mittaamista varten. Putket johdetaan edelleen letkuihin, jotka kulkevat siipiprofiilin sisällä. Työssä tutkitaan myös mittausjärjestelmien käyttöä tämän kaltaisissa mittauksissa, joissa täytyy saada tehtyä mittauksia monista pisteistä yhtä aikaa.

## 2 TUULITUNNELIN KÄYTTÖ

Tuulitunnelia voidaan käyttää esimerkiksi paine- ja nopeusmittalaitteiden kalibroimiseen sekä virtauskappaleiden, kuten siipiprofiilien virtausominaisuuksien tutkimiseen. Virtauskappaleiden tutkimisessa on yleistä, että tutkittavasta kappaleesta tehdään pienoismalli, jolla varsinaiset mittaukset tehdään. Luotettavien tulosten saamiseksi olisi ensiarvoisen tärkeää, että mittaustilan virtausprofiili olisi mahdollisimman tarkkaan tiedossa. Tätä tärkeää seikkaa on tutkittu tarkemmin kappaleessa 5.

### 2.1 Rakenne

Tuulitunneli voi olla rakenteeltaan joko avoin tai suljettu. Avoimessa tuulitunnelissa tuloilma otetaan eri paikasta kuin mihin poistoilma puhalletaan. Suljetussa tuulitunnelissa puolestaan kierrätetään samaa ilmaa koko ajan, jolloin puhaltimen läpi kulkenut ilma joudutaan johtamaan uudelleen mittatilaan. Tällöin järjestelmästä tulee huomattavasti avointa tunnelia suurempi, ja kanavien mutkat saattavat aiheuttaa huomattavaa painehäviötä mikäli niissä ei ole asianmukaisia ohjaussiipiä. (Rae & Pope, 1984. s. 8 ja 89-90)

Avoim tuulitunneli, kuten Lappeenrannan teknillisen yliopiston virtaustekniikan laboratorion tuulitunneli on suora kanavisto, jolla on alku- ja loppupäänsä (kuva 1). Ilma imetään laboratorion sisältä kumisten ilmanohjauselementtien läpi ns. hunajakennostoon, joka on ohuesta pellistä tehtyjen kuusikulmaisten kanavien muodostama laaja säleikkö. Hunajakennojen tarkoitus on varmistaa, että ilma tulee tunneliin tasaisesti joka puolelta. Tämän takia imukanavan lähellä ei saa olla virtausta häiritseviä esteitä. Hunajakennojen takana on vielä viisi säleikköä, joiden muotoilu on sama kuin hunajakennoilla. Säleikköjen avulla virtauksesta pyritään poistamaan pyörteily.



**Kuva 1** Lappeenrannan teknillisen yliopiston tuulitunneli virtaustekniikan laboratoriossa

Hunajakkenojen jälkeen ilma tulee supistuskartioon, jolloin sen nopeus kasvaa ja virtauskanavan pinta-ala supistuu 1:16-osaan alkuperäisestä. Supistuskartion jälkeen tullaan lasiseinäiseen mittatilaan, jossa mittaukset yleensä suoritetaan. Mittaustilasta ilma poistuu laajenevaan diffuusoriin, jonka jälkeen on varsinainen puhallin. Puhaltimen tehoa voidaan muuttaa joko taajuusmuuntajan kautta tai siipikulmaa muuttamalla. Ennen kuin ilma johdetaan ulos, se joutuu laboratorion rakenteiden vuoksi tekemään kaksi turhaa 90° asteen mutkaa, joiden takia aiheutuu pientä virtausvastusta.

## 2.2 Mittaustila

Mittaustila on mitoiltaan 400 mm korkea ja 250 mm leveä. Pituutta mittatilalla on noin 500 mm, ja sen etuseinänä on läpinäkyvää pleksiä jonka voi tarvittaessa ottaa irti (kuva 2). Takaseinässä on pyöritettävä kiinnityskohta, johon kiinnitetyn virtauskappaleen kohtauskulmaa voidaan muuttaa ulkoa käsin myös mittausten aikana. Pohjassa olevassa irrotettavassa kiekossa on reiät mittalaitteiden, kuten pitot-staattisen putken ja kuumalanka-anemometrin käyttöä varten.

Pohjakiekko voidaan tarvittaessa kääntää toisin päin, jolloin mittauksia voidaan tehdä myös tunnelin toiselta laidalta. Mittatilaan on asennettu pysyvästi mittausputket varsinaisen mittatilan etuosaan ja kokonaispaineharava mittatilan takaosaan. Materiaaliltaan mittatilan seinät ovat läpinäkyvää pleksiä sekä tasaiseksi hiottua, petsattua vaneria. Painehäviöitä saattaa syntyä pohjassa ja seinissä olevista rei'istä mikäli niitä ei tukita kunnolla. Mittalaittekiekot eivät myöskään ole täysin saumattomia, koska niiden pitää olla liikuteltavissa.



**Kuva 2** Tuulitunnelin mittaustila

### **2.3 Tuulitunnelin painemittaukset**

Tuulitunnelimittauksissa yksi tärkeimmistä selvitettävistä suureista on dynaaminen paine  $p_{dyn}$ , joka on kokonaispaineen ja staattisen paineen erotus. Kun kappale joutuu liikkuvaan fluidiin, siihen vaikuttaa dynaaminen paine. Tällöin paine kasvaa virtausesteen kohdalla. Bernoullin mukaan kokoonpuristumattomille väliaineille pätee yhtälö



$$p_{tot} = p_{st} + p_{dyn} = \frac{1}{2} \rho v^2, \quad (1)$$

jossa  $p_{tot}$  on kokonaispaine  
 $p_{st}$  on staattinen paine  
 $\rho$  on väliaineen tiheys  
 $v$  on virtauksen nopeus.

Tällöin dynaaminen paine

$$p_{dyn} = p_{tot} - p_{st}. \quad (2)$$

Alisoonista tuulitunnelia käytetään yleensä enintään 30 m/s nopeudella, jolloin ilmaa voidaan pitää kokoonpuristumattomana.

Samasta yhtälöstä saadaan nopeudeksi

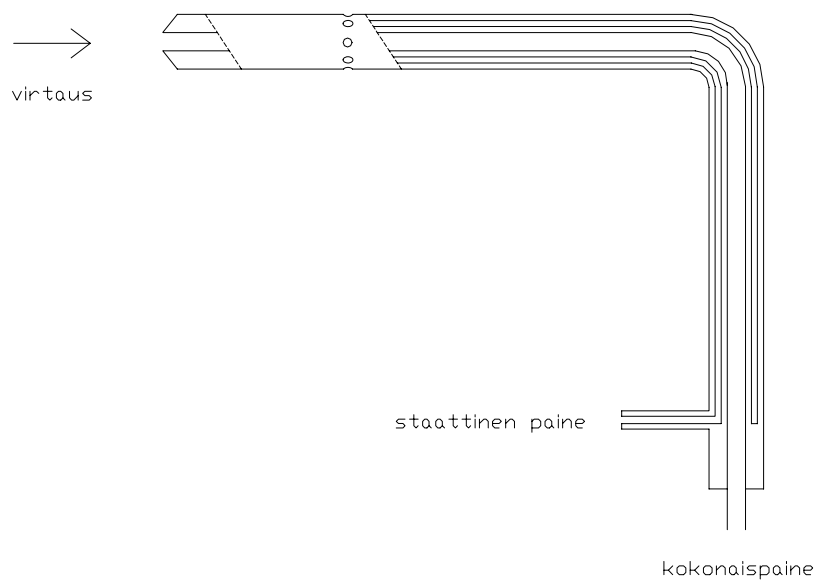
$$v = \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}}. \quad (3)$$

Helpoin tapa mitata ilman virtausnopeutta on käyttää pitot-staattista putkea, jota myös pelkäksi pitot-putkeksi kutsutaan. Pitot-putkella mittaaminen perustuu kokonaispaineen ja staattisen paineen eron mittaamiseen. Putken pää suunnataan kohti virtausta, jolloin siihen vaikuttaa virtauksen kokonaispaine. Putken sivulle on lisäksi porattu pieniä reikiä, joihin vaikuttaa ainoastaan staattinen paine. Mitatut paineet johdetaan manometrin vastakkaisiin haaroihin, jolloin mittalaite laskee dynaamisen paineen ja sen avulla virtausnopeuden. Tarkka mittaaminen edellyttää lisäksi kalibrointikertoimen  $\alpha$  ja kokoonpuristuvuuden korjauskertoimen  $(1 - \varepsilon)$  selvittämistä. Pieniä virtausnopeuksia käytettäessä kokoonpuristuvuuden korjauskerrointa ei ole pakko huomioida. Kalibrointikerroin puolestaan riippuu putken pään rakenteesta, staattisen paineen mittausrakenteiden koosta, sijainnista ja lukumäärästä sekä putken muotoilusta. Korjauskerrointa käytettäessä tulee lisäksi huomioida, että tietty korjauskerroin on voimassa vain tietyissä olosuhteissa, esim.

yksifaasisessa ilmassa. Virtaus ei myöskään saa olla liian turbulентtinen tai pyörteinen, ja virtauksen nopeusjakauman tulee olla mittauspään kohdalla tasainen. Kun tarvittavat kertoimet tiedetään, voidaan nopeudelle käyttää yhtälöä

$$v = \alpha(1 - \varepsilon) \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}} . \quad (4)$$

