



LÍKANGERÐ OG VINDGANGA- TILRAUNIR FYRIR VÉLFUGL

Kristján Orri Magnússon og Fannar Andrason

Lokaverkefni í vél- og orkutæknifræði BSc

2011

Höfundar: Kristján Orri Magnússon og Fannar Andrason

Kennitölur: 180682-4739, 310887-2509

Leiðbeinandi: Leifur Þór Leifsson

Tækni- og verkfræðideild

School of Science and Engineering

Tækni- og verkfræðideild

Heiti verkefnis:

Líkangerð og vindgangatilraunir fyrir vélfugl.

Námsbraut:

Vél- og orkutæknifræði BSc

Tegund verkefnis:

Lokaverkefni í vél-og orkutæknifræði BSc

Önn:

7

Námskei

VT-LOK-
1012

Höfundar:

Kristján Orri Magnússon og
Fannar Andrason

Umsjónarkennari:

Indriði Sævar Ríkhartsson

Leiðbeinandi:

Leifur Þór Leifsson

Fyrirtæki/stofnun:

Háskólinn í Reykjavík

Ágrip:

Á rannsóknarstofu fyrir ómönnuð farartæki voru nýverið reist lághraðavindgöng sem nýta á til rannsókna við streymisaðstæður smárra flygilda. Eitt af markmiðum rannsóknarstofunnar er hönnun og smíði á sjálfráðum vélfugli með mikla hreyfigetu sem að nýtir sér vængjaslátt til flugs. Verksvið þessa lokaverkefnis skiptist í eftirfarandi hluta; (1) að þróa og framkvæma aðferðir til að gera aðstöðuna starfhæfa til áðurnefndra tilrauna, (2) framkvæma slíkar tilraunir og bera niðurstöður saman við tölvulíkan, (3) setja fram reiknilíkan byggt á grunnhugtökum í loftaflsfræði sem hagnýtir niðurstöður tilraunanna til ákvörðunar helstu stærða slíks flygildis. Streymi í vindgöngum var kortlagt með mælingum og framkvæmdar voru endurbætur til að bæta gæði streymisins. Umtalsverður árangur náðist og var raunkostnaður aðeins 23% af tilboði sem áður hafði fengist í verkið. Tilraunir voru framkvæmdar á kyrrstæðum og blakandi vængjum sem voru sérsníðaðir í tölvustýrðum frauðplastskei. Út frá niðurstöðum þeirra var sett fram hönnunartilfelli fyrir vélfugl sem byggist á reiknilíkaninu.

Dagsetning:

7.12. 2011

Lykilorð íslensk:

Ómönnuð flugvél, vængsláttur, statískar og dýnamískar tilraunir í vindgöngum, lágar Reynoldstölur.

Lykilorð ensk:

UAV, flapping wing, static and dynamic wind tunnel testing, low Reynolds number.

Dreifing:

opin

☐

lokuð

☐

til:

Formáli.

Haustið 2010 bar Leifur Þór Leifsson, lektor við tækni-og verkfræðideild Háskólans í Reykjavík og umsjónarmaður rannsóknarstofu fyrir ómönnuð farartæki, upp þá hugmynd við nemendur í vél-og orkutækni-fræði að þeir tækju að sér hönnun og smíði lághraðavindganga. Segja má að upphaf þessa verkefnis megi rekja þangað, þar sem að höfundar voru í þeim hópi nemenda sem tóku að sér verkefnið, sem þó fór ekki fram fyrr en um vorið 2011. Til að gera langa sögu stutta þá voru vindgöngin reist á þremur vikum og frummælingar á loftstreymi framkvæmdar. Samhliða því voru höfundar einnig í hópi sem tók að sér að hanna og smíða tölvustýrðan frauðplastslera sem að er ætlaður til útskurðar vængja sem nýta má til tilrauna í vindgöngunum. Í framhaldi af þessum verkefnum höfðu höfundar ekki enn fengið nóg heldur vildu halda áfram og vinna verkefni þar sem tækin skyldu notuð í gagnlegum tilgangi.

Að hanna vélfugl er ekki einfalt verkefni sem leyst verður á einni nóttu, heldur þarf að byggja slíka vinnu á fræðilegum grunni, niðurstöðum tilrauna og heimildum frá öðrum sem hafa unnið að svipuðum verkefnum. Með verkefni þessu telja höfundar að þeir hafi sýnt fram á að vel megi byggja upp nothæfa rannsóknaraðstöðu hér í Háskólanum í Reykjavík og að jafnframt geti rannsóknarstofan í samvinnu við nemendur byggt upp þann gagnagrunn sem nauðsynlegur er til að byggja framtíðarhönnun vélfugls á. Verkefni þetta gekk þó ekki alveg áfallalaust fyrir sig, smíði tilraunabúnaðar og inntaksneti á vindgöngin varð mun tímafrekari en reiknað hafði verið með en þar spilaði inn í að annar höfundar skýrslunnar varð fyrir því óhappi að slasa sig á þeim tíma sem að áætlaður hafði verið í smíðina og varð óvinnufær í tvær vikur af þeim sökum. Þá þurftu höfundar að leggja talsvert mikið á sig til að bæta við sig þekkingu í straumfræði og loftaflsfræði sem ekki er beinn hluti námsefnis í véla-og orkutækni-fræði, en engu að síður nauðsynlegur þáttur til að geta túlkað og sett fram niðurstöður þeirra tilrauna sem framkvæmdar voru.

Höfundar vilja nota tækifærið og þakka Teledyne Gavia Ehf. fyrir lánið á kraftvoginni sem notuð var í tilraununum, Gísli Frey Þorsteinssyni, umsjónarmanni smíðaverkstæðis HR, fyrir góð ráð og ótakmarkað umgengnisleyfi á verkstæðinu og tækni- og verkfræðideild HR fyrir stuðninginn en án hans hefði verið ómögulegt að hrinda í framkvæmd neinu af þeim verkefnum sem talin voru upp hér að ofan. Að lokum vilja höfundar koma sérstökum þökkum til leiðbeinanda okkar, Leifs Þórs Leifssonar, fyrir einstaklega óeigingjarna aðstoð við að skilgreina efnistöð verkefnisins og uppsetningu skýrslunnar.

Reykjavík 7. desember 2011,

Fannar Andrason

Kristján Orri Magnússon

Til elsku Eddu, Mána, Magga og Úlla: Takk fyrir ótakmarkaða þolinmæði, skilning, ást og hlýju. Án ykkar hefði ég ekki náð að klára þetta.

Efnisyfirlit

1	Inngangur.....	6
1.1	Markmið	8
1.2	Yfirlit	8
2	Grunnhugtök í straum-og loftaflsfræði.....	9
2.1	Fjórir kraftar flugs	9
2.2	Ósamþjappanlegt, seigjulaust flæði (e. incompressible, inviscid flow)	10
2.3	Hreyfiprýstingur (e. dynamic pressure).....	10
2.4	Víddargreining – stutt ágríp.....	11
2.5	Vængsnið (e. airfoil).....	12
2.6	NACA fjögurra stafa vængsnið.....	12
2.7	Áfallshorn (e. angle of attack)	16
2.8	Jaðarlag (e. boundary layer)	16
2.9	Ofris (e. stall).....	17
2.10	Áhrif lagstreymins og iðustreymins jaðarlags á viðnámskraft	18
2.11	Vök (e. wake)	18
2.12	Vænghlutfall (e. aspect ratio)	18
2.13	Reynoldstala	19
2.14	Besta svifhorn og svifstuðull	19
2.15	Lyftikraftur og lyftikraftsviðnám út frá skriðþungalögmáli	20
2.16	Viðnámskraftur.....	23
2.17	Um Reynoldstölubilið $3 \times 10^4 - 1 \times 10^5$	24
3	Tilraunaaðstaða	27
3.1	Stærri vindgöng	27
3.2	Smærri vindöng	30
3.3	Frauðplastskeri	31
3.4	Frágangur vængja	35
3.5	Heimasmíðuð kraftvog	37
3.6	ATI – kraftvog.....	44
3.7	Áfallsprýstimælir (e. pitot tube)	46
3.8	Jafnhitavindhraðamælir (e. constant temperature anemometer, CTA).....	47
4	Endurbætur á vindgöngum og kortlagning á streymiseiginleikum	49
4.1	Þekktar aðferðir til lágmörkunar vindflökts	49
4.2	Tækjabúnaður	52

4.3	Kvörðun mælibúnaðar	53
4.4	Jöfnur og úrvinnsla mæligagna	55
4.5	Fyrirkomulag mælinga.	55
4.6	Samanburður vindflötsmerkis.	56
4.7	Val og uppsetning inntaksneta.....	56
4.8	Kostnaður	57
4.9	Niðurstöður.....	58
4.10	Vindflötsmerki í tíma og tíðnirúmi.....	62
4.11	Athugun á áhrifum afstöðu inntaks smærri vindganga miðað við vegg.	64
4.12	Meðalvindhraði sem fall af tíðnibreytitíðni.....	67
5	Líkangerð og vindgangatilraunir fyrir vélfugla	69
5.1	Vélfuglar á flugi í jafnri hæð og á jöfnum hraða.....	69
5.2	Svifhamur	69
5.3	Vængsláttarhamur.....	69
5.4	Áfallshorn og kraftamyndanir stífs vængs í blakhreyfingu.	71
5.5	Reiknilíkan af vélfugli.....	73
5.6	Fastur lóðréttur kraftur í vængsláttarlotu.....	77
5.7	Nauðsyn á gagnagrunni til að líkja eftir streymisskilyrðum.....	78
5.8	Kraftmælingar á kyrrstæðum vængjum.....	79
5.9	Samanburður mælinga við straumfræðilíkanið XFOIL.....	100
5.10	Kraftmælingar á blakandi vængjum	105
5.11	Grunnhönnun vélfugls	116
6	Samantekt helstu niðurstaða.....	123
6.1	Umræða og túlkun	125
6.2	Næstu skref.....	126
7	Heimildaskrá	128
8	Viðaukar	132
8.1	Viðaukaskrá:.....	132

1 Inngangur

Hver hefur ekki staldrað við og horft á með aðdáun þegar ótrúlega vel samhæfður hópur gæsa flýgur yfir með tilheyrandi kvaki og vængsláttarhljóðum og tyllir sér síðan afbragðs lipurlega niður fyrir framan, einn fugl af öðrum eins og flinkustu dansarar? Eða horft á skógarpröst hoppa eins og ekkert sé milli trjágreina, að því er virðist algerlega áreynslulaust, þrátt fyrir óhemju flóknar vængsláttarhreyfingar sem hann framkvæmir til þess? Hvað þá horft á býfluga lyfta sér á milli túnffla og safna hunangsnektar sem vegur það sem nemur heilli líkamsþyngd sinni? Undraverðir eiginleikar fljúgandi dýra í náttúrunni hafa lengi verið mönnum mikið hugðarefni. Þrátt fyrir gríðarlegar framfarir í flugtækni á síðastliðnum 100 árum eigum við mennirnir ennþá langt í land að vera samboðnir náttúrunni í þessum efnum. Því til stuðnings má nefna að ein hraðskreyðasta flugvél sem smíðuð hefur verið, SR - 71 “Blackbird” sem flýgur á þreföldum hljóðhraða, ferðast 32 skrokklengdir á hverri sekúndu meðan að venjuleg dúfa, sem reglulega nær allt að 80 km/klst flughraða ferðast 75 skrokklengdir á sama tímabili. Annað dæmi um yfirburði náttúrunnar er sú staðreynd að ósköp saklaus lítil landsvala (*Hirundo rustica*) nær veltuhraða (e. roll rate) sem nemur allt að 5000 °/s á meðan að orrustuþotan Douglas A-4 “Skyhawk” sem að þykir afar hreyfanleg (e. manouverable) flugvél nær í besta falli 720 °/s (Shyy, Yongsheng, Jian, Viieru, & Liu, 2008). Svona mætti lengi telja. Í sögulegu samhengi beindust fyrstu kenningar og tilraunir manna í flugtækni að því að líkja eftir flugi í náttúrunni, með oft á tíðum hörmulegum afleiðingum. Það var ekki fyrr en árið 1799 að sir George Cayley kynnti sögunnar möguleikann á því að hanna loftfar sem hefði fasta, óhreyfanlega vængi með óháðu aflkerfi (e. propulsion system), að raunverulegar framfarir fóru að eiga sér stað. Samhliða því færðist áhugi á flugi með vængsláttarhreyfingum út á jaðar þessarar nýju fræðigreinar og hefur lítið verið sinnt, með nokkrum undantekningum þó, allt þar til fyrir skemmstu. Þó nokkur vakning hefur orðið í rannsóknum á þessu sviði undanfarið samhliða þeirri geysilega öru þróun í rafeindatækni sem orðið hefur á síðastliðnum 20 árum, sem hefur skyndilega opnað möguleikann á því að þróa lítil, ómönnuð og jafnvel alsjálfráð (e. fully automatic) loftför (Mueller, 2001).

Háskólinn í Reykjavík hefur ekki látið sitt eftir liggja í þessum efnum, en við skólann er starfandi rannsóknarstofa fyrir ómönnuð farartæki.¹ Eitt af viðfangsefnum rannsóknarstofunnar er þróun sjálfráðs vélfugls sem nýtir vængsláttarhreyfingar til flugsins. Er stefnan sú að gæða fuglinn þeim eiginleikum að ráða yfir hreyfanlegum vængjum sem hafa óháð aflkerfi og því möguleika á miklum hreyfanleika og flughæfni (Leifur Þór Leifsson, 2011).



Mynd 1: Ótrúleg mynd af gæs lækka flugið með því að fljúga á hvolfi.
(Mynd: Brian MacFarlane, 2009)



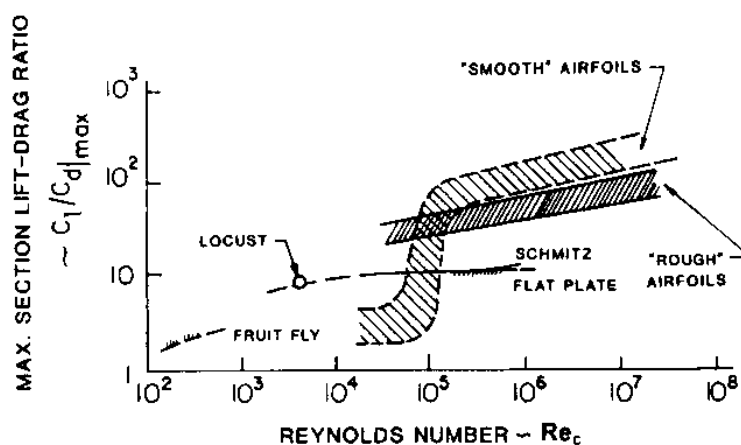
Mynd 2: Dúfa með útbreidda vængi.
(Mynd: wikipedia.com)

¹<http://luv.ru.is>

Til þess að slíkt flygildi geti orðið að veruleika er nauðsynlegt að byrja á því að þróa og framkvæma tilraunir þar sem líkt er eftir streymisaðstæðum þess, en með lækkandi flughraða og minnkandi vængflatarmáli lækkar hlutfall seigjukrafta á móti tregðukröftum (Reynoldstala) loftstreymis. Þegar sú tala er orðin það lág að hún fellur niður fyrir ákveðið gildi breytast forsendur vængjahönnunar til muna, þar sem að ýmis áhrif sem þekkjast ekki í streymisskilyrðum stærri loftfara fara að koma fram. Mynd 3 sýnir hvernig hlutfall lyftikrafts á móti viðnámskrafti fyrir mismunandi vængsnið þróast með breytingu í Reynoldstölu.

Í þeim tilgangi að skapa umgjörð til að hefja slíkar rannsóknir voru sérstök lághraðavindgöng (e. low speed wind tunnel) hönnuð og smíðuð á vorönn 2011 af nemendum í vél-og orkutækniþráði og voru höfundar þessarar skýrslu þar meðtaldir. Almennt, til þess að geta gert marktækar tilraunir í vindgöngum þurfa eiginleikar loftstreymisins í þeim að vera vel þekktir og lágmarka þarf vindflökt á mælisvæðinu. Til þess þurfa að koma til mælingar, eða nokkurs konar kortlagning á meðalhraða og staðalfráviki straumhraðans. Út frá slíkum mælingum er svo hægt að meta hvort að nauðsynlegt sé að grípa til sérstakra aðgerða til þess að lágmarka hið óaskilega vindflökt, en þó nokkrar aðferðir til þess eru vel þekktar. Fleiri atriði þurfa einnig nauðsynlega að koma til í þeim tilgangi að framkvæma tilraunir líkar þeim sem er lýst hér að ofan. Þar má fyrst nefna viðfangsefnið sjálft, þ.e. vængina, en það segir sig sjálft að þróa þarf aðferð til að smíða vængi í þessum stærðarflokki á fljótlegan og skilvirkan hátt ef að bera á saman mismunandi lögun margra vængja við mismunandi skilyrði. Í því skyni voru höfundar skýrslu þessarar hluti af hóp sem á vorönn og yfir sumarið 2011 hönnuðu og smíðuðu tölvustýrðan frauðplastslera (e. foam cutter) fyrir rannsóknarstofuna, sem sérstaklega er ætlaður til útskurðar vængja. Þá er ekki síst nauðsynlegt að huga að mælitækjum, en til að mæla margvíða smáa krafta sem myndast frá litlum vængjum við lághraðaskilyrði þarf svokallaða kraftvog (e. force balance) sem skrásetur mælda krafta í að minnsta kosti tveimur víddum af ásættanlegri nákvæmni. Að lokum þarf svo að tvinna saman alla ofantalda þætti í útfærslu tilraunarinnar sjálfrar en alls ekki er sjálfgefið að slík uppsetning sé einföld.

Hvernig notfæra á sér niðurstöður tilraunanna er svo annað mál, en nokkur grunnhugtök í straum- og loftaflsfræði (e. aerodynamics) lýsa því ágætlega hvernig kraftar sem koma til vegna víxlverkunar kvikefnis (e. fluid) við fast yfirborð myndast og við hverju má búast fyrir mismunandi tilfelli. Þannig má, fyrir gefnar streymisaðstæður, byggja reiknilíkön sem innihalda fyrirfram skilgreinda hreyfilýsingu fyrir vængsláttarhreyfingu á áður nefndum grunnhugtökum og tengja þau síðan við niðurstöður tilrauna sem framkvæmdar eru við þær streymisaðstæður sem líkaninu er ætlað að endurspeglar. Inn í slíkum reiknilíkönunum eru þó í öllum tilfellum innifaldar einhverjar nálganir og því nauðsynlegt að kanna samsvörun þeirra við raunveruleikann með samanburði við raunmælingar.



Mynd 3: Skyndileg dýfa í hlutfalli lyfti og viðnámskrafts á sér stað þegar Reynoldstalan er komin niður fyrir um það bil 3×10^5 .

1.1 Markmið

Við upphaf verkefnisins voru vindgöngin, frauðplastskerinn og kraftvogin tilbúin til notkunar, þó að ekki hafi verið komin reynsla á notkun þessara verkfæra. Stór hluti verkefnisins fólst því í að gera lagfæringar og koma þeim í starfhæft ástand, auk þess að koma með tillögur að endurbótum. Í eftirfarandi upptalningu er markmiðum verkefnisins í heild lýst:

- Meta gæði loftstreymis í vindgöngum og framkvæma raunhæfar aðgerðir til leiðréttingar,
- Gera frauðplastskeira starfhæfan til útskurðar smárra vængja sem nýta má til tilrauna,
- Leita að heppilegri aðferð til að fullklára frauðplastvængi og koma upp safni vængja sem nýta má til tilrauna,
- Gera kraftvog starfhæfa eða leita annara lausna við kraftmælingar,
- Setja fram einfaldað reiknilíkan af vélfugli byggt á grunnhugtökum í straum- og loftaflsfræði,
- Hanna, smíða og framkvæma tilraun á kyrrstæðum vængjum og setja fram niðurstöður sem verða fyrsta skrefið í átt þess að koma upp heilstæðum gagnagrunni fyrir streymisaðstæður slíkra flygilda,
- Hanna, smíða og framkvæma tilraun á stífum vængjum sem hreyfast með einfaldri blakhreyfingu hornrétt á loftstreymi og setja fram niðurstöður á skynsamlegan hátt,
- Kanna samsvörun reiknilíkans við niðurstöður blaktílaunar,
- Setja fram grunnhönnun vélfugls sem byggist á reiknilíkani og áætla helstu stærðir slíks flygildis.

Þá er verkefni þessu ekki síst ætlað að vera nokkurs konar frumkvöðull í því starfi sem vinna þarf til að áður nefndur vélfugl geti orðið að veruleika. Það er von höfunda að það starf sem unnið verður í rannsóknarstofu um ómönnuð farartæki í framtíðinni verði að einhverju leyti byggt á þeim lausnum sem þróaðar voru sem hluti af verkefni þessu.

1.2 Yfirlit

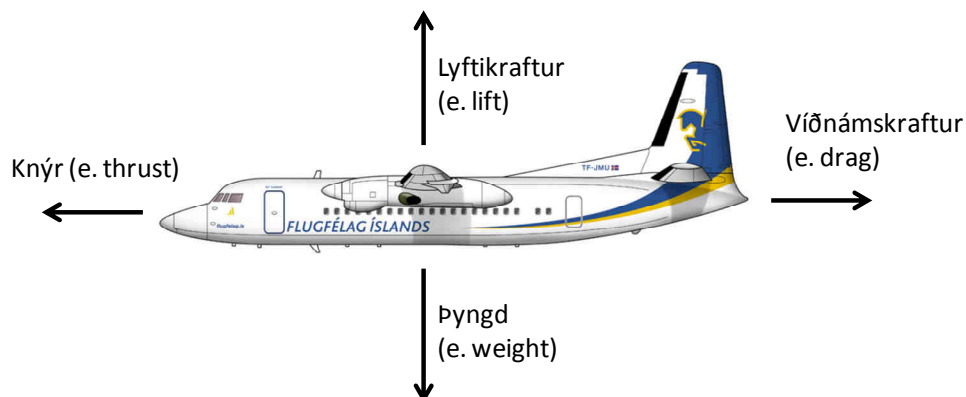
Meginmáli skýrslu þessarar er skipt í fjóra kafla. Í kafla 2 eru dregin saman helstu grunnhugtök úr straum- og loftaflsfræði sem að hagnýtt eru við gerð reiknilíkans vélfugls og framsetningu og túlkun niðurstaðna úr þeim tilraunum sem framkvæmdar voru. Í kafla 3 er aðstöðunni lýst og þær mælingar og endurbætur sem framkvæmdar voru sem hluti af verkefninu lýst sérstaklega, ef undan eru skyldar mælingar og endurbætur á vindgöngunum en þeim eru gerð skil sérstaklega í kafla 4. Kafli 5 er tileinkaður grunnhugmyndum um hönnun vélfugla. Fyrst er rætt almennt um flug með vængsláttarhreyfingum og hugmyndirnar settar í tæknilegt samhengi. Á grundvelli þeirrar umræðu er svo sett fram einfaldað reiknilíkan af vélfugli, þá er framkvæmd og niðurstöðum tilrauna sem framkvæmdar voru lýst, þar með talinn samanburður sem gerður var milli tilraunaniðurstaðna og vænghermiforrítsins XFOIL. Í lokin er svo sett fram grunnhönnun vélfugls, sem byggir alfarið á áður nefndu reiknilíkani og niðurstöðum þeirra tilrauna sem framkvæmdar voru. Innifelur sú grunnhönnun í sér áætlun helstu grunnstærða slíks flygildis, svo sem hönnunarþyngd, stærðir vængja, áætlaða aflþörf og svo framvegis. Í lok kaflans er svo umræða um þær ályktanir sem má draga af niðurstöðum hönnunartilfellisins. Í lokakafla skýrslunnar eru svo helstu atriði verkefnisins dregin saman og tillögur um næstu skref í þróun aðstöðunnar og vélfuglsins settar fram.

2 Grunnhugtök í straum-og loftaflsfræði

Í þessum kafla verður stuttlega farið í gegnum helstu grunnatriði straum- og loftaflsfræðinnar (e. Aerodynamics) sem snúa beint að þeim viðfangsefnum sem við fengumst við sem hluta af verkefni þessu. Þar sem að þessi atriði hafa mörg hver litla sem enga skírskotun í það námsefni sem að farið er í gegnum í tæknifræðináminu þótti okkur sérstök ástæða til að draga þau út og setja fram í sérstökum kafla. Við samsetningu þessa kafla var að mestu leyti stuðst við bókina *Fundamentals of Flight* (Shevell, 1989) sem er afar aðgengileg fyrir tæknimenntað fólk sem vill kynna sér helstu hugtök loftaflsfræðinnar. Einnig var byggt á öðrum bókum svo sem *Aerodynamics for Engineering Students* (Houghton & Carpenter, 2003), en hún er ögn þyngri og hentar því betur fyrir lengra komna. Þá kom bókin *Aerodynamics for Airline Pilots* (Tervning, 1991) að góðum notum, en hún er eins og nafnið ber með sér skrifuð fyrir flugmenn, sem í flestum tilfellum hafa lítinn sem engann bakgrunn úr verkfræði eða öðrum fræðilegum tæknigreinum. Sú bók er því afar nýtileg að því leyti að hugtök eru ítarlega útskýrð þar án þess að mjög djúpt sé kafað í fræðin á bak við. Útkoman er, eins og áður sagði, kafla þar sem reynt að útskýra í eins stuttu máli og mögulegt er þau atriði sem við töldum mikilvæg fyrir áhugsama lesendur að kynna sér áður en lengra er haldið við lestur skýrslunnar. Reynt var að byggja kaflann þannig upp að hvert atriði sem til skoðunar er sé byggt á atriði eða atriðum sem að koma fram á undan í textanum. Þannig er það von höfunda að hver undirkafla svari fleiri spurningum en þeim sem þeir kunna að vekja.

2.1 Fjórir kraftar flugs

Flæði kvikefnis (lofts eða vökva) yfir hlut verkar á hann með yfirborðskrafti (e. surface force). Sá hluti þess krafts sem er hornréttur á straumstefnu nefnist lyftikraftur (e. lift force), en sá kraftur sem verkar samsíða straumstefnunni nefnist viðnámskraftur (e. drag force). Knýr (e. thrust) er sá kraftur kallaður sem verkar á móti straumstefnu. Flugvél á flugi í stöðugu ástandi, í jafnri hæð og á jöfnum hraða er í kraftajafnvægi þ.a. lyftikraftur er jafn þyngdarkrafti og knýr er jafn viðnámskrafti (Tervning, 1991).



Mynd 4: Fjórir kraftar flugs í stöðugu ástandi sýndir á flugvél sem annar höfunda skýrslunnar kannast ágætlega við¹.

¹ Mynd: <http://www.lph2o.com/Airline-Paint-Scheme/Airline-Scheme/Page-4-21.html> (6/12/2011)

2.2 Ósamþjappanlegt, seigjulaust flæði (e. incompressible, inviscid flow)

Loftaflfræðilegum kröftum sem verka á hlut í loftstreymi má skipta upp í skerkræfta sem að verka samsíða straumstefnu og þrýstikrafta sem verka á hlutinn hornrétt á straumstefnu. Skerkræftar (e. shear forces) verka einungis vegna seigju loftsins, en þrýstikraftar verða til vegna breytinga í þrýstingi sem myndast þegar að loftstreymið ferðast framhjá hlut sem staðsettur er í flæðinu. Áhrif seigju eru gríðarlega mikilvægur eiginleiki í loftaflfræði en þar sem áhrifa hennar gætir aðeins á afmörkuðu svæði næst hlutum sem staðsettur er í streyminu, í svokölluðu jaðarlagi (e. boundary layer), er til einföldunar hægt að líta á flæði alls staðar annars staðar sem seigjulaust. Fyrir streymishraða lægri en um það bil 40% af hljóðhraða má sleppa samþjöppunareiginleikum lofts (Shevell, 1989). Jafna Bernoullis lýsir ástandi lofts í ósamþjappanlegu, seigjulausu flæði og er geysilega öflugt verkfæri þrátt fyrir tiltölulega einfalda framsetningu. Annað verkfæri sem einnig er mjög nothæft er lögmálið um massavarðveislu þar sem, fyrir ósamþjappanlegt flæði, massi sem að fer inn í kerfi verður að vera jafn massanum sem að yfirgefur kerfið á öllum tímapunktum.

2.3 Hreyfiþrýstingur (e. dynamic pressure)

Jafna Bernoullis gerir ráð fyrir að orkuástandi lofts megi skipta í tvennt, stöðuorku annars vegar og hreyfiorku hins vegar. Jafnframt segir lögmálið að fyrir stöðugt flæðisástand í föstu rúmmáli sé orkuástand alls staðar fasti og megi skipta upp í stöðuþrýsting (e. static pressure) og hreyfiþrýsting þannig að þegar annað lækkar, hækkar hitt á móti samkvæmt:

$$p_s + \frac{1}{2}\rho v^2 = p_0$$

Þar sem að p_s er stöðuþrýstingur, ρ er eðlismassi, v er streymishraði og p_0 er heildarþrýstingur (e. total pressure) sem er fasti fyrir áður nefndar forsendur. Hinn þáttur jöfnunnar, þ.e. sá sem að er háður streymishraða túlkum við sem hreyfiþrýsting og táknum með bókstafnum q . Sem dæmi um hagnýtingu þessa lögmáls má nefna áfallsþrýstimæla (e. pitot tubes), sem verða mælikvarðar á streymishraða með því að gera ráð fyrir að þrýstingurinn sem að mælist í þrýstinemanum sem snýr upp í vindstefnu sé heildarþrýstingur, þrýstingurinn sem mælist í þrýstinemanum sem er staðsettur hornrétt á straumstefnu jafngildi stöðuþrýsting og mismunarþrýstingur milli þeirra jafngildi hreyfiþrýsting sem á einfaldan hátt má tengja við vindhraða samkvæmt ofangreindri jöfnu. Einnig gefur jafnan okkur tilfinningu fyrir því sem að gerist þegar að loft flæðir yfir yfirborð sem hefur ósamhverfa lögun, þ.e. þrýstikraftur eða yfirborðskraftur skapast með mismun í stöðuþrýsting sitt hvorum megin við yfirborðið. Eigindleg gildi krafta fást þó ekki með svo einföldum hætti, þar sem að myndun slíkra krafta hlýtur á einhvern hátt að vera háð lögun ósamhverfa yfirborðsins auk eiginleika loftsins.

2.4 Viddargreining – stutt ágríp

Ætla má að myndun yfirborðskrafts vegna víxlverkunar (e. reaction) fasts yfirborðs við ósamþjappanlegt loft á hreyfingu sé háð eftirfarandi eiginleikum yfirborðsins og loftsins:

$$F = F(\rho, \mu, v, l, c)$$

þar sem μ táknar seigju loftsins, l táknar einkennisstærð (e. characteristic length) yfirborðsins og c er einingalaus stærð sem að tekur tillit til lögunar yfirborðsins. Viddargreining (e. dimensional analysis) fer þannig fram að þeim þáttum sem að gert er ráð fyrir að leggi sitt af mörkum til myndunar annarar ákveðinnar stærðar er raðað upp með mismunandi vægi sem, þegar hér er komið við sögu, er enn óþekkt. Þannig má halda áfram og segja að fyrir myndun yfirborðskraftsins hljóti eftirfarandi runa að gilda:

$$F = \sum_i c_i \rho^a \mu^b v^c l^d$$

þar sem að $a...d$ eru hvaða rauntölur sem er. Ein af grunnforsendum viddargreiningar er sú að algebrísk framsetning efnislegra stærða geti aðeins haft þýðingu ef að efniseiginleikar eru settir fram með sömu grunnkennistærðum (Shevell, 1989). Þannig eru allir eiginleikar í aflfræði skilgreindir út frá massa (M), lengd (L), og tíma (T). Við getum því haldið áfram, út frá einingum þeirra eiginleika sem við ákváðum að leggi sitt af mörkum til myndunar yfirborðskraftsins F og sagt:

$$\frac{M \cdot L}{T^2} = \sum_i c_i \cdot \frac{M^a}{L^{3a}} \cdot \frac{M^b}{L^b T^b} \cdot \frac{L^c}{T^c} \cdot L^d$$

Einföldun gefur:

$$\frac{M \cdot L}{T^2} = \sum_i c_i \cdot \frac{M^{a+b} \cdot L^{c+d-3a-b}}{T^{b+c}}$$

Fyrir veldisvísana fæst eftirfarandi jöfnuhneppi þriggja jafna með fjórum óþekktum stærðum:

$$1) a + b = 1; 2) c + d - 3a = 1; 3) b + c = 2$$

Með breytuskiptum getum við nú lýst grunnjöfnunni á eftirfarandi hátt:

$$F = \sum_i c_i \rho^{1-b} \mu^b v^{2-b} l^{2-b}$$

Og endurskrifað:

$$F = \rho v^2 l^2 \cdot \sum_i c_i \cdot \left(\frac{\mu}{\rho v l} \right)^{b_i}$$

Þar sem að l^2 táknar einkennisflatarmál (e. characteristic area) og $\left(\frac{\mu}{\rho v l} \right)^{-1}$ er svokölluð Reynoldstala.

Nú kemur skýrt í ljós hvernig yfirborðskrafturinn F er háður hreyfiþrýstingi q og stærðar einkennisflatar þess yfirborðs sem staðsett er í loftstreymi. Í klassískri loftaflfræði er ofanvarpsflatarmál vængs (S) tekið sem einkennisflatarmál fyrir myndun yfirborðskraftsins. Tilraunir, þar sem Reynoldstölu og lögun yfirborðs er haldið föstu hafa jafnframt leitt í ljós að líta má á síðasta þátt jöfnunnar sem fasta í þeim tilfellum. Við skilgreinum því kraftstuðulinn c_F sem:

$$c_F \equiv 2 \cdot \sum_i c_i \cdot \left(\frac{1}{Re}\right)^{b_i}$$

Þar sem að fastinn 2 er hafður með til að fá rétta skilgreiningu á hreyfiþrýsting í fyrra hluta grunnjöfnunnar. Þannig fæst tenging hreyfiþrýstings við myndun yfirborðskrafta á yfirborðum af ákveðinni stærð samkvæmt:

$$F = q \cdot S \cdot c_F$$

Mikilvægt er að gera sér grein fyrir því að stuðullinn c_F inniheldur ekki aðeins upplýsingar um lögun yfirborðs og Reynoldstölu heldur einnig upplýsingar um stöðu yfirborðsins, þ.e. hvernig það snýr miðað við straumstefnu.