Mitattaessa Pitot-staattisella putkella on tärkeää että putken pää osoittaa kohtisuoraan virtausta vastaan. Muussa tapauksessa kohtauskulman aiheuttama virhe täytyy ottaa laskuissa huomioon. Mikäli virtausnopeus on suuri, tulee putken olla riittävän paksu, jotta se ei ala värähdellä virtauksen voimasta. (Siren, 1995. s. 173-179)



**Kuva 3** Pitot-staattinen putki

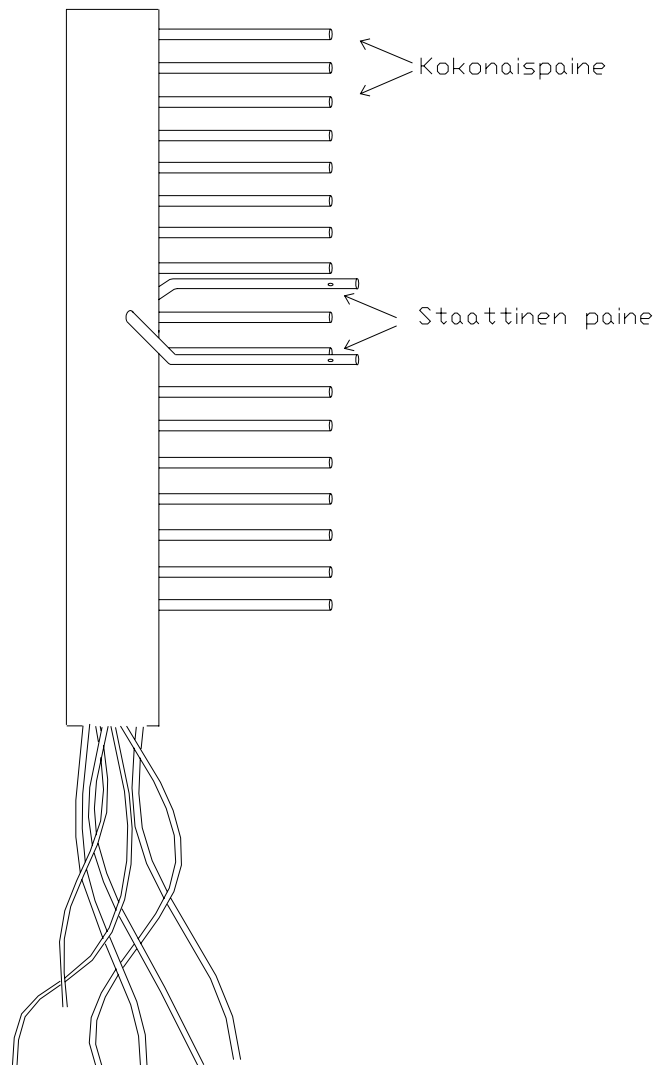


**Kuva 4** Pitot-staattinen putki mittatilassa

Tuulitunnelimittauksissa tarvitaan usein tietoja usean eri kohdan paineista yhtä aikaa. Tällöin on helpointa käyttää esim. multimanometriin kytkettävää kokonaispaineharavaa. Virtauskentässä oleva siipi aiheuttaa taakseen katvealueen, jossa virtaus on hitaampaa. Kokonaispaineharavalla paineen muutos suhteessa siiven kauempaa kiertävään virtaukseen saadaan mitattua yhdellä mittauksella. Mittalaite koostuu useasta ohuesta putkesta, jotka ovat tasaisen välimatkan päässä toisistaan. Usein käytetään halkaisijaltaan 1,6 mm paksuista teräsputkea. Suurin osa putkista on ainoastaan päästä avoimia kokonaispaineen mittaukseen soveltuvia putkia. Niiden lisäksi mittalaitteessa olisi hyvä olla muutama putki, jotka mittaavat kokonaispaineen lisäksi staattista painetta kanavassa. Tällöin virtauksen aiheuttama dynaaminen paine saadaan erotettua erilleen kokonaispaineesta. Mikäli haravassa on ainoastaan kokonaispaineputkia, voidaan staattinen paine mitata erikseen siihen soveltuvalla mittalaitteella. (Rae & Pope, 1984. s. 112-113)

Haravan täytyy olla riittävän korkea, jotta virtaus saadaan mitattua myös siiven ylä- ja alapuolelta, missä siiven aiheuttama virtauksen hidastuminen ei vaikuta. Putkien on myös oltava täsmälleen

oikeilla etäisyyksillä toisistaan, jotta virtausprofiilista saadaan luotettavasti mitattua. Staattisen paineen reiällä varustetut putket eivät tule samaan riviin kokonaispaineputkien kanssa, koska niiden varressa oleva mittareikä olisi silloin alttiina muiden putkien aiheuttamalle pyörteilylle. Ne täytyy tämän takia sijoittaa joko haravan sivulle erilleen muista putkista tai haravan päihin pitemmällä varrella varustettuina. Jotta staattisen paineen reiät eivät ottaisi häiriötä putkiensa päistä, täytyy päiden kulmat tehdä puolipallon muotoisiksi. (Rae & Pope, 1984. s. 112-113)

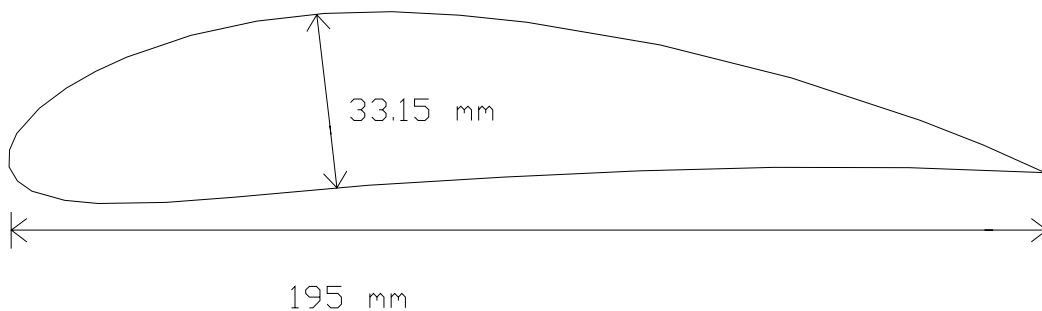


**Kuva 5** Kokonaispaineharava

### 3 EPÄSYMMETRISEN SIIPIPROFIILIN SUUNNITTELU

Siipiprofiilin epäsymmetrisyydellä tarkoitetaan sitä, että siivellä on nostevoimaa vaikka kohtauskulma virtausta vastaan on  $0^\circ$ . Jotta näin tapahtuisi, siiven täytyy olla kaareva, jolloin sen keskilinja nousee jänteen yläpuolelle. Kaarevuuden lisääntyessä myös nostevoima kasvaa. Siiven koko, joka riippuu jänteen pituudesta ja siiven poikittaispituudesta, vaikuttaa myös oleellisesti nostovoiman suuruuteen. Suurelle pinta-alalle syntyy suurempi noste, mikäli siivellä on kohtauskulmaa tai kaarevuutta. Siiven paksuudella ja kaarevuuden sijainnilla on lisäksi vaikutusta nostovoimaan, mutta niiden merkitys on pienempi.

Suunniteltavan siipiprofiilin kokoa rajoittaa tuulitunnelin mittatilan leveys, joka on 250 mm. Profiilin suunnitteluun käytettiin Yhdysvaltain ilmailu- ja avaruushallintokeskuksen NASA:n laskentaohjelmia FoilSim 2 version 1.4n ja 1.5a sekä NACA 4 Digits Series -ohjelmaa. Siiven kaarevuudeksi valittiin 7 %, jotta nostevoimat olisivat selvästi havaittavissa. Kaarevuuden sijainniksi valittiin siiven keskikohta, jotta nostevoimien laskeminen ja simulaattoreiden käyttö olisi helpompaa. Siiven paksuudeksi valittiin 17 % siiven pituudesta. Näillä mitoilla mallinnettua siipiprofiilia voidaan kutsua NACA 7417-profiiliksi (kuva 6).



**Kuva 6** NACA 7417 sivulta

Kuvan 6 siipiprofiilin mallintamiseen käytettiin 25 mittauspistettä riittävän tarkan muodon aikaansaamiseksi. FoilSim 2 version 1.4n ohjelmalla laskettaessa käytettiin virtaukselle normaalin ilmanpaineen arvoa  $p = 101,3kPa$  ja nopeutta  $v = 20m/s$ . Jänteen pituudeksi valittiin  $c = 195mm$  ja leveydeksi mittatilan sallimat  $s = 250mm$ . Annettujen mittojen perusteella siiven pinta-alaksi tuli  $A = 0,05m^2$ . Mittauspisteet on esitetty liitteessä 2.

### 3.1 Noste- ja vastusvoimat

Muotokerroin  $AR$  kertoo mikä on siiven pituuden ja jätteen välinen suhde. Sillä on merkitystä nostovoiman suuruuteen, koska virtaus käyttäytyy eri tavalla siiven päässä kuin siiven keskellä.

$$AR = \frac{s}{c}, \quad (5)$$

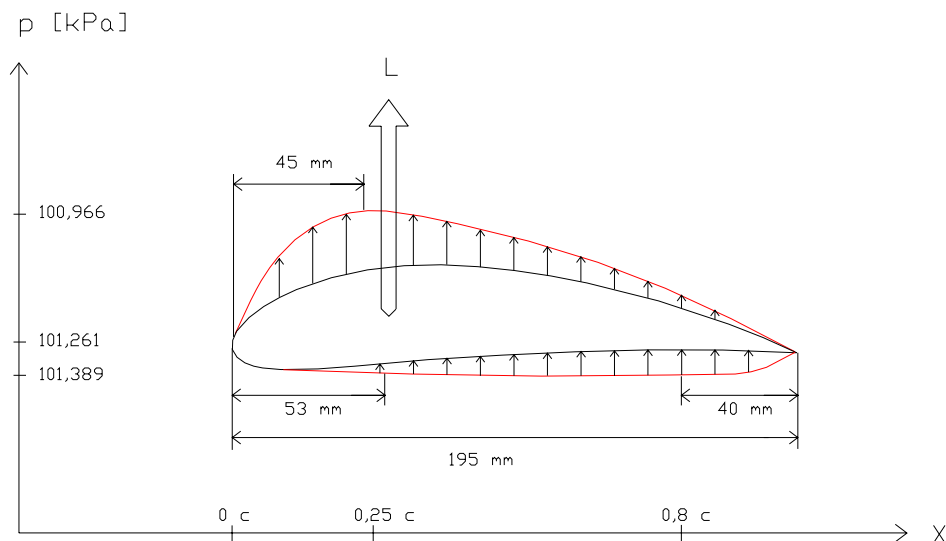
josta saadaan

$$AR = \frac{250\text{mm}}{195\text{mm}} = 1,28.$$

Virtaus saattaa siiven päässä kiertää siiven sivulta, jolloin paine-eroa ja sitä kautta nostovoimaa ei pääse syntymään. Erittäin pitkällä siivellä muotokerroimen vaikutus on olemattoman pieni, mutta lyhyillä siivillä, kuten edellä lasketussa tapauksessa jossa muotokerroin  $AR=1,28$  se vaikuttaa heikentävästi nostovoimaan noin 12%. (NASA:n simulaattori 1.4n)

Epäsymmetrisen siiven nostovoima syntyy siten, että virtauksen nopeus profiilin kohdalla muuttuu. Siiven yläpinnalla virtauksen nopeus kasvaa ja paine pienenee. Tällöin siiven yläpinnalle muodostuu siipeä ylöspäin imevä nostovoima. Siiven alapinnalla puolestaan virtaus hidastuu ja paine kasvaa, jolloin siiven alapuolelle muodostuu siipeä ylöspäin työntävä ylipaine. Nämä voimat yhdessä muodostavat nostovoiman. (NASA 1.)

Tutkittaessa profiilia NACA 7417, saatiin siiven yläpinnan alipaineen maksimiarvoksi  $\Delta p_y = 295\text{Pa}$  ja alapinnan ylipaineen maksimiarvoksi  $\Delta p_a = 128\text{Pa}$ . Koko siiven pituudesta on käytetty merkintää  $c$ . Yläpinnan painehiipun sijainti on noin 45 mm päässä johtoreunasta, eli kohdassa  $0,23 c$ . Alapinnan painemaksimi puolestaan sijoittuu noin 40 mm päähän jättöreunasta, eli kohtaan  $0,8 c$  (kuva 7). Molempien voimien yhteenlaskettu huippukohta on noin kohdassa  $0,27 c$  eli 53 mm johtoreunasta. (NASA:n simulaattori 1.5a)



**Kuva 7** NACA 7417 painekäyrät ja nostovoiman resultantti

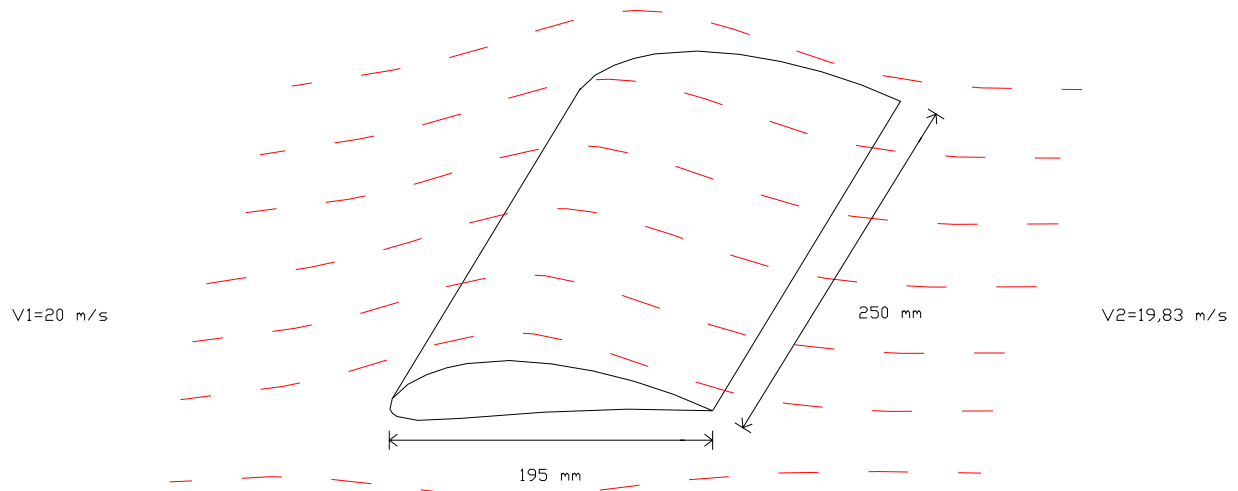
Nostovoima  $L$  saadaan laskettua paine-erojen ja pinta-alan avulla yhtälöllä

$$L = \Sigma(\Delta p A), \quad (6)$$

josta ohjelmalla FoilSim 2 version 1.4n saadaan NACA 7417 -profiilille edellä mainittujen mittojen mukaan nostovoimaksi  $L=10,0$  N. Muotokerrointa ei tässä simulaatiossa otettu huomioon, koska siipi täyttää koko mittatilan, jolloin siiven päät ovat erittäin lähellä mittatilan seinämiä. Virtauksen oletetaan siis kulkevan ainoastaan joko siiven ylä- tai alapuolelta.

Vastuskertoimen määrittämiseksi täytyy ensin selvittää nopeuden muutos, jonka siipiprofiili aiheuttaa. Virtauksen nopeus siiven jättöreunan takana on aina hieman pienempi kuin ennen siipeä, sillä siipi aiheuttaa aina jonkin kokoisen virtausvastuksen. Nopeuden vaakasuora komponentti hidastuu myös juuri ennen johtoreunaa, koska siiven johtoreuna tukkii virtausta.

Tutkittavassa siipiprofiilissa tulevan virtauksen nopeus otetaan kaukaa johtoreunasta, jolloin  $V_1 = 20\text{m/s}$ . Jättöreunan nopeus puolestaan on mitattu FoilSim 2 version 1.4n simulaattorilla noin  $1c$  etäisyydellä jättöreunasta. Nopeudeksi siiven takana saatiin  $V_2 = 19,83\text{m/s}$  (kuva 8). Näin ollen nopeuden muutos  $\Delta V = 0,17\text{m/s}$ . (NASA simulaattori 1.4n)



**Kuva 8** Virtaus siipiprofilissa

Nopeuden muutos

$$\Delta V = \frac{Q/h}{2}, \quad (7)$$

missä  $Q$  on vastuskerroin  
 $h$  on mittatilan korkeus,

josta saadaan

$$Q = 2\Delta Vh, \quad (8)$$

jolloin

$$Q = 2 \cdot 0,17 \frac{m}{s} \cdot 0,4m = 0,136.$$

Vastusvoima  $D$  voidaan nyt laskea yhtälöllä



$$D = \rho QV, \quad (9)$$

missä  $\rho$  on fluidin tiheys,

jolloin vastusvoimaksi saadaan

$$D = 1,224 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 0,136 \cdot 20 \frac{\text{m}}{\text{s}} = 3,3 \text{N}.$$

(Rae & Pope, 1984. s. 353-356)

### 3.1.1 Nosto- ja vastusvoimakertoimet

Jokaisella eri virtauskappaleella on sille ominainen nosto- ja vastusvoimakertoimet, jotka kuvaavat kyseisen kappaleen nosto- ja vastusominaisuuksia sen mittojen ja fluidin ominaisuuksien suhteen. Optimaalisella siivellä nostovoimakertoimen tulisi olla 40-80 kertaa vastusvoimakertoimen kokoinen. (Termisten virtauskoneiden luentomonisteet)

Tutkittavalla NACA 7417 -profiililla jäädään kauas tästä, sillä mittatila rajoittaa optimaalisten mittojen käyttöä ja siipi on suunniteltu ainoastaan havainnollistamaan nostovoiman syntyä epäsymmetrisessä siipiprofiilissa. Nostovoimakertoimen  $c_L$  yhtälö on

$$c_L = \frac{L}{\frac{1}{2} \rho V^2 c l}, \quad (10)$$

missä  $l$  on siiven pituus,

$$\text{jolloin } c_L = \frac{10,0 \text{N}}{\frac{1}{2} \cdot 1,224 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 20^2 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot 0,195 \text{m} \cdot 0,25 \text{m}} = 0,84.$$