2.5 Vængsnið (e. airfoil)

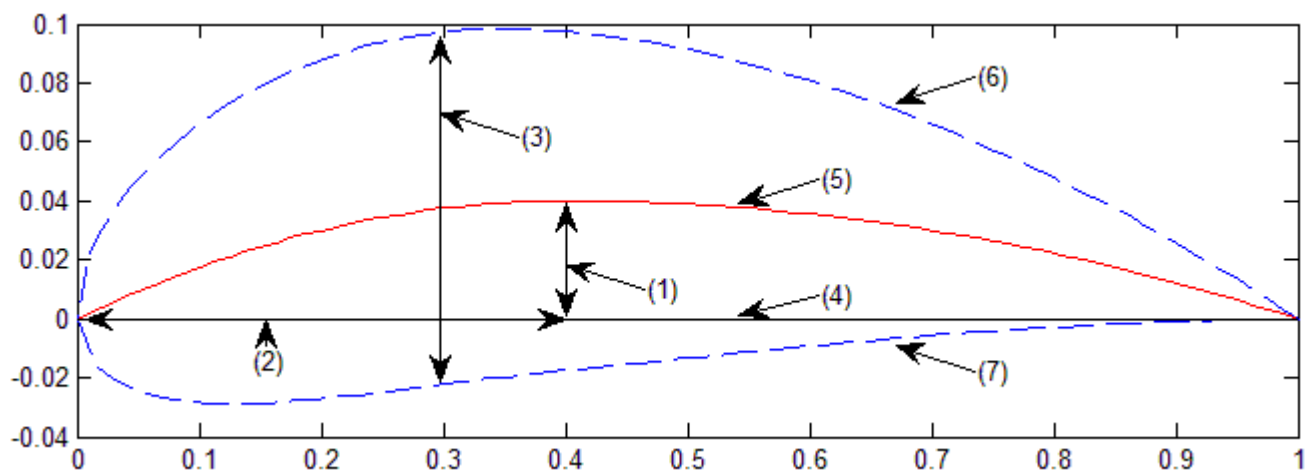
Vængsnið er skilgreint sem hver sú lögun þversniðs vængja eða annara yfirborða sem nýta sér víxlverkun streymisáhrifa við yfirborð til myndunar yfirborðskrafta. Samkvæmt hefðbundinni flokkun er lögun vængsniða skilgreind út frá vænglínu (e. chord line), meðallínu (e. mean line), þykkt (e. thickness) og radíus frambrúar (e. leading edge radius). Notkunarvið vængsniða er ekki bundið við flugvélavængi, heldur má jafnframt finna vængsnið í ýmsum tækjum, s.s. vindhverflum, gashverlum og öðrum straumvélum. Nánari umfjöllun um vængsnið er að finna í næsta kafla

2.6 NACA fjögurra stafa vængsnið

Ákveðið var að þær tilraunir sem framkvæmdar yrðu sem hluti af verkefni þessu skyldu gerðar á vængjum sem útbúnir væru úr svokölluðum fjögurra stafa NACA vængsniðum. Sá flokkur vængsniða var upphaflega þróaður af hinni nú aflögðu bandarísku alsríkisstofnun NACA (National Advisory Committee for Aeronautics) sem síðar varð hluti af bandarísku geimferðastofnuninni NASA. Á vegum þeirrar stofnunar var gefin út skýrsla sem nú er talin hafa markað þáttaskil í rannsóknum á vængsniðum og nefnist á frummálinu *The Characteristics of 78 Related Airfoil Sections*. (Jacobs, Ward, & Pinkerton, 1933). Þar settu þeir fram áður óþekkt hugmynd um flokkun vængsniða samkvæmt þremur breytum, þykkt (e. thickness), bungu (e. camber) og staðsetningu bungu á vængsniði (e. camber location) til þess að auðvelda flugvélahönnuðum val vængsniða fyrir viðeigandi notkunarskilyrði. Þar að auki gerðu þeir rannsóknir sínar í yfirþrýstum vindgöngum til þess að ná fram þeim Reynoldstölum sem tilheyra flugvélavæng í fullri stærð, en áður höfðu flestar rannsóknir á vængsniðum verið framkvæmdar á lægri Reynoldstölum. Flokkunarkerfið byggist þannig upp að fyrsti stafur rununnar (kallast hér eftir m) táknar bungu, þ.e. hversu mikið meðallína vængsniðsins (e. mean line) nær upp fyrir vænglínu (e. chord line) þar sem sú vegalengd, hornrétt á vænglínu, er mest. Því næst kemur einn stafur sem táknar staðsetningu hámarks lengdar bungulínu á vænglínu (hér eftir kallaður p) og að lokum koma tveir stafir sem tákna hámarksþykkt vængsniðsins (hér eftir t). Fyrsti stafurinn auk síðustu tveggja eru hlutföll af lengd vænglínu, sem við köllum hér eftir c , í

hundraðshlutum en annar stafurinn táknar hlutfall af sömu lengd í tíunduhlutum. Sem dæmi getum við tekið vængsniðið NACA4412, þar er hámarksfjarlægð meðallínu frá vænglínu $m = 0,04c$, staðsetning þeirrar hámarksfjarlægðar er $p = 0,4c$ frá upphafspunkti og hámarksþykkt vængsniðsins er $t = 0,12c$. Eitt eiga öll NACA fjögurra stafa vængsnið sameiginlegt, þ.e. að staðsetningu hámarksþykktar er alltaf að finna í vegalengdinni $0,3c$ frá upphafspunkti. Mynd 5 sýnir vængsniðið NACA4412 þar sem helstu kennistærðir eru merktar inn með tölustöfum. Viðeigandi kennistærðir eru útskýrðar í eftirfarandi upptalningu, þar sem að hver tölustafur upptalningar á við hvern tölustaf á myndinni:

- 1) Hámarksfjarlægð meðallínu frá vænglínu, hornrétt á vænglínu (fyrsti stafurinn í rununni, táknar bingu vængsniðsins, m).
- 2) Fjarlægð frá upphafspunkti að bingu, samsíða vænglínu (annar stafur rununnar, p).
- 3) Hámarks lóðrétt vegalengd, hornrétt á vænglínu sem er að finna innan í vængsniðinu (þriðji og fjórði stafur rununnar, t).
- 4) Vænglína, bein lína sem dregin er frá fremsta punkti vængsniðs (e. leading edge) að þeim aftasta (e. trailing edge).
- 5) Meðallína, hornrétt frá vænglínu séð er í öllum láréttum vegalengdum frá upphafspunkti jöfn lóðrétt vegalengd frá meðallínu að efri og neðri yfirborðslínu vængsniðs.
- 6) Efri yfirborðslína vængsniðs.
- 7) Neðri yfirborðslína vængsniðs.



Mynd 5: NACA4412 vængsnið.

Í áðurnefndri skýrslu er einnig að finna tæmandi útskýringu á því hvernig jöfnur fyrir efri og neðri yfirborðslínu eru leiddar út, en þeim er lýst með fjórðu gráðu margliðu. Fyrir eftirfarandi jaðarskilyrði fyrir lögun efri og neðri yfirborðslínu samhverfs vængsniðs,

- 1) Hámarkslóðhnit og fyrsta afleiða í þeim punkti:

$$x/c = 0,3 \rightarrow y/c = \frac{t}{2}, \quad \frac{dy}{dx} = 0$$

- 2) Lóðhnit og fyrsta afleiða við afturbrún:

$$x/c = 1 \rightarrow y/c = 0,002, \quad \frac{dy}{dx} = -0,234$$

- 3) Lögun frambrúnar:

$$x/c = 0,1 \rightarrow y/c = 0,078$$

fæst eftirfarandi jafna :

$$\pm y(x) = \frac{t \cdot c}{0.2} \left(0,2969x^{\frac{1}{2}} - 0,126x - 0,3516x^2 + 0,2843x^3 - 0,1015x^4 \right) \quad (1)$$

Þar sem að (1) lýsir samhverfu vængsniði fylgir meðallína vænglínu. Fyrir skilgreinda bingu er svo leidd út annarar gráðu margliða sem lýsir lóðrétta fráhvarfi meðallínunnar frá vænglínu (y_c) sem fall af láréttri vegalengd frá upphafspunkti út frá eftirfarandi jaðarskilyrðum:

- 1) Fram-og afturendi meðallínu:

$$x/c = 0 \text{ og } x/c = 1 \rightarrow y_c/c = 0$$

- 2) Mesta lóðrétta fráhvarf meðallínu frá vænglínu og afleiða í þeim punkti:

$$x/c = p/c \rightarrow y_c/c = m/c, \quad \frac{dy_c}{dx} = 0$$

Út frá þessum skilyrðum fást tvær margliðujöfnur:

- 1) Fyrir lárétta vegalengd frá upphafspunkti $x \leq p$:

$$y_c(x) = \frac{m \cdot c}{p^2} (2px - x^2) \quad (2)$$

- 2) Fyrir lárétta vegalengd frá upphafspunkti $x > p$:

$$y_c(x) = \frac{m \cdot c}{(1-p)^2} \cdot [(1-2p) + 2px - x^2] \quad (3)$$

Lóðhnit og láhnit efra og neðra yfirborðs vængsniðs eru svo skilgreind með samtengingu jöfnu 1 við jöfnur 2 og 3 skv:

$$x_u = x - y \cdot \sin(\theta)$$

$$y_u = y_c + y \cdot \cos(\theta)$$

$$x_l = x + y \cdot \sin(\theta)$$

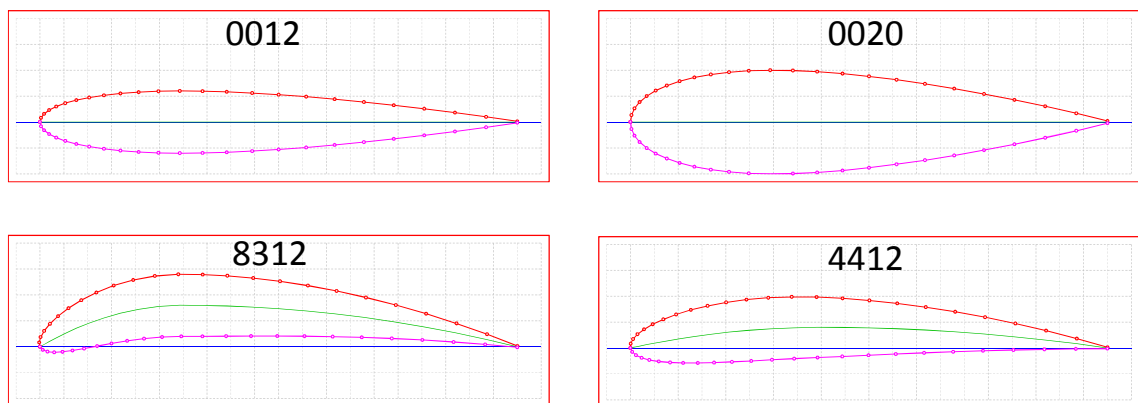
$$y_l = y_c - y \cdot \cos(\theta)$$

Þar sem:

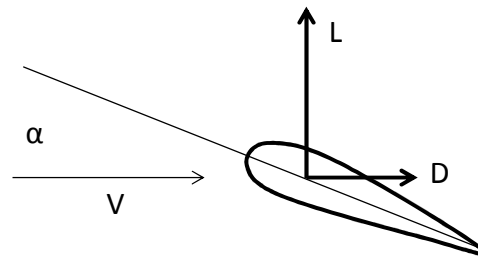
$$\theta = \tan^{-1}(dy_c/dx)$$

Með öðrum orðum, lóð-og láhnit efra og neðra yfirborðs eru skilgreind út frá hornréttu vegalengdinni $y(x)$ frá meðallínu fyrir allar láréttar vegalengdir frá upphafspunkti. Fleiri dæmi um mismunandi lögun NACA fjögurra stafa vængsniða er að finna á mynd 6. Val okkar á nýtingu NACA fjögurra stafa vængsniða í tilraunum byggðist á eftirfarandi þáttum:

- 1) NACA vængsniða serían er langmest rannsakaða og skrásetta fjölskylda vængsniða sem fyrirfinnst.
- 2) Fjögurra stafa fjölskyldan þykir henta einkar vel fyrir beitingu í lághraðaskilyrðum og gefur góða ofriseiginleika, þ.e. önnur afleiða lyftikraftsstuðuls sem fall af áfallshorni verður tiltölulega lág, neikvæð tala.
- 3) Á mjög einfaldan hátt er hægt að skilgreina vængsnið með öllum helstu breytum sem einkenna lághraða vængsnið, þ.e. þykkt, bungu og staðsetningu hennar.



Mynd 6: Dæmi um lögun nokkura NACA fjögurra stafa vængsniða.



Mynd 7: Áfallhorn (α) er hornið milli vænglínu og straumstefnu (v). Lyftikraftur (L) er sá þáttur yfirborðskraftsins sem myndast hornrétt á straumstefnu og viðnámskraftur (D) er sá þáttur sem myndast samsíða straumstefnu.

2.7 Áfallshorn (e. angle of attack)

Það horn sem myndast milli vænglínu vængsniðs og straumstefnu loftstreymis (Shevell, 1989). Í skýrslu þessari er áfallshorni lýst með bókstafnum α , sjá mynd 7.

2.8 Jaðarlag (e. boundary layer)

Jaðarlag er skilgreint sem tiltölulega þunnt lag kvikefnis þar sem hraðalækkun á sér stað vegna núnings kvikefnisins við fast yfirborð (Charmichael, 1982). Fyrirbærið myndast vegna áhrifa seigju þannig að það lag kvikefnis sem liggur upp að yfirborði er kyrrstætt en hraði kvikefnislaga fer vaxandi frá yfirborði þar til að það hefur á endanum náð hraða lofstreymisins. Hentugt er að miða við að þykkt jaðarlags nái að því hraðalagi þar sem að streymishraðinn hefur náð 99% af hraða lofstreymisins. Seigjugildið segir til um á hversu langri vegalengd frá yfirborði (δ) slík hröðun á sér stað. Rannsóknir hafa leitt í ljós að til eru tvær gerðir jaðarlaga, lagstreymið jaðarlag og iðustreymið jaðarlag. Munurinn felst í því að í lagstreymnu jaðarlagi á engin víxlverkun í skriðþunga milli hraðalaga sér stað, en í iðustreymnu jaðarlagi er slík víxlverkun til staðar (Charmichael, 1982). Mynd 8 sýnir áhrif þeirrar víxlverkunar á hraðaprófila í sitt hvorri tegund jaðarlags. Í öllum tilfellum vex þykkt jaðarlagsins með aukinni fjarlægð frá frambrún fasta yfirborðsins. Áhrif straumhraða eru þau að þegar hann eykst minnkar þykkt jaðarlagsins. Vaxtarhraðinn er einnig háður því hvort að um lagstreymið eða iðustreymið jaðarlag er að ræða. Fyrir loftstreymi yfir slétt yfirborð eru til nálgunarjöfnur fyrir þykkt jaðarlags sem fall af staðsetningu frá frambrún:

Fyrir lagstreymið jaðarlag¹:

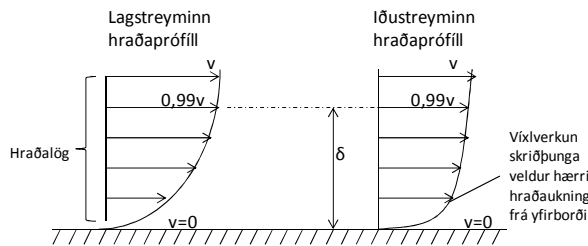
$$\delta(x) = 5 \cdot \left(\frac{\mu \cdot x}{\rho \cdot v} \right)^{1/2}$$

Fyrir iðustreymið jaðarlag¹:

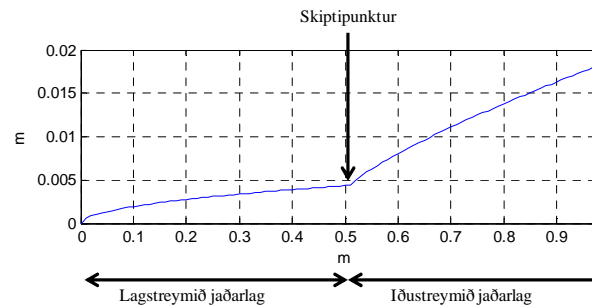
$$\delta(x) = 0,37 \cdot \left(\frac{\mu}{\rho \cdot v} \right)^{1/5} \cdot x^{4/5}$$

Þar sem að μ táknar seigju [m/kg·s], ρ táknar eðlisrúmmál [kg/m³], v táknar streymishraða [m/s] og x táknar fjarlægð frá frambrún plötu [m]. Fyrir lág gildi x verður jaðarlagið lagstreymið en á einhverjum punkti x umbreytist það yfir í iðustreymið. Sá punktur kallast skiptipunktur (e. transition point). Mynd 9 sýnir hvernig þykkt jaðarlags þróast með aukinni vegalengd frá frambrún sléttar plötu. Forsendur eru $v = 10$ m/s og seigju- og eðlismassaeiginleikar lofts við 20°C. Skiptipunktur er settur inn í $x=0,5$ m.

¹ (Incropera, DeWitt, Bergman, & Lavine, 2007)



Mynd 8: Hraðaprófílar.



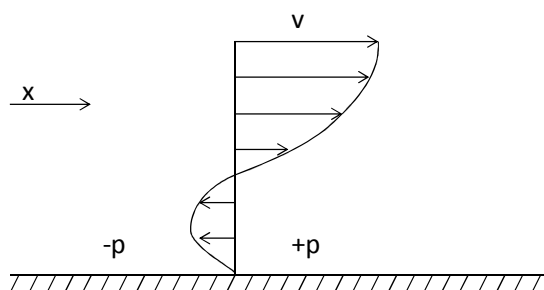
Mynd 9: Þróun þykktar jaðarlags.

2.9 Ofris (e. stall)

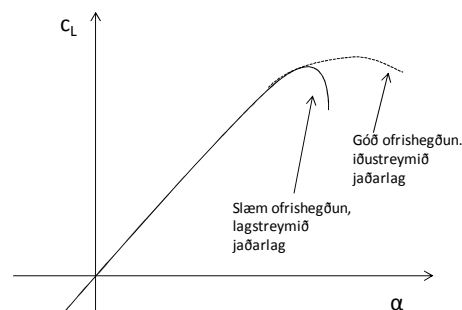
Ef að áfallshorn er nægilega hátt tekur svokallaður neikvæður þrýstistigull (e. adverse pressure gradient) að myndast, þ.e. aukning í stöðuprýstingi í átt straumstefnu (Shevell, 1989). Ef við skilgreinum átt straumstefnu sem x getum við skilgreint neikvæðan þrýstistigull sem:

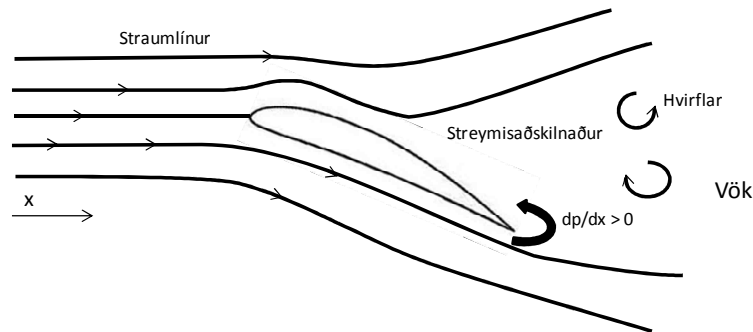
$$\frac{dp}{dx} > 0$$

Það fyrirbæri hefur þau áhrif á hraðaferla jaðarlagsins að draga fer úr hraða í hraðalögum næst yfirborði. Þar sem að lagstreymið jaðarlag hefur lægri hraðaaukningu með aukinni vegalengd frá yfirborði heldur en iðustreymið er minni skriðþungi innbyggður í neðstu hraðalögin til að vega á móti auknum stöðuprýsting í átt straumstefnu. Að því kemur að flæðið stöðvast alveg, við það brotnar jaðarlagið upp og svokallaður streymisaðskilnaður (e. flow separation) á sér stað. Mynd 10 sýnir hraðaprófíl eftir að streymisaðskilnaður hefur átt sér stað og mynd 12 sýnir streymisaðskilnað á vængsniði. Við það að streymishraði ofan á vængsniði falli niður eykst stöðuprýstingur samkvæmt jöfnu Bernoullis, stórlega dregur úr mismunaprýsting milli efra og neðra yfirborðs vængsins og sá þáttur yfirborðskraftsins sem er hornréttur á straumstefnu, þ.e. lyftikraftur, lækkar stórlega. Við höfum nú séð hvernig streymisaðskilnaði fylgir alltaf stórfellt tap í lyftikrafti og við það er talað um að vængurinn ofrísí. Sú hæfni iðustreymis jaðarlags að geta betur vegið á móti neikvæðum þrýstistigli heldur en lagstreymið jaðarlag þýðir fyrst og fremst að streymisaðskilnaður gerist hægur, þ.e. ofrísíð gerist frekar meira stigvaxandi (e. gradual) með auknu áfallshorni heldur en þegar jaðarlagið er lagstreymið. Ofrishegðun (e. stall behaviour) iðustreymis jaðarlags er því betri heldur en fyrir lagstreymna jaðarlagið (mynd 11).