Vastusvoimalle  $c_D$  voidaan puolestaan käyttää yhtälöä

$$c_D = \frac{D}{\frac{1}{2}\rho V^2 c l}, \quad (11)$$

jolloin

$$c_L = \frac{3,3N}{\frac{1}{2} \cdot 1,224 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 20^2 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot 0,195\text{m} \cdot 0,25\text{m}} = 0,28.$$

(Termisten virtauskoneiden luentomonisteet)

### 3.2 Rajakerros

Rajakerroksella tarkoitetaan ohutta kerrosta vapaan virtauksen ja siiven pinnan välissä, missä virtausnopeus on hidastunut vähintään 1 % kyseisen kohdan vapaan virtauksen nopeudesta. Virtauskappaleen pinta ei voi koskaan olla täysin sileä, minkä takia pinnan ja virtauksen välille syntyy kitkaa. Molekyylit tarttuvat pintaan aiheuttaen samalla virtausvastusta. Aivan virtauskappaleen pinnassa virtauksen nopeus on aina 0 m/s. Siipiprofiilin rajakerroksen paksuus kasvaa kun edetään kauemmas siiven johtoreunasta. Mikäli siipi on kyllin leveä, tai sen kallistuskulmaa lisätään, irtoaa rajakerros jossain vaiheessa siiven pinnasta. Tällöin rajakerroksen alin osa muuttuu laminaarisesta virtauksesta turbulenttiseksi, minkä takia paine-ero pääsee siiven pinnan ja vapaan virtauksen välillä pääsee tasoittumaan. Kun paine-eroa ei enää ole, menettää siipi sillä kohdalla olleen nostovoiman. Ilmailussa tämä ilmiö on vaarallinen, ja sitä kutsutaan sakkaamiseksi. (NASA 2)

Rajakerroksen muuttuminen turbulenttiseksi riippuu Reynoldsin luvusta  $R_e$ . Reynoldsin luku siipiprofiileille määritellään

$$R_e = \frac{\rho v c}{\mu}, \quad (12)$$

missä  $c$  on siiven leveys virtaussuunnassa

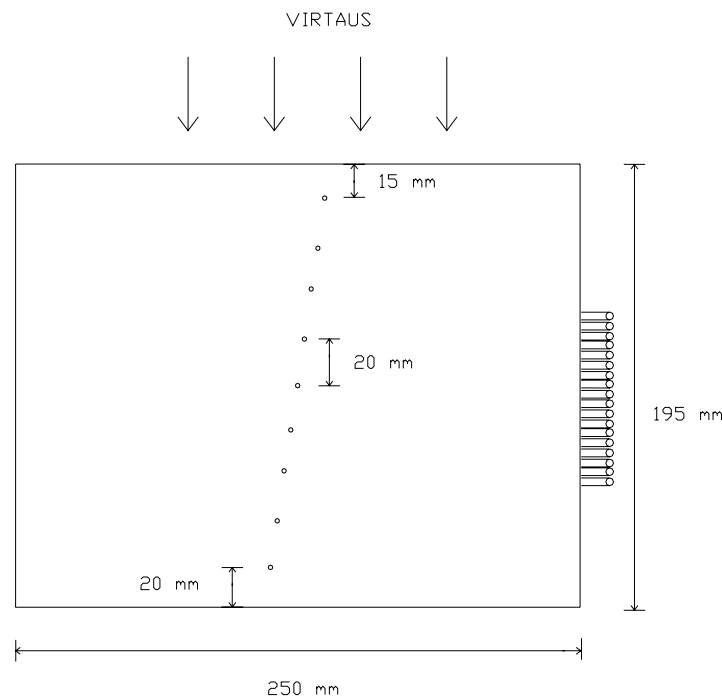
$\mu$  on virtauksen viskositeetti.

## 4 PAINEMITTAUSTEN SUUNNITTELU

Siiven nostovoiman synty siiven yläpinnalle muodostuvan alipaineen ja alapinnalle muodostuvan ylipaineen ansiosta. Nostovoima on laskettavissa laskentaohjelmien ja simulaattoreiden avulla, mutta mikäli todellisen siiven nosteominaisuudet halutaan selvittää kokeellisesti, joudutaan siipeen tekemään paineenmittausreikiä. Tällöin siipeen porataan tasaisin välimatkoin pieniä reikiä, joihin työnnetään ohuet putket. Reiän ja putken liitoksen tulee olla tiivis, minkä takia putket kannattaa liimata tai juottaa kiinni. Ylimääräiset kuonat ja putkien päät hiotaan pois siiven pinnoilta, jotta pinnat pysyisivät mahdollisimman sileinä. Näkyviin jäävät reiät tulee myös puhdistaa jäysteistä.

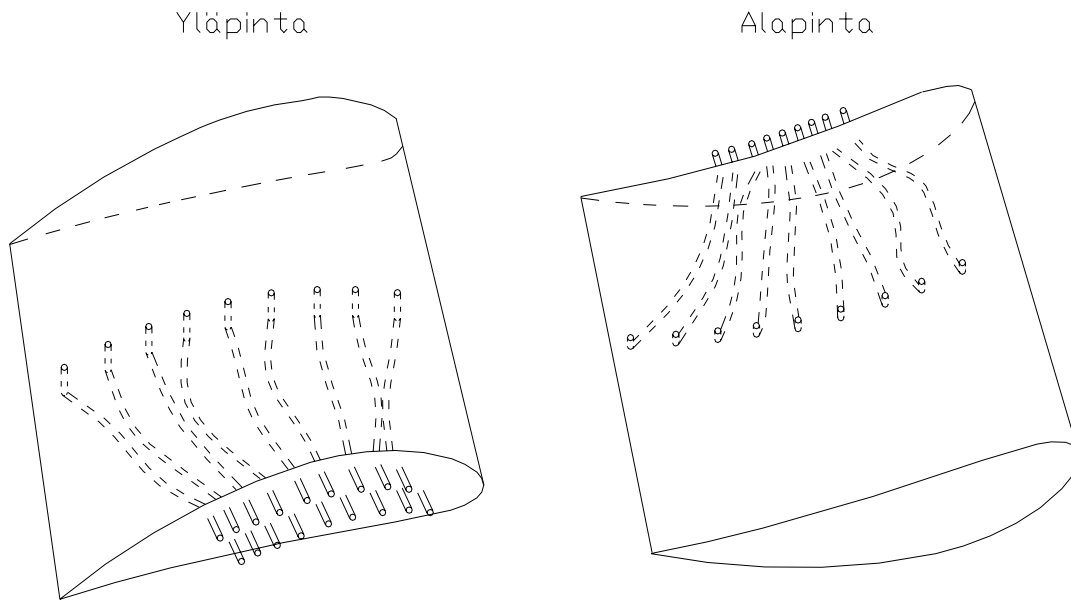
### 4.1 Mittausreikien ja –putkien sijoitus

Reiät eivät saa olla virtaussuuntaan nähden peräkkäin, jotta etummaisat reiät eivät aiheuta häiriötä takana oleviin mittausreikiin (kuva 9). Suunnitellun NACA 7417 -profiilin nostovoima on tarkoitus selvittää kokeellisesti yhdestä rivistä siiven keskeltä. Mittauspisteitä tulee 9 kappaletta sekä siiven ylä- että alapinnalle, ja niiden etäisyys toisistaan on 20 mm virtaussuunnassa.



**Kuva 9** Mittausreikien sijainti

Jotta putket saataisiin johdettua siiven läpi mittauspisteeseen, täytyy siiven olla sisältä ontto. Umpinainen siipi joudutaan poraamaan tai jyrsimään ontoksi joko kokonaan tai ainakin haluttujen mittaussreikien kohdilta. Siiven pinnalta alkavat putket täytyy taivuttaa kulkemaan kohti siiven toista päätä missä ne johdetaan siivestä ulos. Putket voidaan myös katkaista siiven sisällä, ja liittää niihin notkeat kumiletkut, joita pitkin paine välittyy siiven läpi, kuten kuvassa 10.



**Kuva 10** Paineenmittausletkut siiven sisällä

Paineletkujen ulostulo on siiven kyljessä, jolloin myös mittatilan seinässä täytyy olla aukko niitä varten. Tutkittavassa tuulitunnelissa on pyöreä aukko siiven kiinnitystä varten. Sama aukko käy myös NACA 7417 -profiilille. Sitä varten joudutaan kuitenkin tekemään uusi kiekko johon siipi kiinnitetään, ja josta paineletkut voidaan kiinnittää siiven laidasta tuleviin paineputkiin. Paineenmittaus voidaan toteuttaa joko nestetoimisen multimanometrin avulla (kuva 11), tai sähköisen mittalaitteen avulla. Multimanometri koostuu useista vierekkäisistä muoviputkista, jotka on osittain täytetty vedellä. Mikäli putkia on riittävän paljon, voidaan yhtä aikaa seurata sekä ylä- että alapinnan paineen muodostumista. Tarkkuutta voidaan multimanometrissa säätää kallistuskulmaa muuttamalla. Mittausten avulla voidaan siivelle laatia kuvan 7 kaltainen painejakauma, joka muuttuu kohtauskulman funktiona.