Mynd 10: Hraðaprófíll jaðarlags með neikvæðum þrýstistigli.

Mynd 11: Hugtakið ofrishegðun útskýrt. Gröf sem þessi kallast lyftikraftsgröf og sýna þau breytingu í lyftikraftsstuðli (c_L) sem fall af áfallshorni (α).



Mynd 12: Ofrisið vængsnið

2.10 Áhrif lagstreymins og iðustreymins jaðarlags á viðnámskraft

Við höfum séð hvernig iðustreymið jaðarlag gefur betri ofrishegðun heldur en lagstreymið og því er slíkt jaðarlag heppilegra með tilliti til lyftikrafts. Við höfum þó einnig séð hvernig iðustreymið jaðarlag verður alltaf þykkara heldur en lagstreymið jaðarlag. Heildarbreyting í skriðþungaflæði verður því mun meiri fyrir iðustreymið jaðarlag, með tilheyrandi auknum viðnámskrafti vegna núnings samanborið við lagstreymið jaðarlag (Shevell, 1989). Þar sem að aflþörf flugvéla í stöðugu flugi, þ.e. í jafnri hæð og á jöfnum hraða ræðst af stærð viðnámskrafts, er ákjósanlegra að reyna að halda lagstreymnu jaðarlagi yfir allan vænginn.

2.11 Vök (e. wake)

Þegar talað er um vök í skýrslu þessari er átt við það svæði, hornrétt á straumstefnu, fyrir aftan vængsnið eða aðra lögun yfirborðs þar sem að tap í skriðþungaflæði streymis er að finna. Heildun yfir þykkt vakar á hvaða stað sem er gefur heildartap í skriðþungaflæði, sem jafngildir heildarviðnámskrafti (Charmichael, 1982).

2.12 Vænghlutfall (e. aspect ratio)

Almenn skilgreining á vænghlutfalli er hlutfallið á milli vænghafs, sem við táknum með b , og meðalvænglínu, $c_{meðal}$, sem reikna má með heildinu:

$$c_{meðal} = \frac{1}{b} \int_0^b c(x) dx$$

Ef að ofanvarpsflatarmál vængs, S , er þekkt má einnig reikna vænghlutfall með:

$$AR = \frac{b^2}{S}$$

Jafnframt, fyrir vængi með ferhyrnt ofanvarpsflatarmál, má finna vænghlutfallið með:

$$AR = \frac{b}{c}$$

Vænghlutfall er því í raun mælikvarði á mjódd (e. narrowness) vængja (Houghton & Carpenter, 2003). Í skýrslu þessari er vænghlutfall táknað með stöfunum AR og vænghlutfall annars vængsins táknað ar .

2.13 Reynoldstala

Við höfum aðeins minnst á Reynoldstölu í umfjölluninni hér á undan, en ekki farið alveg út í það að skýra út nákvæmlega hver þýðing hennar er fyrir streymisástand og fyrir hvað hún í raun stendur. Reynoldstala er einingalaus tala sem stendur fyrir hlutfallið á milli tregðukrafta og seigjukrafta. Þar sem að við gerum ráð fyrir seigjulausu flæði alls staðar nema í jaðarlögum, getum við sagt að Reynoldstala eigi í raun bara við þar. Há Reynoldstala hjálpar jaðarlagi að loða við væng þrátt fyrir öfugan þrýstistigul (Charmichael, 1982). Reynoldstala er táknuð með Re og má, fyrir vængsnið ákvarða samkvæmt jöfnunni:

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot c}{\mu}$$

Þar sem að c táknar lengd vænglínu, v táknar streymishraða, ρ táknar eðlismassa og μ táknar seigju.

Annað sem að Reynoldstala hjálpar okkur til við að skilja og spá fyrir um er skiptipunkturinn, þ.e. lagstreymið jaðarlag skiptir yfir í iðustreymið þegar að svokölluð staðbundin Reynoldstala hefur náð ákveðnu krítísku gildi. Staðbundin Reynoldstala er í raun sami hlutur og Reynoldstala nema nú höfum við skipt út lengd vænglínu fyrir x sem táknar vegalengd frá frambrún og er á bilinu $[0, c]$.

$$Re_x(x) = \frac{\rho \cdot v \cdot x}{\mu}$$

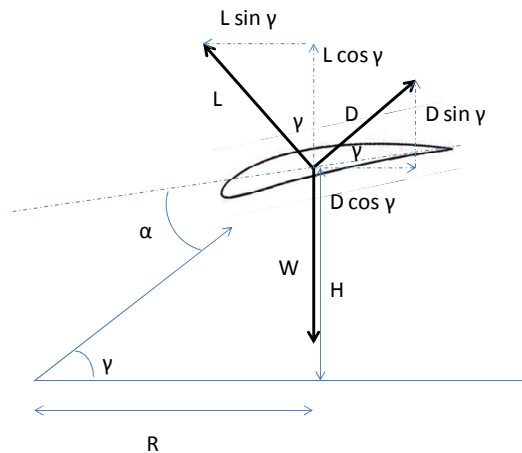
Krítíska gildið getur verið mjög mismunandi og reikar allt frá $Re_x = 200.000$ upp í $Re_x = 1.500.000$, eftir lögun og hrjúfleika vængyfirborðs (Shevell, 1989). Í lághraðatilraunum er oftast hentugt að notast við svokallað kvikseigjugildi til að ákvarða Reynoldstölu, þar sem að taka má hitastig sem fasta. Kvikseigja er skilgreind sem:

$$v = \frac{\rho}{\mu}$$

Þar sem ρ táknar eðlismassa og μ táknar seigjugildi. Þar sem að við gerum ráð fyrir ósamþjappanlegu flæði, nægir Reynoldstalan ein til að skilgreina streymisástand (e. dynamic similarity) (Houghton & Carpenter, 2003).

2.14 Besta svifhorn og svifstuðull

Þegar talað er um að flugvél sé í stöðugu svifi er átt við að hún sé í kraftajafnvægi þar sem enginn knýkraftur (e. thrust) verkar á hana. Í því tilfelli verður hún að haga flugi sínu þannig að láréttur hluti lyftikrafts jafngildi láréttum hluta viðnámskrafts, því annars sæi viðnámskraftur til þess að flugvélin hægði smátt og smátt á sér þar til að streymishraði er orðinn of lágur til að viðhalda lóðrétta kraftajafnvæginu, þ.e. að lyftikraftur sé jafn þyngdarkrafti og framkallaði þannig ofris. Þannig myndast svokallað svifhorn (γ) sem er hornið sem ferill flugvélarinnar myndar miðað við lárétt (mynd 13).



Mynd 13: Kraftamynd af frjálsu svifi.

Kraftajafnvægi í lárétta stefnu gefur:

$$L \cdot \sin(\gamma) = D \cdot \cos(\gamma) \Leftrightarrow \gamma = \cot^{-1}\left(\frac{L}{D}\right) \approx L/D^{-1} \text{ (fyrir lítil } \gamma)$$

Ef við höfum áhuga á að hámarka þá lengd sem að flugvélin getur svifið (R) miðað við flughæð flugvélarinnar (H) er ljóst að lágmarka verður svifhornið γ . Þá fæst svokallað *besta svifhorn*. Við sjáum að til þess að lágmarka hornið verðum við að hámarka hlutfallið L/D (Azuma, 2006). Það hámarkshlutfall er háð áfallshorninu α og er mjög misjafnt eftir lögun vængja og streymisaðstæðum. Við nefnum hámarkshlutfallið $(L/D)_{\max}$ *svifstuðul*.

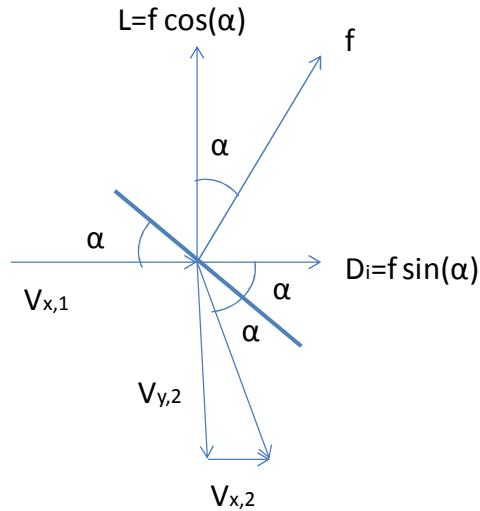
Skoðum lóðrétta kraftajafnvægis skilyrðið:

$$W = L \cdot \cos(\gamma) + D \cdot \sin(\gamma)$$

Athyglisvert er að í þessu tilfelli er þáttur viðnámskraftsins farinn að hjálpa til við að vega á móti þyngdarkrafti, sem við fyrstu sýn gæti virst nokkuð öfugsnúið. Til að aðstoða við að greiða úr flækjum sem gætu myndast í hugum einhverra lesenda má taka fallhlíf í frjálsu svifi sem dæmi. Þá er svifhornið γ í öllum tilfellum jafnt 90° og eingöngu viðnámskraftur sem sér um að viðhalda kraftajafnvægis skilyrðinu.

2.15 Lyftikraftur og lyftikraftsviðnám út frá skriðþungalögmáli

Eftirfarandi umfjöllun er að mestu leyti unnin upp úr bókinni *Fundamentals of Flight* (bls. 144-151) eftir Shevell. Með því að líta á myndun yfirborðskrafts frá væng út frá lögmálum Newtons fæst athyglisverð niðurstaða. Hugsum okkur væng sem hefur vænghafið b og vænglínulengdina c . Það loftsvæði sem að hann hefur áhrif jafngildir flatarmáli hrings með þvermál jafnt vænghafinu b og miðju á miðjum vængnum. Aðvífandi loftstreymi kemur að áhrifahringnum hornrétt á flötinn. Vænglína vængsins myndar áfallshornið α við aðvífandi loftstreymi. Með því að líta á hverja rúmmálseiningu lofts sem fasta ögn með massann dm þá segir annað lögmál Newtons okkur að til þess að vængurinn haldist á lofti þurfi hann að hafa þau áhrif á loftstreymið að það breyti um stefnu nægilega mikið til að breyting í skriðþunga þess samsíða þyngdarkrafti jafngildi þyngd vængsins (Tervning, 1991). Jafnframt, þar sem við lítum á loftstreymið sem summu fastra agna gerum við þá



Mynd 14: Uppstilling forsenda fyrir yfirbroðskraftalíkani

nálgun að hver ögn “speglist” af vængnum og yfirgefi vænginn undir horninu 2α . Það horn köllum við niðurstreymishorn (e. downwash angle). Krafturinn f endurspeglar þann heildaryfirborðskraft sem verkar hornrétt á vænglínu og myndast við áðurnefnda víxlverkun. Uppstillingu forsenda er lýst á mynd 14. Samhengisins vegna getum við litið á lóðréttan þátt þess krafts sem þann kraft sem þarf til að vega á móti þyngd vængsins, þ.e. lyftikraft og lárétta þáttinn sem viðnámskraft. Fyrir fastan eðlismassa fæst:

$$\sum F = \dot{M} + f = 0$$

Út frá þessu upphafsskilyrði fást tvær líkingar, ein fyrir hvora höfuðátt.

$$x: \quad \dot{m}(v_{x,1} - v_{x,2}) = f \cdot \sin(\alpha) \quad (1)$$

$$y: \quad \dot{m}(-v_{y,2}) = f \cdot \cos(\alpha) \quad (2)$$

Þar sem að massastreymið er fasti segir lögmál um varðveislu skriðþungans okkur:

$$v_{x,1} = \sqrt{v_{x,2}^2 + v_{y,2}^2} = \frac{v_{x,2}}{\cos(2\alpha)} = \frac{v_{y,2}}{\sin(2\alpha)} \quad (3)$$

Lögmál um massavarðveislu segir okkur um massaflæðið:

$$\dot{m} = \rho \cdot A \cdot v_{x,1} \quad (4)$$

Fyrir lítil horn ($\alpha < 10^\circ$) gildir:

$$\sin(\alpha) \approx \alpha$$

Með því að sameina (2) og (4) fæst:

$$f \cdot \cos(\alpha) = \rho \cdot \frac{\pi \cdot b^2}{4} \cdot v_{x,1}^2 \cdot 2\alpha = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot \alpha \cdot AR \cdot \pi \cdot v_{x,1}^2$$

Lítum nú betur á niðurstöðuna. Við vitum frá því áður að sá þáttur heildarkraftsins f sem verkar hornrétt á straumstefnu jafngildir lyftikrafti. Þátturinn $\frac{1}{2}\rho v_{x,1}^2$ jafngildir hreyfiþrýstingi (q) loftflæðisins og S er kenniflatarmál vængsins (bc fyrir ferhyrnda vængi). Fyrir vænginn hlýtur því þátturinn $\pi AR\alpha$ að segja til um það hvernig vængflatarmálið nýtir áfallsþrýsting til myndunar lyftikrafts. Sá hluti jöfnunnar er augljóslega línulega háður vænghlutfalli (AR) og áfallshorni (α). Sé lyftikraftur mældur í vindgöngum fæst einmitt sú niðurstaða, þ.e. sé mældur lyftikraftur teiknaður upp sem fall af áfallshorni fæst bein lína með lækkanði hallatölu eftir lækkanði vænghlutfalli (mynd 15). Þó eru ýmsir aðrir þættir, sem líkanið hér að ofan tekur ekki tillit til, sem hafa einnig áhrif. Má þar nefna lögun vængsniðs og seigju loftsins með tilheyrandi jaðarlagi sem á ákveðnu áfallshorni aðskilst frá vængsniðinu og veldur ofrasi vængsins með stórfelldu tapi í lyftikrafti. Þá er forsendan um að loftið speglis af neðra yfirborði vængsins einnig ekki í fullu samræmi við veruleikann, þ.e. niðurstreymishorn er ekki endilega tvöfalt áfallshorn. Það er því ljóst að þótt líkanið endurspegli nokkuð vel þá leytni (e. trend) sem vængir með ákveðið vænghlutfall hafa er ekki hægt að notast við það til að reikna út raunveruleg gildi. Við skilgreinum lyftikraftsstuðul (e. lift coefficient), C_L , sem hlutfall lyftikrafts á flatareiningu vængs á móti hreyfiþrýstingi loftstreymisins og fáum, fyrir þetta tiltekna líkan:

$$C_L = \pi \cdot AR \cdot \alpha \quad (5)$$

Tökum nú til skoðunar þann þátt yfirborðskraftsins sem verkar í lárétta stefnu. Ef við skiptum (3) inn í (1) fæst:

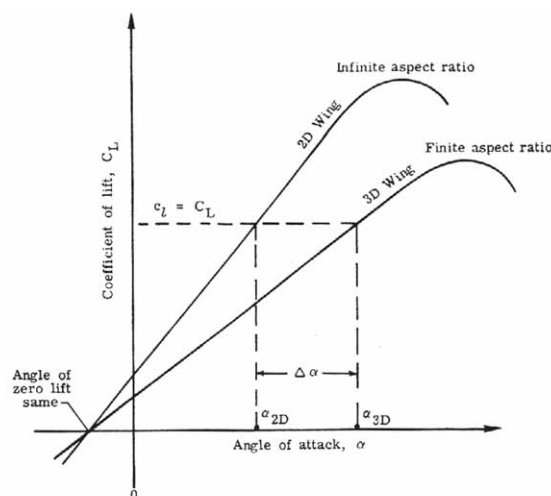
$$f \cdot \cos(\alpha) = \dot{m} \cdot v_{x,1}(1 - \cos(2\alpha)) = \dot{m} \cdot v_{x,1} \cdot 2 \cdot \sin^2(\alpha) \approx 2 \cdot \dot{m} \cdot v_{x,1} \cdot \alpha^2$$

Sé (4) notað til að skipta út fyrir massaflæðið og (5) til að skipta út fyrir hornið α fæst:

$$f \cdot \cos(\alpha) = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot \frac{C_L^2}{\pi \cdot AR} \cdot V_{x,1}^2$$

Þennan kraft köllum við lyftikraftsviðnám þar sem að um er að ræða kraft sem að er háður lyftikraftsstuðli (þ.e. áfallshorni og vænghlutfalli) og verkar samsíða straumstefnu. Á svipaðan hátt og við skilgreindum lyftikraftsstuðul skilgreinum við lyftikraftsviðnámsstuðul (e. induced drag coefficient) sem:

$$C_{Di} = \frac{C_L^2}{\pi \cdot AR}$$



Mynd 15: Áhrif áfallshorns og vænghlutfalls á lyftikraft (mynd: www.nasa.gov).