**Kuva 11** Multimanometri

## **4.2 Sähköisten mittalaitteiden käyttö ja kytkentä**

Mittaamisen nopeuttamiseksi ja virhearvioihin tarvittavan mittausjoukon saamiseksi sähköisen mittalaitteen käyttö on paine- ja nopeusmittauksissa suotavaa.

### **4.2.1 Siipiprofiilin mittalaite**

Siiven painejakauman sähköiseen mittaamiseen tarvittaisiin laite, johon voitaisiin kytkeä yhtä aikaa monta paineletkua. Nestemultimanometrilla voidaan tarkkailla yhtä aikaa kaikkia siihen kytkettyjä

paineyhteitä, mutta mittaustulosten tarkka lukeminen ja tallentaminen on hidasta. Sähköisellä mittalaitteella, kuten Scanivalve Oy:n DSA 3218 Digital Sensor Arroylla, (kuva 12) tämä ongelma voitaisiin ratkaista. Kyseiseen mittariin voidaan kytkeä enintään 16 paineyhdettä, joita laite mittaa vuorotellen. Scanivalven mittalaitteen tarkkuus on  $\pm 0,5$  Pa, ja se on helppo kalibroida ilman erillistä painekalibraattoria. Muistipaikkoja laitteessa on jokaiselle mittauspisteelle 500, joten satunnaisten heilahtelujen vaikutus voidaan tehokkaasti estää tekemällä mittaukset suhteellisen pitkältä aikaväliltä. Tällöin saadaan monia mittaustuloksia muistiin, joista voidaan laskea keskihajonta.



**Kuva 12** Scanivalve Oy:n DSA 3218 Digital Sensor Arroy

Paineletkujen kiinnittämistä varten DSA 3218 Digital Sensor Arroy -mittalaitteessa on 16 kappaletta halkaisijaltaan 1,6 mm paineyhteitä. Laitteessa on sisäänrakennettu mikroprosessori, joka huomio lämpötilan muutokset jokaisessa mittauspisteessä, ja ottaa muutoksen huomioon tuloksissa. Mittaustietoja voidaan siirtää toisiin tietoliikenneverkkoihin valmiin TCP/IP -portin avulla. (Scanivalve Oy)

#### **4.2.2 Tuulitunnelin mittalaite**

Tuulitunnelin virtausprofiilin mittaus toteutettiin kuvan 13 TSI 8702 DP-Calc -mittalaitteella. Mittarin yläosassa on pitot-staattista putkea varten kaksi paineyhdettä, toinen kokonaispainetta ja toinen staattista painetta varten. Mittalaitteen tarkkuus on 1 % lukemasta  $\pm 1$ Pa, ja sen erottelukyky on noin 1 Pa. Suositeltava mittauspaine TSI 8702 DP-Calc -mittalaitteella on -1245...3735 Pa, ja nopeuden on syytä olla vähintään 3 m/s jotta mittatarkkuus säilyy kohtuullisena. Nopeuden

suurentuessa myös mittalaitteen tarkkuus paranee. Mittauksen aikavakio on säädettävissä viiden sekunnin porrastuksella välillä 1 – 20 s. Mittauksissa käytettiin 5 sekunnin aikavakiota näytön lukemisen helpottamiseksi. (Teknocalor Oy)



**Kuva 13.** TSI:n 8702 DP-Calc -mittalaite

## 5 TUNNELIN MITTATILAN LAADUN SELVITYS

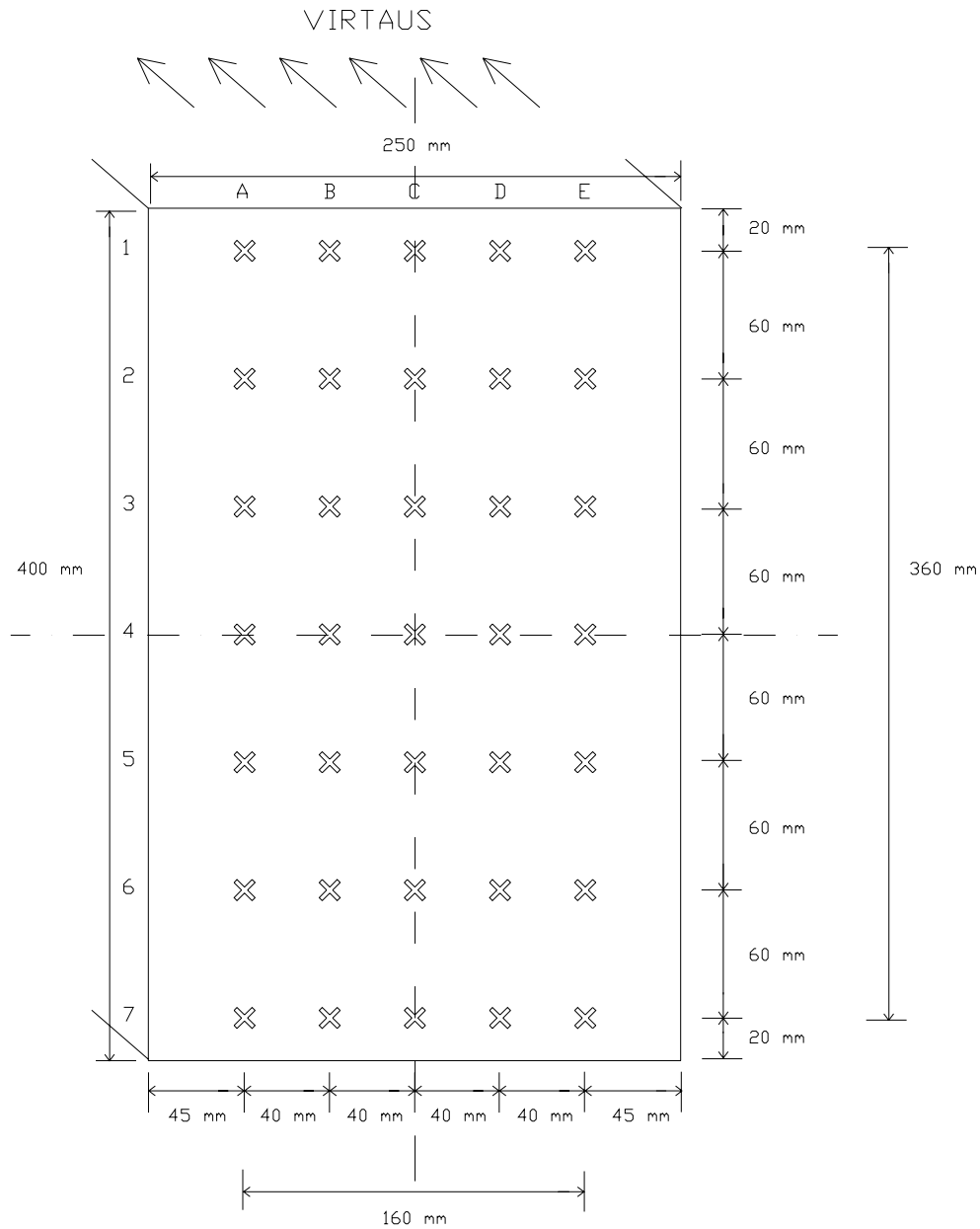
Jotta tuulitunnelissa voitaisiin tehdä mahdollisimman luotettavia mittauksia, olisi hyvä tietää mahdollisimman tarkkaan virtauksen profiili. Hunajakkeno ja rautalankasäleiköt auttavat tasaisen virtauksen muodostumiseen, mutta ne eivät välttämättä takaa tasaista virtausprofiilia. Pyörteilyä ja nopeuden muutoksia saattavat aiheuttaa kaikenlaiset virtausesteet, tunneliin kuulumattomat esineet sekä painehäviöitä aiheuttavat reiät. Tutkittavalle tuulitunnelille tehtiin pitot-staattiset mittaukset mittatilan laadun selvittämiseksi. Mittaustuloksista huomattiin, että mittatilan virtausprofiilissa on poikkeamia sekä pysty- että vaakatason pisteiden välillä.

### 5.1 Mittausreiät ja mittauskenttä

Mittauksia edeltäneessä tilanteessa mittatilan pohjassa olevassa kiekossa oli ainoastaan yksi mittausreikä pitot-staattiselle putkelle (kuva 4). Painemittauksia oli kiekon käännettävyyden ansiosta mahdollista tehdä kahdesta pisteestä koko tunnelin korkeudella. Kattavamman virtausprofiilin saamiseksi tarvittiin lisää mittausreikiä. Laajempi mittausalue saatiin aikaan poraamalla kiekon keskelle ja ulkokehälle uudet mittausreiät. Kolmen reiän kautta pystytettiin nyt kiekkoa kääntämällä tekemään mittauksia kaikkiaan viidestä kohdasta pystytasossa. Mittausreikien etäisyys toisistaan on 40 mm. Tällöin virtausprofiili saatiin tutkittua 160 mm leveydeltä vaakatasossa. Sopivaksi mittausten etäisyydeksi pystysuunnassa valittiin 60 mm (kuva 14). Mittausten aikana käyttämättöminä olleet kaksi muuta reikää tukittiin teipillä painehäviöiden välttämiseksi. Jokaisen reiän leveys oli vähintään pitot-putken halkaisijan suuruinen, eli 8 mm.