Eins og áður sagði gefur það einfaldaða líkan sem hér á undan var leitt út ekki af sér rétta hallatölu fyrir lyftikraftsstuðul raunverulegs vængs vegna þeirra annmarka sem um var rætt hér áður. Lyfti-línu kenning Prandtl's (e. Prandtl lifting-line theory) lýsir myndun lyftikrafts með ákveðnum fjölda skeifuhvirfla (e. horse-shoe vortexes) sem allir valda niðurstreymi fyrir aftan vænginn og framleiða þannig lyftikraft. Þá sýndi hann fram á að svokallaðri sporöskjulaga lyftikraftsdreifingu fylgdi jafnt niðurstreymi yfir vænghafið (e. constant spanwise downwash) og þar með lægsta mögulega lyftikraftsviðnám allra lyftikraftsdreifinga (Shevell, 1989). Samkvæmt henni má tengja lyftikraftsstuðul við áfallshorn með:

$$C_L = \frac{a_0 \cdot \alpha}{1 + \frac{a_0}{\pi \cdot AR}}$$

þar sem a_0 táknar hallatölu lyftikraftsstuðuls fyrir tvívíðan væng ($AR \rightarrow \infty$). Annað líkan nefnist kenning um þunn vængsnið (e. thin-airfoil theory) en þar er gert ráð fyrir mjög þunnum, óendanlega löngum vængsniðum. Athyglisverð afleiða þess líkans er að slík vængsnið hafa hallatölu lyftikraftsstuðulsins $a_0 = 2\pi$ (Shevell, 1989). Með því að gefa sér hallatölu fullkomins tvívíðs vængsniðs sem 2π og nota jafnframt jöfnu Prandtl's má reikna út gildi á hallatölu lyftikraftsstuðuls miðað við þrívíðan væng með fast vænghlutfall og sporöskjulaga lyftikraftsdreifingu samkvæmt,

$$\frac{dC_L}{d\alpha} = a = 2\pi \cdot \frac{AR}{AR + 2}$$

sem við getum kallað fræðilegt hámarksgildi hallatölu vængs með fast vænghlutfall.

2.16 Viðnámskraftur

Alltaf þegar vængur er staðsettur í loftstreymi verður viðnámskraftur til staðar. Honum má, fyrir þrívíða vængi, almennt skipta upp í tvo þætti, spilliviðnám (e. parasite drag) og lyftikraftsviðnám (e. induced drag). Heildarviðnámskraftsstuðli, eins og hann mælist í tilraun, má því tákna sem:

$$C_D = C_{D,P} + \frac{C_L^2}{\pi \cdot AR}$$

Þar sem spilliviðnámsþættinum má skipta upp í tvo þætti, annars vegar þrýstiviðnám og hins vegar núningsviðnám (e. friction drag) sem koma til vegna áhrifa seigjukrafta. Margar tilraunir hafa sýnt að þrýstiviðnám vængs er háð lyftikraftsstuðli í öðru veldi (Shevell, 1989). Þannig má lýsa heildarspilliviðnámsstuðli vængs með:

$$C_{D,P} = C_{D,0} + k \cdot C_L^2$$

þar sem $C_{D,0}$ er spilliviðnámsstuðull óháður lyftikrafti. Stuðlinn k er mögulegt að reikna ef lyftikrafts og viðnámsferlar tvívíða vængsniðsins eru þekktir (Spedding & McArthur, 2010).

Fyrir þrívíð vængsnið er fráhrarfi frá sporöskjulaga lyftikraftsdreifingu oft lýst með svokölluðum skortstuðli (e. spanwise efficiency factor) sem er stuðull lægri en 1 og kemur inn í lið lyftikraftsviðnáms samkvæmt:

$$C_{D,i} = \frac{C_L^2}{\pi \cdot AR \cdot e}$$

Þar sem e táknar skortstuðul (Shevell, 1989). Pólgröf sem sýna lyftikraftsstuðul í öðru veldi (C_L^2) sem fall af viðnámsstuðli (C_D) sýna að línulegt samband er þar á milli á því bili sem að lyftikraftsstuðull sem fall af áfallshorni er línulegur. Þannig má, fyrir skilgreinda bilið $C_L = [0, C_{L,max}]$ nálga heildarviðnámsstuðul að jöfnunni:

$$C_D = C_{D,0} + k \cdot C_L^2 + \frac{C_L^2}{\pi \cdot AR \cdot e}$$

Þar sem stuðullinn $C_{D,0}$ jafngildir viðnámsstuðlinum $C_D(\alpha=0^\circ)$. En þar sem við höfum ekki upplýsingar um tvívíðu vængsniðin skilgreinum við stuðulinn f sem að innifelur áhrif allra breyta sem koma inn í viðnámsstuðulsjöfnuna, þ.e. k , AR og e . Jafnframt, þar sem að C_L er línulega háður α á skilgreinda bilinu framkvæmum við breytuskipti þ.a.:

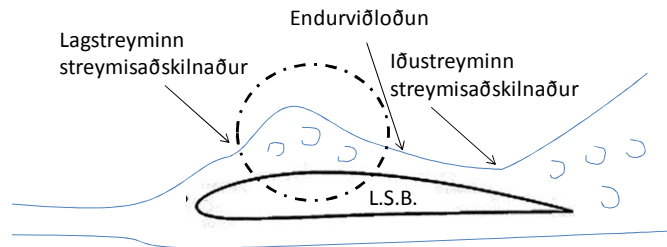
$$C_D = C_{D,0} + f \cdot \alpha^2$$

2.17 Um Reynoldstölubilið $3 \times 10^4 - 1 \times 10^5$

Eins og áður hefur komið fram eru streymisaðstæður og þar með myndun yfirborðskrafta frá föstum hlutum í streymi mjög háð hlutfalli seigju- og tregðukrafta streymisins. Sem hluti af verkefni þessu voru framkvæmdar tvær tilraunir á lágum Reynoldstölum, á bilinu $3 \times 10^4 - 1 \times 10^5$. Þar sem að streymisskilyrði á þessu bili eru á suman hátt frábrugðin því sem að við eigum að venjast fyrir stærri hluti á meiri hraða munu eftirfarandi tvær málsgreinar fjalla um þær streymisaðstæður sem rannsóknir hafa sýnt að eru til staðar á þessu Reynoldstölubili.

2.17.1 Áhrif á lyftikraftsstuðul

Við neðri enda þessa Reynoldstölubils verður jaðarlag í öllum tilfellum lagstreymið og smáir tregðukraftar í flæðinu hafa afar litla hæfni til að bregðast við neikvæðum þrýstistigli. Það veldur svokölluðum lagstreymnum streymisaðskilnaði sem jafnvel á sér stað nálægt frambrún vængs á áfallshornum sem eru mun lægri en það sem búast má við á hærri Reynoldstölum (Charmichael, 1982). Slíkt veldur mikilli þykkingu vakar (e. wake), þar með mikilli aukningu í viðnámskrafti og tapi í lyftikrafti. Rótið sem kemst á loftið við þetta fyrirbæri getur þó orðið til þess að aðskilda jaðarlagið verði iðustreymið, með tilheyrandi aukinni hæfni til að standa af sér neikvæðan þrýstistigul. Í mörgum tilfellum tekur þá jaðarlagið upp á því að festast við vænginn á nýjan leik, aftan við þann stað sem að það aðskildist fyrst.

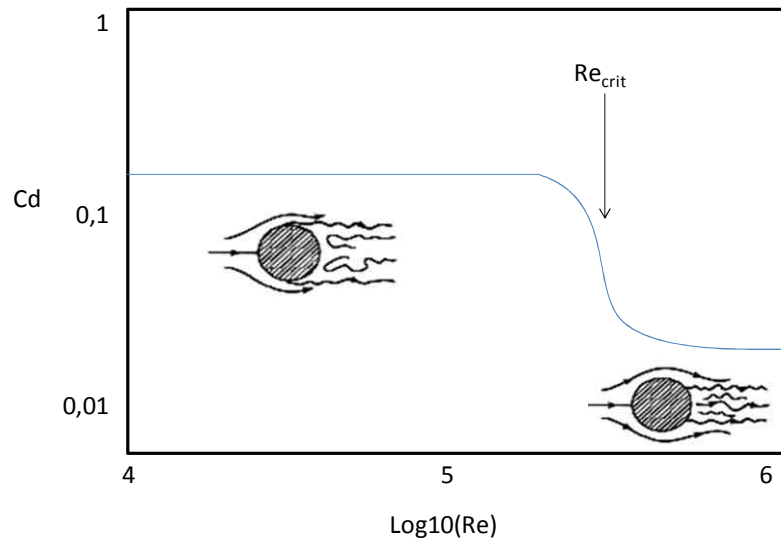


Mynd 16: Skýringarmynd af lagstreyminni aðskilnaðarkúlu (L.S.B.). ATH. myndin er aðeins sett fram til að útskýra fyrirbærið, ekki sem raunveruleg straumlínmynd.

Þetta fyrirbæri er nefnt lagstreymis aðskilnaðarkúla (e. laminar separation bubble, L.S.B.) og er greinanleg á öllu Reynoldstölubílinu sem hér er tekið fyrir, en verður mun stærri eftir því sem að nær neðri mörkum dregur, jafnvel að því marki að jaðarlagið nái ekki að umbreytast yfir í iðustreymið fyrr en fyrir aftan vænginn (Charmichael, 1982). Á mynd 16 má betur glöggva sig á hvernig fyrirbærið myndast. Við þetta bætist, fyrir Reynoldstölur lægri en 50.000 að streymisaðstæður verða tímaháðar og því mjög erfitt að leggja gott mat á gæði mælinga (Barlow, Rae, & Pope, 1999). Þar má því sérlega búast við að erfitt verði að fá fram skýran, línulegan lyftikraftsferil. Hægt er að hafa áhrif á L.S.B. með því að koma fyrir ofrisræmu á frambrún vængs, fyrir ofan miðpunkt og fá þannig fram fullkomlega iðustreymið jaðarlag (Charmichael, 1982).

2.17.2 Áhrif á viðnámsstuðul

Það er vel þekkt fyrir flæði í kring um sléttan sívalning að viðnámsstuðull snarlækkar í kringum Reynoldstöluna 3×10^5 . Þess vegna er oft talað um að flæði þar sem Reynoldstala er undir 10^5 séu “undirkrítísk”. Ástæðan fyrir þessari skyndilegu dífú í viðnámsstuðli er sú að jaðarlag sívalningsins verður iðustreymið á eða í kring um þessa Reynoldstölu og hefur þess vegna betri hæfni til að standa af sér neikvæðan þrýstistigul og jaðarlagið verður áfast sívalningnum lengur, þ.e. flæðisaðskilnaðurinn gerist aftar heldur en þegar að jaðarlagið er lagstreymið, með þeim afleiðingum að þykkt vakarinnar (e wake) verður minni. Hægt er að hafa áhrif á þessa krítísku Reynoldstölu, þ.e. lækka hana, með því að koma fyrir iðuvökum (e. turbulator) á sívalningnum (Charmichael, 1982). Sem dæmi má nefna golfbolta sem er alsettur grunnum götum til þess að umbreyta jaðarluginu frá lagstreymnu yfir í iðustreymið og lækka þannig til muna viðnámsstuðul boltans. Þannig skiptir yfirborð þess hlutar sem til skoðunar er hverju sinni sérstaklega miklu máli í mælingum á Reynoldstölum undir 10^5 . Fyrir straumlínulagaða hluti er viðnám vegna þrýstimunar ekki jafn stór hluti heildarviðnáms og því verður stökkið í viðnámsstuðli ekki jafn stórfellt heldur helst hann nokkuð stöðugur að krítísku Reynoldstölunni þar sem hann tekur dýfu og helst síðan nokkuð jafn eftir það (mynd 17). Til að lágmarka viðnámskraft á þessu lága Reynoldstölubili getur því borgað sig að hafa yfirborð vængja hrjúft að einhverju marki, í því skyni að lækka krítísku Reynoldstöluna niður fyrir $Re=10^5$. Það kann að virðast öfugsnúið miðað við almennu umfjöllunina um áhrif jaðarlags á viðnámskraft hér að ofan, en ástæðan er í raun sú að þegar Reynoldstalan er svo lág sem raun ber vitni getur hæfni lagstreymis jaðarlags til að standa af sér neikvæðan þrýstistigul orðið nánast engin og jafnvel eingöngu það að jaðarlagið þurfi að fylgja vængsniðinu yfir kafla hámarksþykktar þess orðið nóg til þess að valda lagstreymnum streymisaðskilnaði, sérstaklega fyrir þykkari vængsnið. Sé tekið mið af náttúrunni, þ.s. margir fuglar fljúga við þessi streymisskilyrði, kemur enda í ljós að yfirborð vængja þeirra er hrjúft eða í öllu falli a.m.k. ekki slétt.



Mynd 17: Áhrif Reynoldstölu á viðnámsstuðul fyrir samhverft vængsnið með ekkert áfallshorn. Lauslega teiknað eftir mynd 11-1 úr skýrslunni *Low Reynold Number Airfoil Survey* (Charmichael, 1982). Myndir af lagstreymnu og iðustreymni jaðarlagi í kringum sívalning eru hafðar með til að auka skýrleika.

3 Tilraunaaðstaða

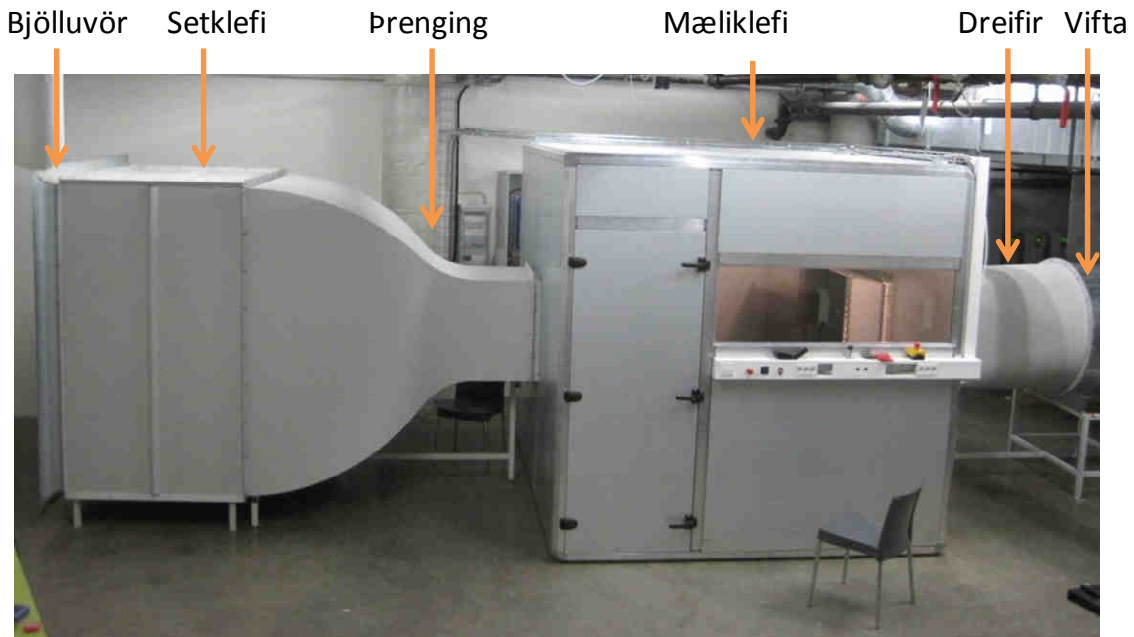
Hér á eftir kemur lýsing á helstu hlutum þeirrar aðstöðu sem notast var við í verkefni þessu. Aðstaðan samanstendur af tveimur vindgöngum, einum stórum og einum smærri, sem jafnframt eru færanleg. Aðrir hlutar aðstöðunnar eru tölvustýrður frauðplastskeri sem ætlaður er til útskurðar á smáum vængjum með fyrirfram skilgreinda lögun, heimasníðuð þriggja ása kraftvog, kraftvog sem fengin var að láni frá Teledyne Gavia, áfallsþrýstimælir (e. pitot tube) og jafnvindhraðamælir (e. constant temperature anemometer, CTA). Einstökum hlutum aðstöðunnar verður lýst, hvaða aðgerðir tengdar hverjum hlut voru framkvæmdar sem hluti af verkefni þessu og leiðbeiningar gefnar eftir þörfum.

3.1 Stærri vindgöng

Ráðist var í smíði lághraðavindganga vorið 2011 þar sem nemendur í áfanganum hagnýtt verkefni 3003 sáu um hönnun og uppsetningu, þar með talið höfundar skýrslu þessarar. Byggingu og frummælaniðurstöðum voru gerð skil í skýrslu sem var skilað að smíði lokinni og nálgast má á slóðinni <http://projects.ru.is/wind-tunnel/project-report/>. Vindgöngin eru svokölluð opin vindgöng (e. open section) sem þýðir að mæliklefi (e. test section) ganganna er ekki lokaður af, heldur er smíðað í kringum mælisvæðið sérstakur loftþéttur skúr. Í sem stystu máli náðist að klára að smíða göngin sjálf auk þess sem grófar mælingar á meðalvindhraða voru framkvæmdar með áfallsþrýstimæli. Ekkert mat var lagt á gæði flæðisins, sem vanalega er metið með því að mæla magn vindflöchts um meðalhraða í hverjum mælipunkti, né var farið út í neinar aðgerðir til að lágmarka slíkt vindflökt aðrar en þær að lögun inntaks og þrengingar ganganna var höfð í samræmi við þekktar hönnunarforsendur. Framlag okkar til vindganganna með verkefni þessu fólst því í að mæla og framkvæma leiðréttingaraðgerðir til að draga úr áðurnefndu vindflökti. Mælingum, niðurstöðum og leiðréttingaraðgerðum er lýst í kafla 4 í þessari skýrslu. Tafla 1 sýnir helstu kennitölur vindganganna sem eru staðsett í sérstöku vindgangarými í kjallara Háskólans í Reykjavík. Virða má fyrir sér lokaútlit vindganganna á mynd 18.

Tafla 1: Kennitölur stóru vindganganna.

Mesta rúmmálsflæði	50.000 m ³ /klst
Hámarksnúningshraði viftu	1470 RPM
Afl viftu	18 kW
Þvermál viftu	1000 mm
Stærð inntaks	2000 x 2000 mm
Stærð inntaks í mælisvæði	712 x 712 mm
Lengd mælisvæðis	1,80 m
Stærð inntaks dreifis	780 x 780 mm
Heildarlengd	8,0 m
Hámarksvindhraði	30 m/s



Mynd 18: Stærri vindgöng og helstu hlutar þeirra.

Mynd 18 sýnir ljósmynd af vindgöngunum þar sem hver einstakur hluti er merktur með örvum. Hér fyrir neðan er tilgangur og virkni hvers hluta vindganganna útskýrður sérstaklega án þess þó að of djúpt sé farið í fræðin á bak við. Á myndinni má sjá nöfn og staðsetningu hlutanna til viðmiðunar. Eftirfarandi umfjöllun er að mestu unnin upp úr bókinni *Low Speed Wind Tunnel Testing* (Barlow, Rae, & Pope, 1999). Frekari fræðilegar útskýringar á einstökum hlutum má finna í kafla 4.

3.1.1 Bjölluvör (e. bellmouth)

Tilgangur bjölluvararinnar er að laga stefnu loftstreymis sem mest að láréttri stefnu áður en inn í inntak ganganna er komið. Sú aðlögun þarf að vera mjúk til að koma í veg fyrir hvirflamyndanir (e. vortex generation). Þannig á lögun bjölluvararinnar sinn þátt í að draga úr vindflökti frá jöðrum inntaksins. Bjölluvör sú sem smíðuð var á þessi vindgöng fylgir loftinu mjúklega í gegnum 90° stefnubreytingu.

3.1.2 Setklefi (e. settling chamber)

Milli bjölluvarar og inntaks er vanalega komið fyrir sérstökum inntaksnetum (e. turbulence reduction screens) sem hafa það hlutverk að skapa þrýstifall og draga þannig úr mismun í streymishraða aðvífandi lofts. Hlutverk sjálfs setklefans er hins vegar að gefa loftstreyminu tíma til að aðlagast sem mest að láréttri stefnu og eyða út smáhvírlum sem inntaksnetin kunna að hafa skapað. Þó má setklefinn að jafnaði ekki vera of langur vegna þykkingu jaðarlags (e. boundary layer) í straumstefnu.

3.1.3 Þrenging (e. contraction)

Þegar að þrengingunni er komið ætti loftstreymið að vera orðið nokkuð einsleitt, á jöfnum hraða og á jafni stefnu. Þversniðsflatarmál þrengingarinnar minnkar í streymisátt og veldur hröðun loftstreymisins samkvæmt lögmáli um varðveislu massa. Vel löguð þrenging skilar einsleitu loftstreymi á ásætlanlegum streymishraða að mæliklefa.

3.1.4 Mæliklefi (e. test section)

Mæliklefinn er hjartað í sérhverjum vindgöngum. Þar fara allar mælingar fram, hvort sem um er að ræða kraftmælingar, myndbirtingartilraunir (e. flow visualisation) eða aðrar tegundir mælinga. Með því að hafa vindgöngin með opnum mæliklefa verður mun þægilegra að koma fyrir mælibúnaði sem getur verið misumfangsmikill. Ef ætlunin er að hefja rannsóknir á hlutum eins og vélfuglum er ljóst að opin vindgöng gefa mun fleiri möguleika á mismandi uppsetningum tilrauna, þar sem rannsakandi er ekki jafn bundinn af hliðum sem umlykja mæliklefa lokaðra vindganga.

3.1.5 Dreifir (e. diffuser)

Eftir að hafa streymt í gegnum mæliklefann tekur dreifirinn við loftinu. Hlutverk hans má segja að sé öfugt við hlutverk þrengingarinnar, það er hann hægir á loftinu þar sem að þversniðsflatarmál dreifisins eykst með aukinni vegalengd í streymisátt. Gæta þarf sérlega vel að því að sú aukning sé ekki of mikil þar sem nokkur hætta er á streymisaðskilnaði (e. flow separation), með tilheyrandi titringi, ójöfnu sögu frá viftublöðum og óstöðugum streymishraða í mæliklefa. Vel lagaður dreifir hins vegar hækkar þrýsting loftsins jafnt og þétt í streymisátt og dregur þannig úr nauðsynlegri þrýstiaukningu (og þar með álagi) yfir viftu og viftumótor.

3.1.6 Vifta og viftumótor (e. fan)

Líta má á það sem hlutverk viftumótorsins að snúa viftublöðunum nægilega hratt til að þau nái að mynda loftaflskraft (e. aerodynamic force) sem dugar til að mynda nægilegt þrýstifall milli enda dreifis og umhverfis. Með þrýstifallinu tekur loft að sogast í gegnum vindgöngin. Eftir því sem að meira afl er sett á mótorinn aukast loftaflskraftarnir og þar með þrýstifallið og streymishraði í gegnum mæliklefann eykst.

3.1.7 Notendaviðmót

Tíðnibreyti viftumótorsins, sem staðsettur er á vegg aftan við vindgöngin, er fjarstýrt með sérstöku viðmóti sem að staðsett er neðan við gluggann á mæliklefanum. Sérstakur rofi er til að ræsa og slökkva á viftumótornum auk þess sem að hægt er að stjórna tíðnibreytitíðninni með stilliviðnámi sem staðsett er við hliðina á ræsisrofanum. Þá var komið fyrir litlum skjá sem sýnir augnabliksgildi tíðnibreytitíðnarinnar og staðsettur er við hlið stilliviðnámsins. Neyðarrofar eru svo staðsettir bæði inn í og fyrir utan mæliklefann. Mynd 19 sýnir notendaviðmót ganganna, á myndinni er slökkt á göngunum.



Mynd 19: Notendaviðmót vindganganna.

3.1.8 Öryggisatriði

Hafa þarf í huga að vindgöngin eru af þeirri stærðargráðu að mikill rafstraumur streymir í gegnum tíðnibreyti að viftumótor. Í tíðnibreytinum eru stórir þéttar sem geta tekið langan tíma að afhlaðast. Það er því mælt með að lágmarki 10 mínútur líði frá því að straumur að honum er rofinn þar til að hann er opnaður, verði þörf á því í einhverjum tilvikum. Upplýsingar um tíðnibreytinn er að finna í sérstökum leiðarvísi sem fylgdi með honum og er hann staðsettur í vindgangarýminu. Hænsnanet er staðsett aftan á viftu í því skyni að koma í veg fyrir að mögulegt sé að stinga hönd eða öðru viðkvæmu inn í viftu meðan hún er í gangi. Þurfi af einhverjum ástæðum að fjarlægja netið, þarf að gæta þess sérstaklega að það sé sett á aftur áður en að kveikt er á mótornum aftur. Þar sem að vindhraði inn í mæliklefa getur náð allt að 30 m/s er nokkur hættu á að hlutir sem staðsettir eru inn í því fjúki til þegar kveikt er á göngunum. Nauðsynlegt er því að gæta þess að hlutir séu tryggilega festir eða skorðaðir áður en mælingar hefjast. Til þess að koma í veg fyrir að hlutir geti fokið í gegnum dreifinn og inn í viftuna er staðsett hænsnanet við úttak mæliklefa. Ekki er mælt með því að netið sé fjarlægt, en skapist einhvern tímann þörf á því að fjarlægja það er mælt með að koma upp öðrum búnaði sem varnar því að hlutir fjúki að viftunni. Að lokum er vert að geta þess að þegar göngin eru í gangi á fullu afli skapast þrýstimunur upp á 560 Pa milli mæliklefa og umhverfis. Jafngildir sá þrýstimunur um 90 kg þyngd á hurðina og því nær ómögulegt að opna hana þegar göngin eru í gangi á fullu afli.

3.2 Smærri vindöng

Sem hluta af áfanganum TIL1003 á vorönn 2011 voru færanleg vindgöng með lokuðum mæliklefa (e. closed section) hönnuð og smíðuð. Meðal þeirra sem komu að því verkefni var Kristján Orri, annar höfundar þessarar skýrslu. Þar sem smærri vindgöngin eru á hjólum bjóða þau upp á töluvert meiri sveigjanleika heldur en stærri vindgöngin, en á móti eru tilraunirnar takmarkaðar við minna mæliþversnið sem er 25 x 25 cm að stærð. Að öðru leyti eru göngin byggð upp á sama hátt og stærri göngin. Sem hluta af verkefni þessu voru smærri vindgöngin nýtt til kvörðunar jafnvindhraðamælis sem og til samanburðar við stóru vindgöngin í vindflöktsmælingum (sjá kafla 4 um vindgangamælingar). Tafla 2 sýnir yfirlit yfir helstu kennitölur vindganganna.



Mynd 20: Smærri vindöng.

Tafla 2: Kennitölur smærri vindganga.

Afl viftu	3 kW
Mesti vindhraði	30 m/s
Stærð inntaks	500 x 500 mm
Prengingarhlutfall	4:1
Stærð mælisvæðis	250 x 250 mm

3.3 Frauðplastskeri

Á vorönn 2011 voru undirritaðir auk Sveins Hauks Albertssonar nemendur í áfanganum Hönnun 1003 undir handleiðslu Joseph Timothy Foley. Þar kom upp sú hugmynd að hanna tölvustýrðan frauðplastskeri með það að markmiði að hann gæti skorið út vængi með heitum viðnámsvír, strengdum milli tveggja plana með hreyfanlegum vírfestingum. Vængina mætti svo t.d. nýta til tilrauna í vindgöngum og fleira. Öll hönnunarvinna var kláruð í áfanganum. Þótti þannig til takast með þá vinnu að ákveðið var að sækja um styrk til Nýsköpunarsjóðs Námsmanna til þess að fullsmíða tækið. Styrkurinn fékkst og héldu þeir Fannar og Sveinn, ásamt meistaranemanum Luis I.H. Coca sem sá um að útfæra tölvufastbúnað (e. firmware), svo áfram með verkefnið og luku við smíði tækisins yfir sumarið 2011. Smíði og lokaútfærslu voru gerð skil í skýrslunni *tölvustýrður frauðplastskeri* sem skilað var inn til Nýsköpunarsjóðs Námsmanna. Afraksturinn má sjá á mynd 21.

3.3.1 Virkni og notkunarmöguleikar

Þegar vinna við verkefni þetta hófst var frauðplastskerinn tilbúinn að því leyti að hægt var að hlaða í hann svokölluðum G - kóða sem er tungumál sem mörg tölvustýrð tæki nota til að vinna eftir. Strax var hafist handa við að útbúa forrit sem gæti umbreytt vængsniðsferli yfir í slíkan kóða. Í þeim tilgangi var notast við forritunarmálið Matlab. Forritið vinnur þannig að fyrst eru skilgreind vængsnið samkvæmt NACA 4 - stafa kóða, eitt fyrir hvorn enda frauðplastskerans. Möguleiki er gefinn á að hliðra sniðunum þannig að afturbrún vængsniðanna hliðrist í lárétta og lóðrétta stefnu. Einnig er möguleiki gefinn á vindingu (e. twist) vængjarins þar sem að vænglínu (e. chord line) vængsniðanna er snúið þannig að á milli þeirra myndist skilgreint horn. Forritið útbýr svo línuvígna sem innihalda staðsetningu punkta á vængsniðunum, teiknar upp niðurstöðuna og táknbreytir svo yfir í áður nefndann G - kóða sem það skrifar í sérstaka skrá sem má svo með einföldum hætti færa yfir í notendaviðmót frauðplastskerans. Viðmótið býður einnig upp á að breyta G - kóðanum beint. Þannig má t.d. bæta inn færsluskipunum ef að sóst er eftir einföldum smábreytingum á forminu sem að frauðplastskerinn sker út. Sem dæmi um það má nefna að sérstök vindhlíf sem skorin var út er í raun vængprófíll sem búið er að skera ferhyrning innan úr. Vindhlífina má sjá á mynd 29. Meira er fjallað um tilgang vindhlífarinnar í kafla 5.8. Til að skera út vængi þarf að hafa tölvu með forritunum Matlab og ReplicatorG uppsettum. Inn í ReplicatorG þarf svo að bæta við sérsníðaðri keyrsluskra (e. driver), en hana má finna í viðauka H. Hiti vírs og skerhraði tækisins eru stilltur fyrir frauðplast með eðlisþyngdina 35 kg/m^3 . Allt frauðplast sem notað var í verkefni þessu var keypt af Promens Ehf í Hafnarfirði.



Mynd 21: Frauðplastskerinn.



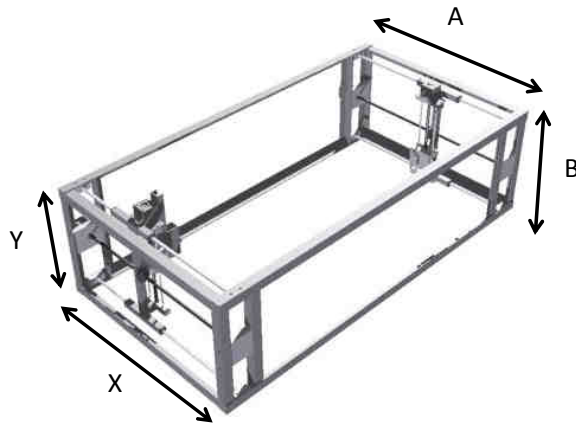
Mynd 22: Frauðplastskerinn að störfum.

3.3.2 Nánar um frauðplastschera

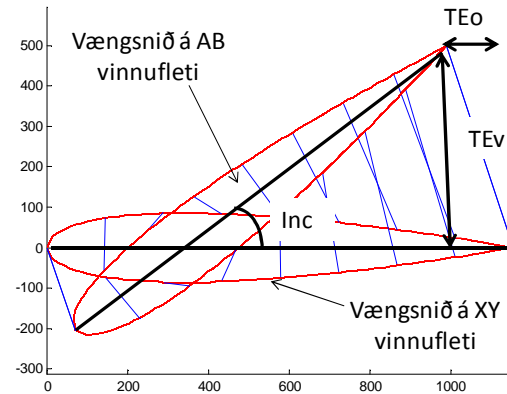
Á sitt hvorum enda frauðplastskerans eru staðsettir tveir mótórar sem, í sitt hvoru lagi, stýra lóðréttum og láréttum hreyfingum vírfestingar, hornrétt á stefnu viðnámsvírsins, á fleti sem að við köllum vinnuflöt. Bilið milli vinnuflatanna er 935 mm. Láréttar og lóðréttar stefnur vinnuásana skilgreinum við sem X og Y öðrum megin en A og B hinum megin (mynd 23). Ein skipanalína í G - kóðanum segir til um hversu langa vegalengd hver vinnuás á að færast og hver færsluhraðinn (e. feedrate) á að vera fyrir þá tilteknu færslu. Þannig eru allar færslur skilgreindar sem línulegar færslur, en með því að hafa nógu marga punkta í því sniði sem skorið er út hverju sinni, nálgast heildarfærslan samfelldri, ólínulegri lögun. Eins og áður sagði var útbúið Matlab forrit sem reiknar út lögun tveggja vængsniða með n mörgum hnitum, umbreytir yfir í færslulínur G - kóða og skilar af sér skrá sem að opna má í ReplicatorG, notendaviðmóti frauðplastskerans. Innlagsbreytur forritsins og útskýringar er að finna í töflu Tafla 3. Bent er á kafla 2.6 um NACA fjögurra stafa vængsnið til frekari útskýringar á hverri og einni breytu sem lýsa vænglögum.

Tafla 3: Innlagsbreytur vængútskurðarforrits

Innlags- breyta	Lýsing	XY – vinnuflötur	AB – vinnuflötur
c	Lengd vænglínu [mm]	X	
c2	Lengd vænglínu [mm]		X
b	Vænghaf [mm]		
m	Vængbunguhlutfall [%c]	X	
m2	Vængbunguhlutfall [%c2]		X
t	Hámarksþykkt vængsniðs [%c]		
t2	Hámarksþykkt vængsniðs [%c2]		X
p	Staðsetning hámarksbundu [10%c]	X	
p2	Staðsetning hámarksbundu [10%c2]		
TEo	Hliðrun afturenda vængsniðs í lárétta stefnu [mm]		X
TEv	Hliðrun afturenda vængsniðs í lóðrétt stefnu [mm]		X
Inc	Vindingur, horn milli vænglína [rad]		X
n	Fjöldi punkta í vængsniði.	X	X
filename	Nafn G-kóða skráar		

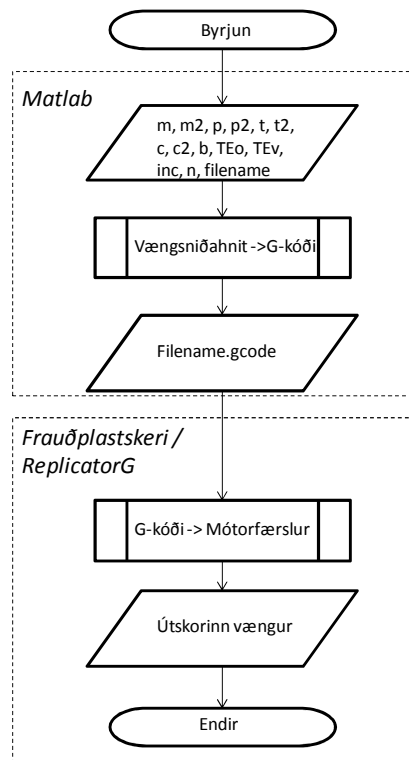


Mynd 23: Vinnuásar og vinnufletir frauðplastskeira.



Mynd 24: Hliðrun og vindingshorn vængsniða. Ath: einingar ásanna eru vélareiningar, en milli vélareininga og millimetra er fastur stuðull, þannig að í einum mm eru 8,89 vélareiningar.

Mynd 24 sýnir innlagsbreyturnar TEo, TEv og Inc myndrænt. Í öllum tilfellum er miðað við að vængsnið XY - vinnuflatarins sé haldið föstu (vænglína lárétt) og hliðrun og snúningur eigi sér stað á vængsniði AB - vinnuflatar. Sé ætlunin að skera út væng, þarf fyrst að skilgreina allar innlagsbreytur, sem skilar sér í G - kóðaskrá sem síðan þarf að opna í ReplicatorG. Tölvun er svo tengd við fastbúnað frauðplastskeira með USB-kapli (Mynd 26 sýnir frauðplastskeirann tengdum við tölvu) og þá getur útskurðurinn hafist. Hafa þarf í huga að straumur sé á viðnámsvír, en sérstakur raftengill er fyrir hann. Á mynd 27 gefur að líta frauðplastkubb sem stilltur er upp í tækinu, og mynd 28 sýnir lögum vængs sem skorinn hafði verið út með skilgreindu vindingshorni. Mynd 25 útskýrir ferlið við vængútskurð frá upphafi til enda í flæðiriti.