Mittaukset päätettiin suorittaa 40 Hz taajuudella. Siipikulmaa pienennettiin alkuperäisestä, sillä aiemmin oli huomattu suuren siipikulman lisäävän nopeuden heilahtelua. Pienemmällä siipikulmalla painetta ja nopeutta oli huomattavasti helpompi mitata. Sekä taajuus että siipikulma pidettiin muuttumattomina mittausten ajan. Mittaussuureeksi valittiin nopeuden sijaan dynaaminen paine, sillä sen heilahtelut häiritsivät vähemmän mittaesarvon lukemista. Mittausarvo pyrittiin ottamaan näytön antaman keskimääräisen dynaamisen paineen mukaan. Näistä arvoista otettiin keskiarvot, joka on esitetty taulukossa 1. Mittaukset suoritettiin kussakin pisteessä kahdesti, ensin edeten mittatilan pohjasta kohti kattoa, ja sen jälkeen katon rajasta takaisin alas.





**Kuva 14** Mittauspisteiden sijainti

Mittauspisteitä valittiin kuvan 14 osoittamalla tavalla viiteen pystyriiviin seitsemän kappaletta kuhunkin, eli kaikkiaan 35 kpl. Alimpien ja ylimpien mittauspisteiden etäisyys mittatilan katosta oli 20 mm, jotta pinnan mahdollisesti aiheuttama pyörteily ei vaikeuttaisi mittauksia. Tutkimatta jäi enää ainoastaan 45 mm kaistale kummastakin laidasta. Mittauspisteiden luetteloinen

helpottamiseksi niille tehtiin kuvassa 14 näkyvä koordinaatisto, jossa pystyrivejä symboloivat kirjaimet ja vaakarivejä numerot. Samaa numerointia on käytetty taulukoissa 1 ja 2.

## 5.2 Pitot-staattiset mittaukset

Mittauspisteiden paikat löydettiin piirtämällä pitot-staattisen putken varteen merkit haluttujen korkeuksien kohdille. Putki suunnattiin suoraa virtausta kohti. Putken paikallaan pitämiseen käytettiin ruuvipuristinta, joka pysyi magneetin avulla kiinni mittatilan alapinnan rakenteissa. Ruuvipuristimen paikkaa jouduttiin välillä vaihtamaan, koska pitot-staattisen putken varsi oli joistain kohdin vääntynyt. Kun mittaukset oli saatu yhdestä pystyrivistä tehtyä, siirrettiin putki seuraavaan mittausreikään puhallinta pysäyttämättä. Kun mittaukset oli tehty kolmesta ensimmäisestä pystyrivistä, jouduttiin puhallin sammuttamaan kiekon kääntämisen ajaksi. Kun kiekko oli käännetty ja puhallin taas käynnistetty, annettiin virtauksen tasaantua muutama minuutti ennen mittausten jatkamista. Saadut mittaustulokset on esitetty taulukossa 1.

**Taulukko 1** Mittaustulokset, dynaaminen paine tuulitunnelissa

Paine [Pa]		Mitattu alhaalta ylöspäin					Paine [Pa]		Mitattu ylhäältä alaspäin				
		A	B	C	D	E			A	B	C	D	E
1	133.50	133.50	133.50	133.50	133.00	131.50	1	133.50	133.50	133.50	132.00	131.00	
2	133.50	132.50	132.00	132.50	132.50	131.50	2	132.00	132.00	133.00	130.50	130.00	
3	132.50	132.50	131.00	132.50	132.50	130.00	3	132.00	131.50	131.00	131.00	130.00	
4	131.50	132.00	131.00	132.00	132.00	130.00	4	131.50	131.50	131.00	132.00	130.50	
5	131.50	131.00	130.00	131.50	131.50	130.00	5	131.50	130.00	131.00	131.00	130.00	
6	129.50	130.50	130.00	131.00	131.00	129.50	6	130.00	129.00	130.00	130.50	129.50	
7	126.50	130.00	129.00	126.50	126.50	128.50	7	127.00	126.50	129.50	127.00	127.50	

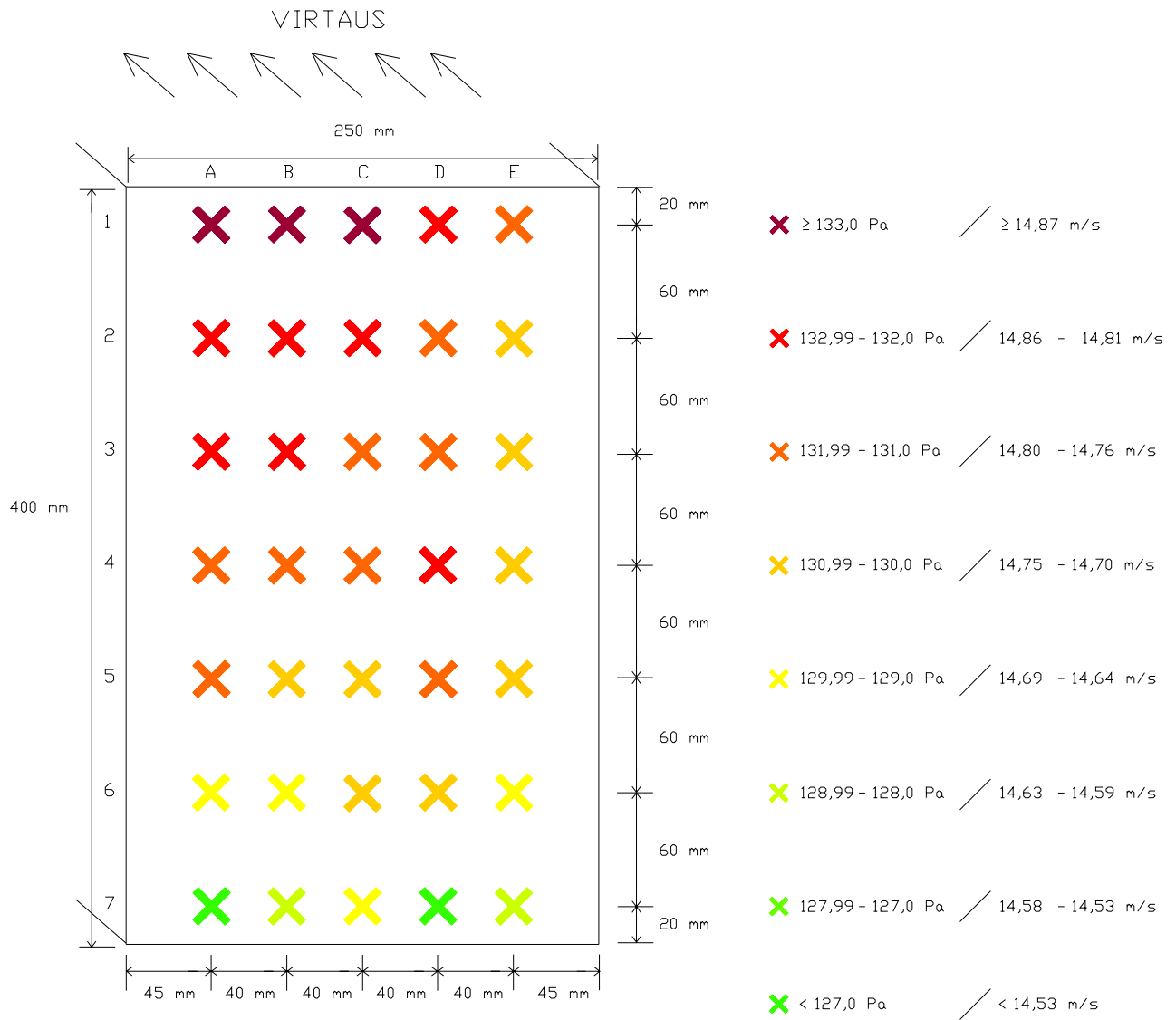
Mittaustuloksista laskettiin dynaamisten paineiden keskiarvot eri mittauspisteissä. Keskimääräisen dynaamisen paineen avulla laskettiin nopeus yhtälön 3 avulla. Mittaushetkellä lämpötila oli 18 °C. Saadut nopeudet ja dynaamisten paineiden keskiarvot on esitetty taulukossa 2.

**Taulukko 2** Dynaamisen paineen ja nopeuden keskiarvot

Paine [Pa]						Nopeus [m/s]					
	A	B	C	D	E		A	B	C	D	E
1	133.50	133.50	133.50	132.50	131.25	1	14.90	14.90	14.90	14.84	14.77
2	132.75	132.25	132.50	131.50	130.75	2	14.86	14.83	14.84	14.79	14.74
3	132.25	132.00	131.00	131.75	130.00	3	14.83	14.81	14.76	14.80	14.70
4	131.50	131.75	131.00	132.00	130.25	4	14.76	14.80	14.76	14.81	14.72
5	130.00	130.50	130.50	131.25	130.00	5	14.70	14.73	14.73	14.77	14.70
6	129.75	129.75	130.00	130.75	129.50	6	14.69	14.69	14.70	14.74	14.67
7	126.75	128.25	129.75	126.75	128.00	7	14.52	14.60	14.69	14.52	14.59

$$\rho(291K)=1,203 \text{ kg/m}^3$$

Taulukon 2 avulla laadittiin graafinen esitys virtauksen käyttäytymisestä. Kuvasta 15 huomataan, että virtausprofiilissa on selviä eroja niin pysty- kuin vaakatasossakin. Virtausprofiilissa yhtenäistä on se, että nopeus kasvaa lähes kaikkialla siirryttäessä pystysuunnassa ylöspäin. Nopeuden kasvu on melko tasaista alinta vaakariviä lukuun ottamatta, jossa muutos on muita vaakatasoja selvästi suurempi. Alimman mittauspisterivin arvoissa on myös suuria eroja, ja mittauksia tehtäessä oli merkillepantavaa suuri dynaamisen paineen heilahtelu kaikissa alimman mittausrivin pisteissä.



**Kuva 15** Virtauksen paine-, ja nopeusprofiili tuulitunnelin mittatilassa

Toinen kuvasta 15 selkeästi erottuva seikka on virtauksen menosuuntaan nähden oikean laidan (pystyrivi E) alhaiset virtausnopeudet koko kyseisellä pystyrivillä. Sen sijaan viereisen pystyrivin D nopeudet vaikuttavat paikoin yllättävän suurilta. Syitä kummallisiin mittaustuloksiin etsittiin aluksi mittaustavasta ja mittalaitteesta. Kun kaikki kuitenkin vaikutti olevan mittausten suhteen kunnossa, alettiin tutkia tuulitunnelin rakennetta epätasaisen virtauksen syiden selvittämiseksi.



**Kuva 16** Näkymä imuaukolle

Epätasaiseen virtausprofiiliin löydettiin tutkittaessa kaksi syytä. Merkittävin syy nopeuden kasvuun ylöspäin mentäessä on mitä todennäköisimmin imuaukon edessä olevissa suurissa rakennelmissa (kuva 16). Niiden etäisyys imuaukosta on vain noin kaksi metriä. Rakennelmien takia mittatilan alimpiin osiin tuleva ilma joudutaan imemään sivuilta ja päältä, jolloin alas syntyy painehäviötä. Rakennelmat eivät myöskään ole symmetrisiä. Kuten kuvasta 16 voidaan nähdä, imuaukon oikeassa laidassa oleva paksu putki tukkii selvästi uloimmalle pystyriville E tulevaa virtausta. Sen sijaan mittauspisteiden D4 ja D5 imupuolen kohdalla on esterakenteissa selvä aukko, mikä selittää niiden poikkeavan suuren nopeuden. Kuvasta 16 voidaan myös päätellä, että mittatilan laidoilla kuuluu rakenteiden takia olla hieman suurempi nopeus, koska sinne ilma pääsee lyhyempää, vähemmän painetta laskevaa reittiä.

Alimman vaakarivin, eli rivin 7 alhaiseen paineeseen ja suuriin paineen heilahteluihin löytyi todennäköinen syy tuulitunnelin sisältä. Mittatilan takaa, puhaltimen edessä olevasta mutkasta

löytyi iso teippirulla. Se on jäljistä päätellen kierinyt olinpaikkansa kenties jo vuosia sitten. Teippirullan molemmin puolin näkyi selvästi likakerros, joka oli tarttunut ohjaussiipien edessä olevaan hunajakennoon voimakkaan pyörteilyn takia.

Tuulitunnelin rakenteella saattaa myös olla vaikutusta nopeuden eroihin ja heilahteluihin. Puhaltimen sijainti lähellä 90 % asteen mutkaa ei ole virtausteknisesti paras mahdollinen vaihtoehto, sillä virtaus ei välttämättä ehdi tasaantua ennen mutkassa olevia ohjaussiipiä. Matka puhaltimelta mittatilaan on melko lyhyt, ja diffuusion suppenemiskulma jyrkkä. Tällöin virtaus saattaa hidastua epätasaisesti diffuusionissa, aiheuttaen heilahteluja mittaustilaan.

Mittausten onnistumisen kannalta tuulitunnelin virtausprofiili on kuitenkin suhteellisen tasainen, etenkin jos mittauksia tehdään vain yhdeltä korkeudelta. Esimerkiksi siipiprofiilin nostevoimat voidaan mitata kyseisessä tuulitunnelissa sangen luotettavasti. Nopeuden kesiarvo mittauksissa oli  $\bar{v} = 14,75$  m/s ja suurin ero nopeimman ja hitaimman kohdan välillä oli 0,38 m/s, eli noin 2,6 % keskinopeudesta. Pelkkiä vaakatasoja tarkasteltaessa erot jäävät selvästi pienemmiksi.

Mittausten keskihajonta voidaan laskea

$$S = \sqrt{\frac{\sum (X_i - \bar{X})^2}{n-1}}, \quad (13)$$

missä  $S$  on keskihajonta  
 $X_i$  on mittausarvo  
 $\bar{X}$  on mittausten keskiarvo  
 $n$  on mittausten lukumäärä.

Nopeuden keskihajonnaksi saadaan tällöin  $S=0,095$  m/s.

## 6 JOHTOPÄÄTÖKSET

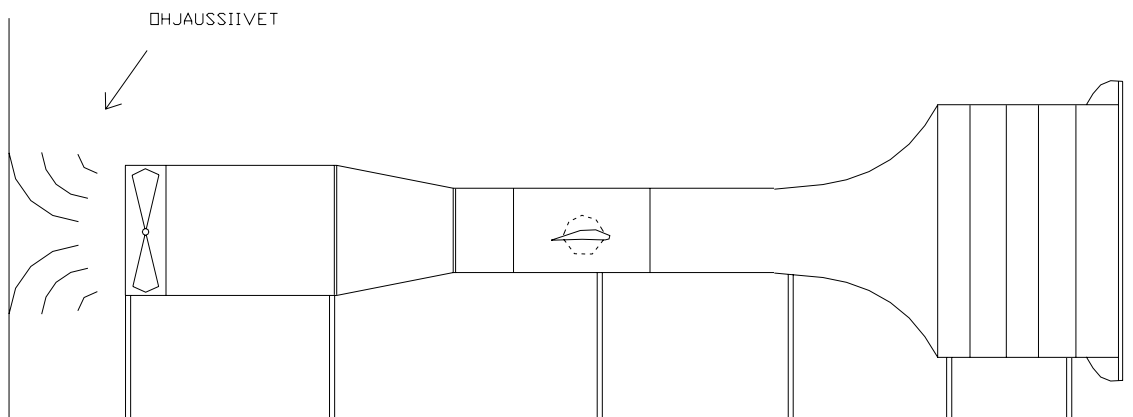
Siipiprofiilin mallinnus onnistui hyvin simulaattoreiden avulla. NACA 7417 -profiili suunniteltiin tarkoituksella suhteellisen suureksi tuulitunnelin kokoon nähden, jotta sen valmistaminen olisi helpompaa. Suuri koko helpottaa myös paineletkujen maatumista siiven sisään. Mahdollinen ongelmakohta paineputkien sijoituksessa saattaa olla siiven jättöreunassa, joka kapenee voimakkaammin kuin vastaavan paksuinen symmetrinen siipiprofiili. Nostevoima kehittyy myös paremmin havaittavaksi suuremmissa siivessä. Nosteen kokeellinen määrittäminen tuulitunnelin nykyisillä ominaisuuksilla onnistuu hyvin, sillä tunnelin keskellä vaakarivillä 4 virtauksien nopeusero on suurimmillaan vain 0,6 %.

Tuulitunnelin virtausprofiilin parantamiseksi olisi tärkeää että imuaukon edessä olevat esteet voitaisiin siirtää kauemmas. Mikäli tämä ei ole mahdollista, voitaisiin harkita rakennelmissa olevien aukkojen peittämistä esimerkiksi suurilla vanerilevyillä. Vaneriseinämän tulisi sijaita kiinni rakennelmassa. Mitoiltaan sen tulisi ulottua vaakatasossa vähintään niin kauas kuin rakennelmatkin, symmetrisesti kummallakin puolella. Pystysuunnassa vaneriseinämän tulisi ulottua vähintään yhtä korkealle kuin mitä on etäisyys imuaukon alapinnasta lattiaan. Tällöin imuilmaa tulisi tasaisesti kummaltakin sivulta. Mittatilan keskelle saattaisi tosin tällöin muodostua katvealue.

Mittauksissa käytetty pitot-staattinen putki toimi varsin luotettavasti. Vaikka mittalaitteena käytetty TSI:n 8702 DP-Calc -mittarin tarkkuus ei ole paras mahdollinen, ei mittauksista jäänyt epäselväksi jonkinasteisen virtauksen epätasaisuuden olemassaolo. Mittaustuloksiin on voinut edellä mainittujen seikkojen lisäksi vaikuttaa laboratoriohuoneen sisäiset ilmavirrat. Laboratorion ovea auottiin useamman kerran mittausten aikana, ja huoneessa liikkui mittausten kannalta ylimääräisiä henkilöitä. Ilmanvaihtoa ei oltu myöskään kytketty pois päältä, mutta sen vaikutusta mittauksiin voidaan pitää vähäisenä.