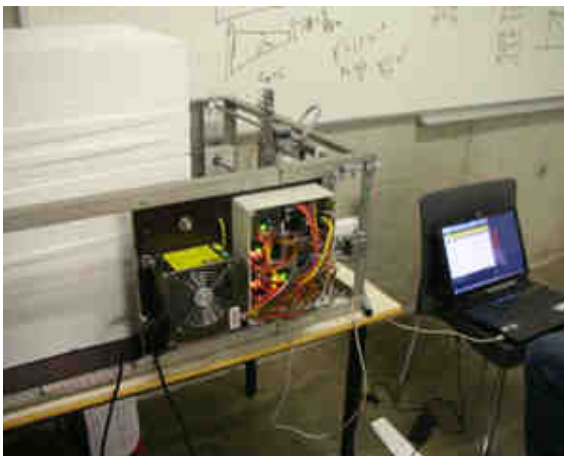


Mynd 25: Flæðirit sem sýnir ferli vængútskurðar.

3.3.3 Notkunarleiðbeiningar og góðir siðir

Þar sem að líta má á frauðplastskerann sem frumgerð (e. prototype) eru nokkur atriði sem þarf að hafa í huga í umgengni við hann. Í eftirfarandi upptalningu er farið yfir helstu atriðin í útskurðarferlinu;

1. Sækja Matlab kóðann í viðauka B1 og innfæra keryslurskrá í ReplicatorG með kóða úr viðauka H.
2. Skilgreina þau vængsnið sem frauðplastskerinn á að teikna, fyrir sitt hvort færsluplan.
3. Notast beinstýringu í ReplicatorG og málband til að stilla ásana þannig að þeir standi andspænis hvor öðrum. Stilla ásana þannig að þeir komi ekki til með að rekast úti enda við að skera prófílinn. Passa að ekki sé slaki á vírnum.
4. Opna G-kóða skrána í ReplicatorG.
5. Stilla upp frauðplastkubb mitt á milli ásana og draga kubbin til þannig að vírin fari um 1cm inni kubbin. Þá má ýta á *Build* í ReplicatorG og byrja að skera.
6. Þegar frauðplastskerinn stoppar skal ýta kubbum frá svo hitinn frá viðnámsvírnum valdi ekki óþarfa útbreðslu á vængnum.
7. Áður en afgangurinn fyrir vírin er aftengdur er gott að slaka á vírnum því hann dregst saman um leið og hann kólnar.
8. Ef verið er að skera út fleiri en einn væng í einu er góður siður að aftengja móturstýringar með því að aftengja tölvufastbúnað frá rafmagni sem og að taka USB kapal úr sambandi við tölvu á milli útskurða. Þannig má koma í veg fyrir mögulega ofhitun á móturstýringum þar sem að þeir eru ekki búnir hitavörum.
9. Eiturgufur stíga upp frá viðnámsvír þegar hann sker í gegnum frauðplastið, einkum ef að hann fær að stöðvast inn í plastinu. Gæta þarf vel að því að anda þeim ekki að sér.
10. Viðnámsvírinn er mjög heitur þegar hann er í sambandi og hægt er að brenna sig illa á honum. Góð regla er að hafa vettlinga til taks ef vinna þarf við frauðplastskerann þegar straumur er á viðnámsvírnum.



Mynd 26: Frauðplastskeri tengdur við tölvu



Mynd 27: Fjöldaframleiðsla á vængjum



Mynd 28: Snúinn vængur



Mynd 29: Vindhlíf. Bætt var inn færslulínunum í G-kóðann fyrir holrúminu.

3.4 Frágangur vængja

Þar sem að frauðplast er ekki hentugasta byggingarefni vængja með tilliti til þeirra loftaflskrafta (e. aerodynamic force) sem verka á það í vindgangatilraun auk þess sem að yfirborð þess er í eðli sínu óslétt, var ljóst að finna þyrfti hentuga og skilvirka aðferð til að byggja inn festingu á mælibúnað, herða vænginn og slétta yfirborð hans. Fljótlega komumst við á þá skoðun að hentugast væri að leita uppi tveggja þátta plastefni sem víxlverkaði ekki við frauðplastið á þann hátt að það skaðaðist eða breytti um form við snertingu. Í gegnum samtal við Gísli Frey Þorsteinsson, umsjónarmann vélaverkstæðis HR, komumst við að því að slíkt efni væri til og væri að finna í skólanum. Efnid nefnist SP115 og fæst hjá Infuse ehf. Samkvæmt notkunarleiðbeiningum með efninu er það algerlega laust við leysiefni og stýren (e. styrenes) sem gerir það að verkum að hægt er á öruggan hátt að bera það utan á polystyrene frauðplast til að framleiða samlokuefni með tiltölulega háan styrk og slétt yfirborð. Einnig er efnið hentugt til að steypa inn í vængina festingar fyrir mælibúnað. Útbúnar voru tvær gerðir af vængjum. Á mynd 34 má sjá hvernig vængir fyrir mælingar á kyrrstæðum vængsniðum og vængir fyrir mælingar með vængslætti líta út. Vængir fyrir kyrrstæðu mælingarnar hafa málín 100 x 600 mm en fyrir vængsláttartilraunina voru útbúnir vængir sem hafa málín 125 x 500 mm. Alls tók ferlið tvo sólarhringa frá því að vængur var skorinn út þar til að síðari umferð plastefnis hafði þornað nægilega til að gefa ásættanlega styrkeiginleika. Eftir að vængir af réttum vængsniðum höfðu verið skornir út tók við ferli þar sem að festing var steipt inn í þá og vængurinn var húðaður með plastefninu. Upptalningin hér að neðan lýsir ferlinu sem að hver vængur sem notaður var í kraftmælingar á kyrrstæðum vængjum fór í gegnum eftir útskurð;

1. Fyrst var boruð 6 mm djúp hola með 12 mm pinnfræs í snúningsmiðju vængsins sem er $\frac{1}{4}$ af lengd vænglínu frá fremstu brún. Ofan í holuna var komið fyrir M6 ró.
2. Holan fyllt með plastlími sem er blandað í þyngdarhlutfallinu 3/1, resin/herðir, og látið standa í um 3 tíma.
3. Sett er skrufa í kannt vængjana og bundinn vír um hana svo gott sé að hengja upp vængina. Penslað er lag af lími yfir allan vænginn. Passa þarf þegar líminu er penslað á að það lyggi ekki í taumum á vængnum og breytti þar með lögun hans. Vængirnir eru látnir hanga til þerris yfir nótt (mynd 31).
4. Borin er önnur umferð á vængina og þeir látnir hanga aðra nótt.
5. Lokameðhöndlun felst í að þússa niður allar ójöfnur og neðsta kant vængsins þar sem límið sest fyrir (mynd 33). Bora þarf límið úr rónni og hreinsa gengjurnar með snittappa.

Meðhöndlun vængja fyrir blakandi tilraun er eins og fyrir hina vængina fyrir utan festingu á tengi fyrir mælibúnað. Í stað þess að setja ró í miðjan vænginn kemur 8mm snittteinn inn í kant vængsins

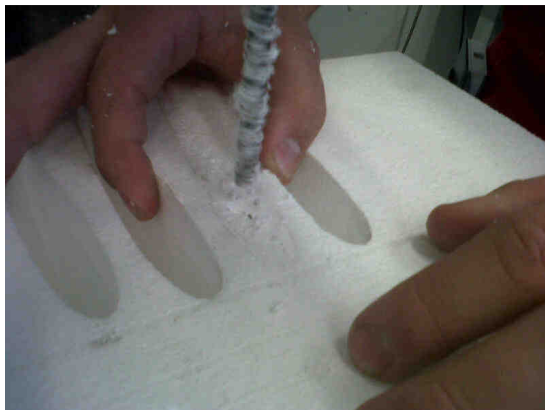
sem staðsett er í snúningsmiðju þversniðsins ($1/4$ lengdar vænglínu frá fremsta punkti vængsniðs). Til að hægt væri að bora holu samsíða snúningsmiðjulínu inní vænginn þurfti haldara eða sniðmát sem gæti haldið vængnum lóðréttum á meðan væri borað. Lausnin var að nota afskurðinn af vængjunum, þ.e afganginn af frauðplastinu sem að vængurinn var skorinn út úr til að byrja með, sem sniðmát (mynd 32).



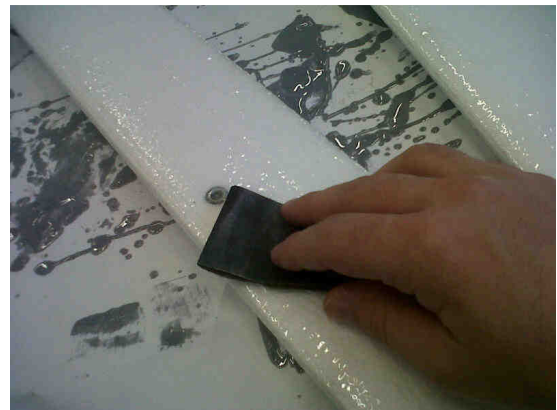
Mynd 30: Ró komið fyrir



Mynd 31: Vængur hengdur til þerris



Mynd 32: Borað fyrir tein á vengjum fyrir blaktilraun



Mynd 33: Ójöfnur pússaðar niður



Mynd 34: Efri: vængur fyrir blakandi tilraun. Neðri: vængur fyrir tilraun á kyrrstæðum vengjum.



Mynd 35: NACA0020 með og án plasthúðar.

3.5 Heimasmíðuð kraftvog

Einn hluti þessa verkefnis var að villuleita og laga kraftvog (e. Force Balance) (sjá mynd 37) sem hönnuð var af starfsmönnum rannsóknarstofu fyrir ómönnuð farartæki með forskrift úr bókinni *Low speed wind tunnel testing* (Barlow, Rae, & Pope, 1999) til hliðsjónar (mynd 36). Vugin var smíðuð af nemanda við skólann og sett saman af höfundum. Til stóð að þessi vog yrði notuð við framkvæmd vindgangatilraunanna en á endanum var notast við aðra vog og er farið yfir ástæður þess seinna í þessum kafla. Kraftvog er tæki sem mikið er notað við straumfræðirannsóknir til að mæla krafta í tví-eða þrívíðu rúmi. Kraftvugin okkar er pallvog (e. Platform balance) sem notar sex kraftnema, sem merktir eru með $a...f$ á myndum 36 og 37, til að mæla krafta eftir þremur ásum (X , Y , Z) og vægi um þá alla (mynd 36). Heildarkraftur í Z stefnu er kraftasumma kraftnema a , b og c .

$$F_z = a + b + c$$

Heildarkraftur í X stefnu er kraftasumma kraftnema d og e .

$$F_x = d + e$$

Kraftnemi f mælir svo kraftinn í Y stefnu.

$$F_y = f.$$

Vægi um Z ás er táknað með M_z og er fundið með því að reikna mismun krafta í X stefnu og margfalda með vægisarmi þeirra á miðpunkt vogarinnar sem er hálf lengdin w .

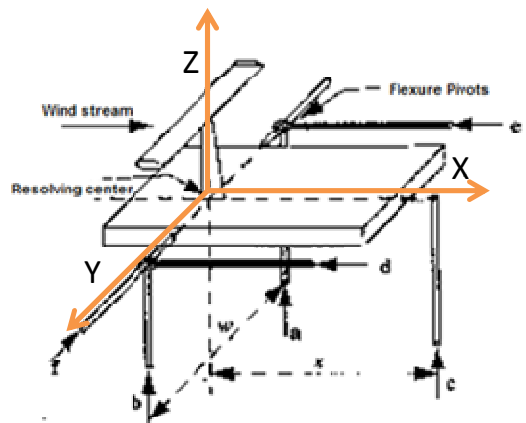
$$M_z = (e - d) \left(\frac{1}{2} w \right)$$

Vægi um X ás er táknað með M_x og er mismunur þeirra þátta lóðréttu kraftsins sem hafa vægisarm á X ás, a og b , margfaldaðir með vægisarminum sem aftur er hálf lengdin w .

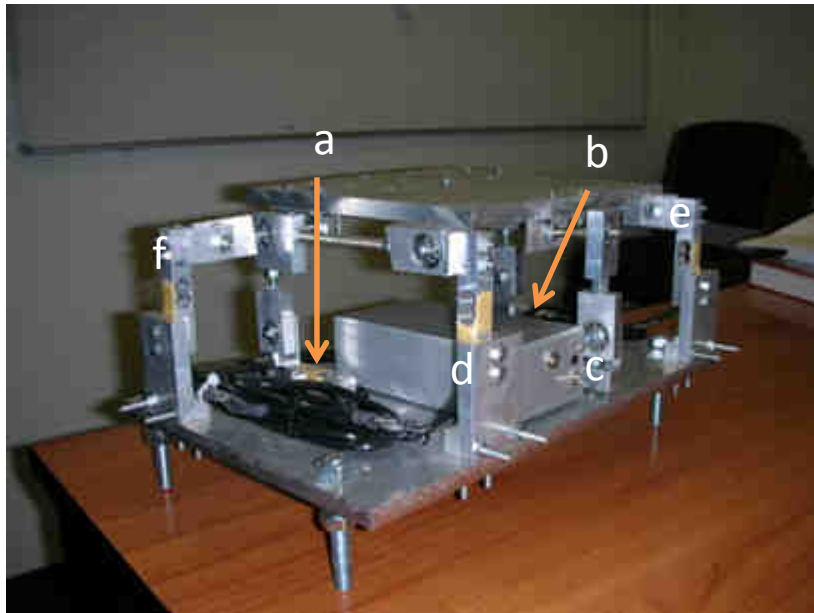
$$M_x = (a - b) \left(\frac{1}{2} w \right)$$

Að lokum er vægið um Y ás reiknað með c þætti lóðréttu kraftsins margfaldaður með vægisarmi á Y ás sem er lengdin x .

$$M_y = cx$$



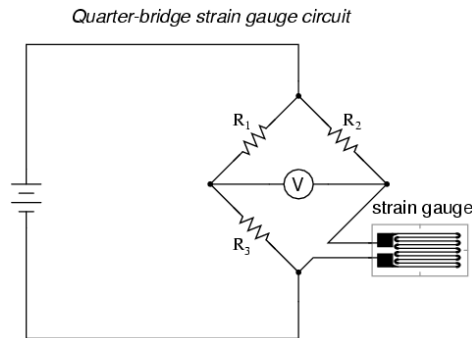
Mynd 36: Skemamynd kraftvogar (Barlow, Rae, & Pope, 1999). Búið að merkja inn mæliása vogarinnar



Mynd 37: Kraftvog (35 x 20 x 12cm mælt frá plötu) búinn að merkja kraftnema.

3.5.1 Búnaður og virkni

Kraftnemarnir í voginni eru aflögunarmælar sem virka þannig að togviðnám (e. strain gauge) er fest á yfirborð efnisstangar með einhverskonar lími og þegar kraftur er settur á stöngina teygist á togviðnáminu og það lengist og mjókkar þannig að viðnám þess eykst og þar af leiðandi hækkar spennan í samræmi við lögmál Ohms. Á sama hátt minnar viðnám togviðnámsins sé því þjappað saman (mynd 39). Á mynd 38 er dæmigerð rásarteikning af einföldu aflögunarmælakerfi þar sem spennufall er mælt yfir tengingu sem nefnist Wheatstone brú. $R1$ og $R3$ eru tvö jafn stór viðnám og $R2$ er jafnstórt togviðnáminu þegar ekkert álag er á stöngina. Viðnámín eru tvær hliðtengdar raðtengingar og svo lengi sem viðnámín innan raðtengingana eru þau sömu þá er spennufallið 0V. Köllum $R1$ og $R3$ rás A og $R2$ ásamt togviðnáminu rás B. Þegar álag er sett á nemann tognar á togviðnáminu og viðnám þess eykst. Nú er viðnám $R2$ orðið minna en helmingur viðnáms rásar B og spennan í miðpunkti hennar lægri en í miðpunkti rásar A. Þá er orðið mælanlegt spennufall milli miðpunktana. Þessi tenging nefnist kvartbrú þar sem eitt af fjórum viðnámunum brúarinnar er togviðnám. Wheatstone brýrnar í voginni okkar eru hálfbrýr þar sem $R2$ er einnig togviðnám. Togviðnámín eru límd sitt hvoru megin á stöngina. Sé sett álag á stöngina verður annað viðnámið fyrir togi meðan hitt þjappast saman. Þetta skilar sér í betra viðbragði við álagi ásamt því að bæta upp fyrir skekkjur vegna hitastigsbreytinga. Þar sem breytingin í viðnámunum er sú sama þá helst hlutfallið milli þeirra óbreytt. Aflögunarmælakerfi eru yfirleitt keyrð við lágan straum vegna þess að togviðnámín eru mjög efnislítill og þar af leiðandi viðkvæm fyrir ofhitnun. Hitinn breytir eiginleikum viðnámsins sem veldur ónákvæmni í mælingum. Þessi litli straumur og litlu breytingar í viðnámi verða þess valdandi að merki frá mæli eru mæld í milli- eða míkró voltum. Til að fá skýrt og greinilegt merki til aflestrar er merkið sent í gegnum magnara. Í okkar tilfelli erum við með sexfaldan AD627 mælímagnara (e. Instrumentation Amplifier), einn fyrir hvern mæli. Er merki frá hverjum nema magnað upp 1000 falt til að fá skýrt merki. Þetta merki er fer inn á gagnasafnara, NI USB-6008 (8 input; 12-bit), sem breytir merkinu yfir á stafrænt form.



Mynd 38: Wheatstone brú (All About circuits, 2011). Dæmi um kvartbrú þar sem eitt af fjórum viðnámsum er togviðnám.