Muina kehitysehdotuksina voitaisiin mainita puhallinkanavan laskemista samaan tasoon mittatilan kanssa, jolloin seinään jouduttaisiin mahdollisesti tekemään reikä ulospuhallusta varten. Laboratorion kantavien rakenteiden takia reiän teko ei kuitenkaan ole suotavaa. Tällöin voitaisiin tutkia vaihtoehtoa, jossa ilma puhallettaisiin aina laboratoriotilaan. Puhallin sijoitettaisiin hieman nykyistä lähemmäs diffuusoria, ja poistoilma puhallettaisiin seinään päin. Seinään puolestaan

sijoitettaisiin saman kaltaiset mutta suuremmat ohjaussiivet joita käytetään kanavamutkissa ilmanohjaimina (kuva 17). Tällä järjestelyllä tuulitunnelin fyysinen koko myös pienenesi ja puhallin tulisi käden ulottuville. Virtauksen tasaamiseksi voitaisiin vielä asentaa hunajakennot diffuusorin ja mittatilan väliin.



**Kuva 17** Ehdotus puhaltimen uudesta sijainnista

Tuulitunnelimittauksia olisi mahdollista parantaa käyttämällä mittalaitteessa tallennustoimintoa. Tällöin saataisiin yhdestä pisteestä enemmän mittausrvoja, joiden perusteella saataisiin luotettavammin laskettua keskiarvot keskihajonnat kullekin pisteelle. Siipiprofilimittauksissa sähköisen mittalaitteen käyttö parantaisi mittausten luotettavuutta, ja helpottaisi virhearvioiden tekemistä.



## LÄHTEET

Siren, Kai. 1995. Ilmastointitekniikan mittaukset. Helsinki. 7s. ISBN 951-22-2421-6.

Rae, Pope. 1984. Low-speed wind tunnel testing. USA. 8s. ISBN 0-471-87402-7.

NASA.n simulaattori 1.4n: <http://www.grc.nasa.gov/WWW/K-12/airplane/foil4.htm>

NASA.n simulaattori 1.5: <http://www.grc.nasa.gov/WWW/K-12/airplane/foil2.html>

NASA 1: <http://www.grc.nasa.gov/WWW/K-12/airplane/presar.html>

NASA 2: <http://www.grc.nasa.gov/WWW/K-12/airplane/airsim.html>

Termiset virtauskoneet: [http://penkki.cc.lut.fi:8900/01\\_040370000/Luentomonisteet/I\\_4.pdf](http://penkki.cc.lut.fi:8900/01_040370000/Luentomonisteet/I_4.pdf)

Scanivalve Oy: [http://www.scanivalve.com/pdf/prod\\_dsa3217\\_18\\_0702.pdf](http://www.scanivalve.com/pdf/prod_dsa3217_18_0702.pdf)

Teknocolor Oy: <http://www.teknocalor.fi/aloitus.htm>

# LIITE 1

## Tuulitunnelin lyhyet käyttöohjeet

Virtausnopeuden säätämiseksi on olemassa kaksi tapaa: puhaltimen siipikulmasäätö tai puhaltimen pyörimisnopeussäätö, joista jälkimmäinen on kätevämpi tapa. Pyörimisnopeussäätöä varten käytetään taajuusmuuttajaa. Savulaite on tuulitunnelin imuaukon takapuolella ja savunjakoharava jossain tunnelin läheisyydessä.

### Tuulitunnelin käynnistys

1. Kytke taajuusmuuttaja seinään suihkumoottorin ohjauspöydän luona (16 A kolmivaiheiliitin, jossa lukee tuulitunneli).
2. Taajuusmuuttaja tuulitunnelin hoitotasossa menee päälle.
3. Varmista, että pyörimisnopeus on myötapäivään (nuoli oikealle näytön oikeassa reunassa)
4. Paina taajuusmuuttaja päälle napista, jossa on ympäröity I-kirjain.
5. Säädä taajuudeksi 30 - 50 Hz.
6. Puhaltimen ulkoluukku voi tässä vaiheessa olla kiinni, jotta käynnistysvirta olisi alhainen.
7. Avaa tuulitunnelin ulkoluukku tai käännä torvi sivuun, jos haluat kierrättää labrailmalla.
8. Tarkista vielä kerran puhaltimen pyörimissuunta !!!

### Tuulitunnelin käyttö

- Virtausnopeutta voi säätää taajuusmuuttajalla (noin 25 - 60 Hz) ja / tai muuttamalla puhaltimen siipikulmaa säätöruuvista. Siipikulman säätö tapahtuu paineilmalla, joten siinä on hieman viivettä. Siipikulmalle on osoitin säätöruuvien vieressä.
- Takavalon kytkin on lampun kyljessä ja etuvalon kytkin tuulitunnelin päällä olevassa sähköboxissa. Valojen suuntaus vaikuttaa huomattavasti savujen näkyvyyteen.
- Mittasiiven kulmaa voi säätää, kun ensin löysätään reilusti kaksi sitä kiinnipitävää sormiruuvia tunnelin takaa. Ruuvit on jälleen kiristettävä, mikäli halutaan tarkkoja mittauksia, sillä muuten tunneliin vuotava ilma häiritsee virtausta.
- Mittatilan lasi voidaan irrottaa helposti nostamalla ensin lasin yläreunassa oleva pidikeleista pois. VARO JÄTTÄMÄSTÄ SORMENJÄLKIÄ LASIIN !!

### Savulaitteen käynnistys

1. Tarkista, että öljyn pinta on mittaviivan tasolla (teksti LEVEL). Öljyä on lisää tunnelin alla olevassa metallikaapissa.
2. Kytke letku savunjakoharavaan ja laita harava tuulitunnelin imuaukkoon, aivan hunajakennon lähelle. Savu osuu hyvin siiven korkeudelle, kun säädät haravan korkeuden merkkiviivan kohdalle. VARO, ETTET VAHINGOITA HUNAJAKENNOA SAVUHARAVALLA !
3. Kytke ENSIN pumppu päälle savulaitteen päällä olevasta kytkimestä.
4. Kytke sitten lämmitin päälle savukoneen etupaneelissa olevasta kytkimestä.
5. Odota 2 - 5 minuuttia, sillä savukoneen tulee aluksi lämmitä.

### Savulaitteen pysäytys

1. Kytke ensin lämmitin pois etupaneelistä.
2. Anna koneen jäähtyä muutama minuutti !! Savun tulon tulee loppua.
3. Kytke lopuksi pumppu pois laitteen päältä.

### Tuulitunnelin pysäytys

1. Sammuta puhallin taajuusmuuttajan käynnistyskytkimestä
2. Sammuta valot
3. Sulje ulkoluukku, jotta labra ei jäähdy ja linnut yms. eivät pääse tunneliin !
4. Käännä torvi puhaltimen päälle, jotta pöly yms. ei pääse tunneliin.
5. Kytke johdot irti.

## LIITE 2

NACA7417  
0.9966369630757429 0.003417412983253598  
0.9853722889079846 0.008373443968594074  
0.9667369455060152 0.016368506476283073  
0.9409447320712508 0.027025090530514717  
0.9083035851505766 0.039851460605859756  
0.8692209296885409 0.054271798580884933  
0.8242071251362725 0.06965719908475876  
0.7738760506001291 0.08535425364971161  
0.7189426543479586 0.10070949047803879  
0.660217848087769 0.11508941650390625  
0.5986012368540812 0.12789784371852875  
0.5350717608820827 0.13859274983406067  
0.47067561637579797 0.14670497179031372  
0.40651021575006097 0.151859849691391  
0.34147073934709826 0.1530018001794815  
0.2787576302781648 0.1489846557378769  
0.21996413349426713 0.1401730328798294  
0.16633368580039168 0.1272144764661789  
0.11895034838698718 0.11097612977027893  
0.0786956750670642 0.09246939420700073  
0.04622770869623399 0.07276026904582977  
0.021981585338359585 0.05287442356348038  
0.006186832721084678 0.03370654582977295  
0.0 0.0  
0.02523000615028399 -0.022926563397049904  
0.04824192877338876 -0.029374925419688225  
0.07746561125990217 -0.03281449154019356  
0.11228733055798822 -0.03360414505004883  
0.15208102419160116 -0.03218408301472664  
0.19624232445091863 -0.02907004952430725  
0.24420907152673643 -0.024843577295541763  
0.29546307815676287 -0.020135721191763878  
0.34951226627795484 -0.015601574443280697  
0.40610846966421477 -0.011875334195792675  
0.4665338640948891 -0.008535319939255714  
0.527718758647231 -0.0053068045526742935  
0.5887800777316439 -0.002487428719177842  
0.6487991462871785 -2.795287291519344E-4  
0.7068366372171145 0.001218315097503364  
0.7619507443788675 0.002005639486014843  
0.8132168646124175 0.00216290564276278  
0.8597476977328709 0.0018271028529852629  
0.9007134092243706 0.0011651072418317199  
0.9353619479726126 3.491797251626849E-4  
0.9630395403822364 -4.6245663543231785E-4  
0.9832108722206467 -0.0011388082057237625  
0.9954777382387349 -0.0015835551312193274  
0.999594395142669 -0.001738306600600481