3.5.2 Kvörðun

Séu kraftnemar vandaðir og vel gengið frá togviðnámsum er hægt að ganga út frá því að samband milli krafts og spennu sé línulegt. Þar sem að færslu á enda kraftnemanna má reikna með eftirfarandi jöfnu fyrir niðurbeygju á innspenntum bita (mynd 39).

$$F = \frac{3EI}{L^3} y$$

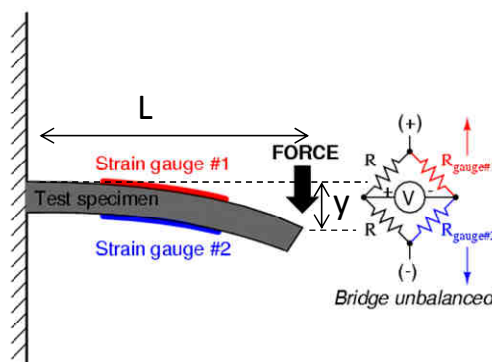
Þar sem y er lóðrétt færsla á bita enda. F er kraftur, E er fjaðurstuðull efnis, I er tregðuvægi og L er lengd bita. Þar sem L , I og E eru fastar er fast línulegt samband milli F og Y . Einnig er lenging viðnámsins í beinu hlutfalli við færsluna y sem er háð staðsetningu togviðnámsins. Togviðnámið lengist því í beinu hlutfalli við stærð kraftsins F . Togviðnámið hefur fast rúmmál;

$$V = L_{\text{viðnám}} \cdot A_{\text{viðnám}}$$

og viðnám þess reiknast eins og fyrir venjulegan vír samkvæmt;

$$R = \frac{\rho * L}{A}$$

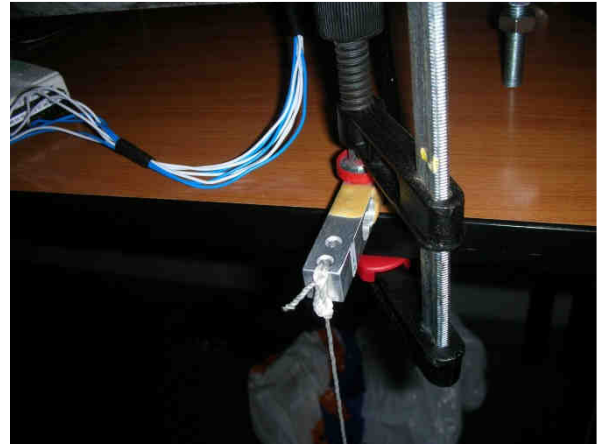
þar sem ρ er eðlisviðnám vírefnisins (fasti). Þá eru einu breytur lengd og þverskurðarflatarmál togviðnámsins. Þar sem þær eru háðar hvor annari og við höfum sýnt hvernig lengd viðnámsins er línulega háð kraftinum sem verkar á nemann verður viðnámið R eingöngu háð hlutfallinu milli L og A . Þótt að raunverulega sé sambandið milli spennu og krafts í kraftnemum með togviðnámsum ekki alveg línulegt þá er það góð nálgun.



Mynd 39: (t.h.) Togviðnám 1 lengist og viðnám þess eykst. Togviðnám 2 stytst og viðnám þess minnkar.(T.v.) dæmi um hálfbrú líkt af þeirri gerð sem notuð er í voginni.



a)



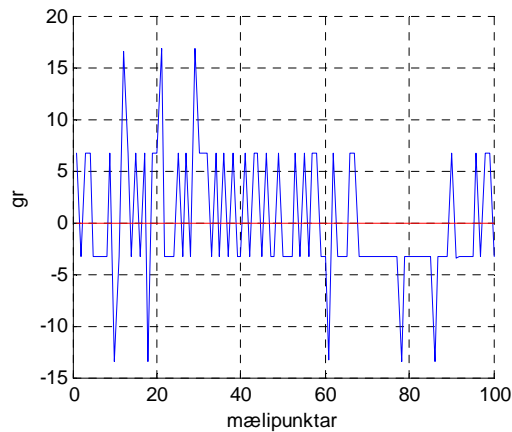
b)

Mynd 40: a) lóð hengd í einn kraftnema. b) neminn festur við borðbrún með þvingu

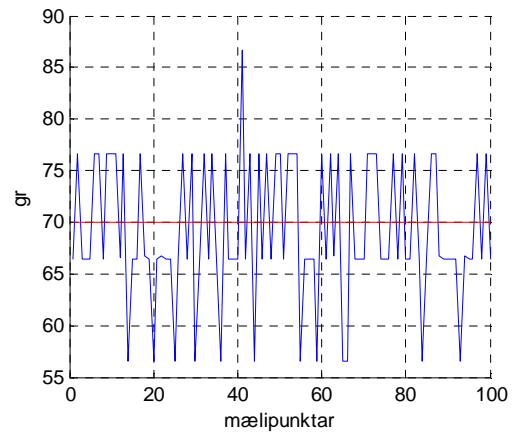
Í tilraun til að kvarða vogina var hún tekin í sundur og gerðar mælingar hverjum og einum nema. Nemunum var stillt upp einum í einu á borðbrún og festir með þvingu (mynd 40). Mælt var fyrir nemunum þannig að sá hluti nemans sem stæði inná borðinu væri sá sami og væri festur við undirstöður vogarinnar. Þá voru hengd lóð í nemann og mældar 5 þyngdir á bilinu 0 – 1000 grömm. Hver mælipunktur er meðaltal mæligilda sem safnað var á 5 sekúndum. Nemarnir voru mældir tvisvar í sitt hvora áttina og meðalhallatala mælingana notuð til að lýsa sambandi spennu og krafts. Tafla 4 sýnir hallatölur línulegra nálgana við mæligögnin og fylgni. Fylgnin er í öllum tilvikum 99,98% eða hærri og því hægt að reikna með því að samband spennu og krafts hegði sér í þessu sama hlutfalli á öllu mælisviði nemanna. Að þessari greiningu lokinni var vogin sett saman og prófuð.

Tafla 4: Hallatölur kraftmæla

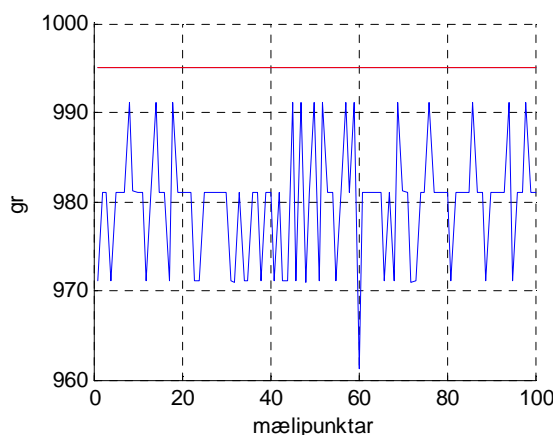
Nemi og átt	Hallatala (gr/v)	Fylgni
a+	995.97	0.9999
a-	-987.59	1.0000
b+	976.68	0.9999
b-	-979.64	0.9999
c+	983.24	0.9999
c-	-983.11	0.9999
d+	1032.61	0.9999
d-	-1029.10	0.9999
e+	1009.43	0.9998
e-	-1011.64	0.9999
f+	1021.38	0.9999
f-	-1012.68	0.9999



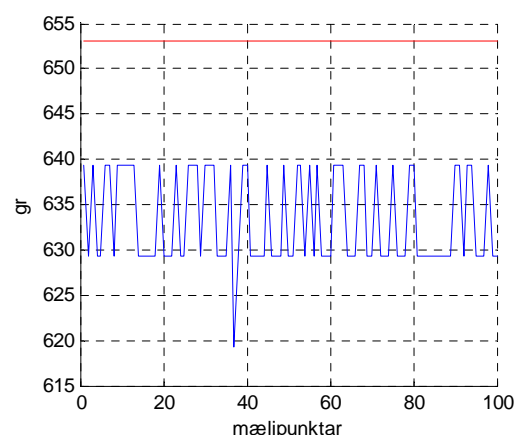
Mynd 41: 0 gr



Mynd 42: 70 gr



Mynd 43: 995 gr



Mynd 44: 653gr. Vigt núlluð við raunálag 995gr

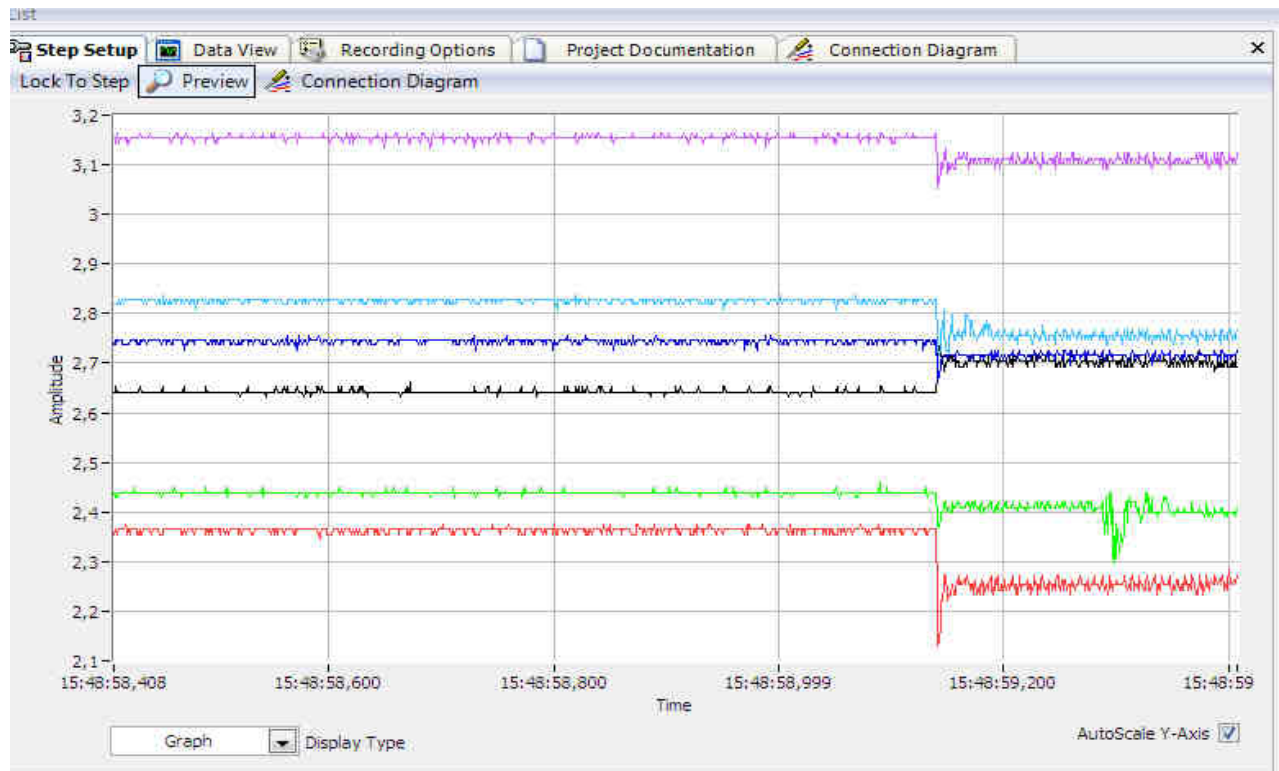
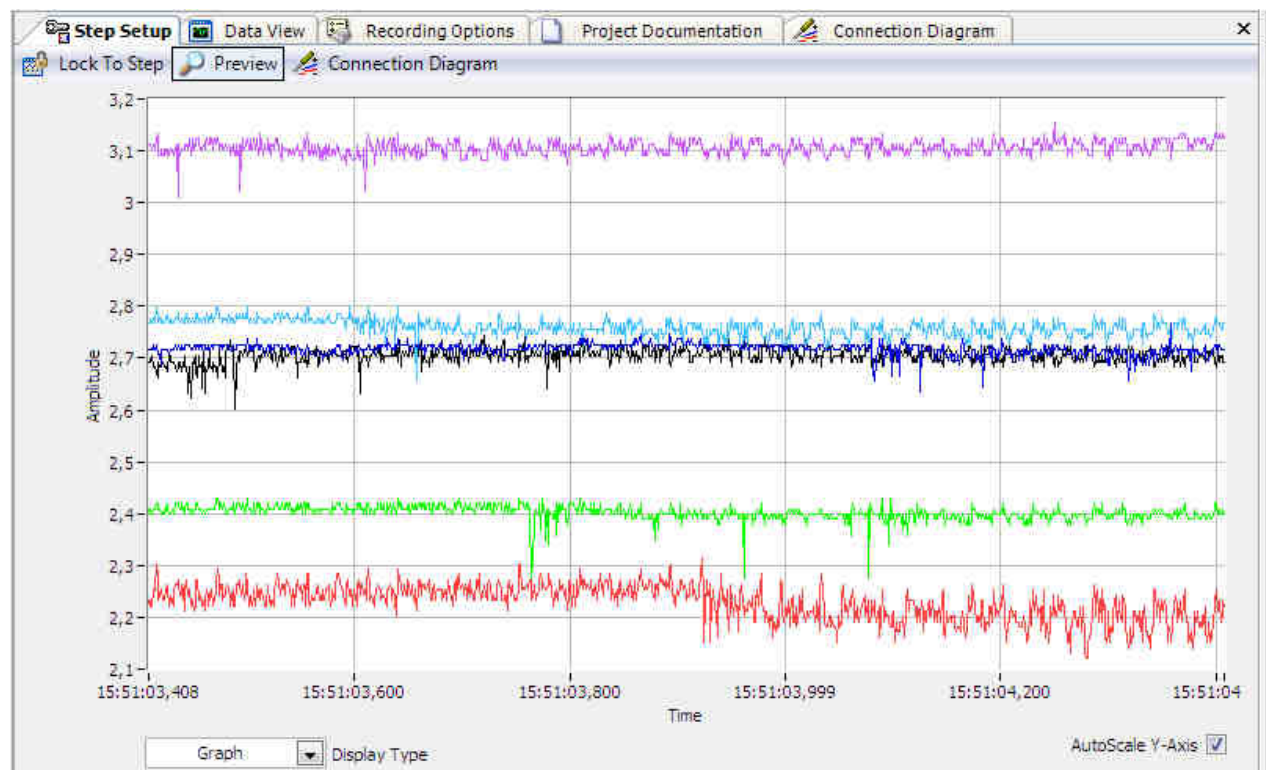
3.5.3 Tímaháðar kraftmælingar

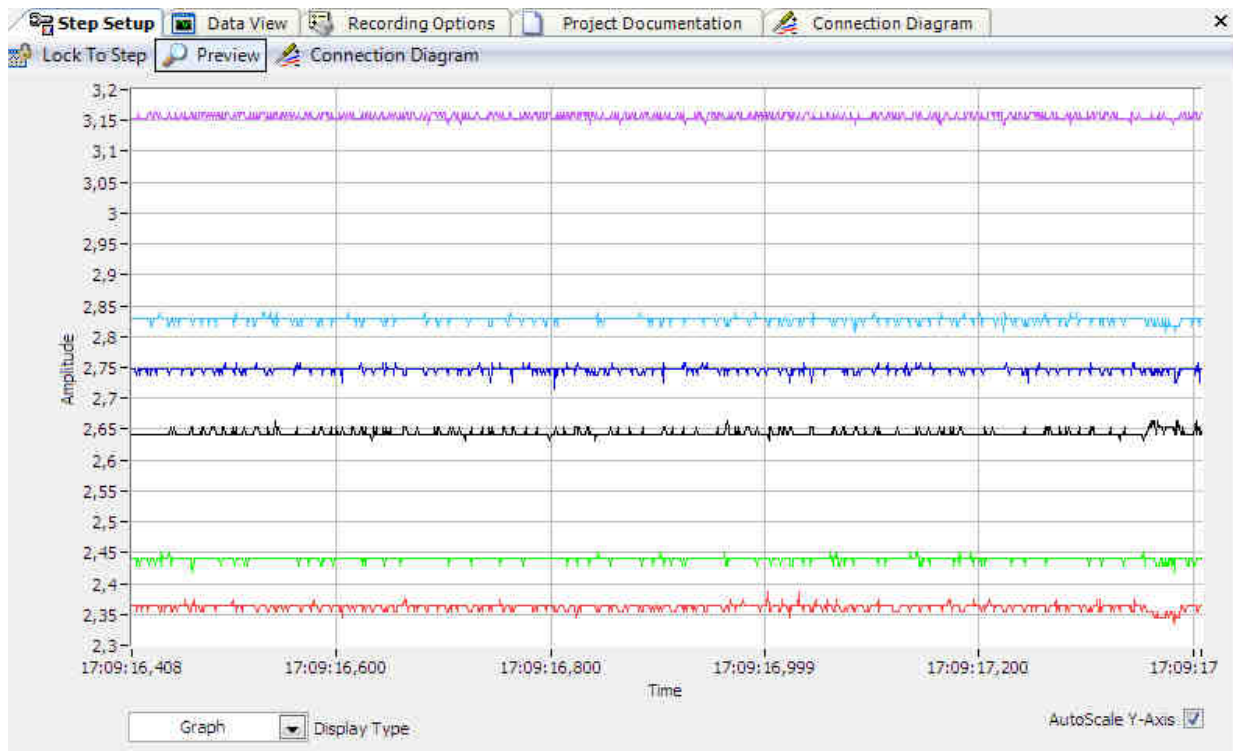
Á mynd 41 til 44 má sjá mældan kraft sem fall af tíma í 5 sekúndur með söfnunar tíðninni 20 Hz. Raunþyngd er merkt með rauðri línu. Af gröfunum má sjá að upplausnin í mælingunni er um 10 grömm og að auki er miðgildið oft langt frá raunþyngd. Þessi ónákvæmni þótti okkur óásættanleg en ásættanlegt hefði verið að miðgildi væri ekki meira en um 5 grömm frá raunverulegu gildi. Slæm upplausn útskýrist af því að gagnasöfnunarbúnaðurinn vinnur á ± 20 V og er einungis 12 bita. Þá reiknast mæliupplausnin samkvæmt:

$$\frac{V}{2^{bit}} * hallatala = \frac{40}{2^{12}} * 1020 = 9,961[grömm]$$

Þessi upplausn er breytileg eftir nemum þar sem hallatalan fer úr 977 upp í 1031. Til að laga þetta þarf að fá annan gagnasafnara með hærri bitatölu sem skiptir þar af leiðandi 40V spennusviðinu í fleiri bil. Annar möguleiki væri að þrengja 40V sviðið niður í 20V eða 10V en þrátt fyrir ítarlegar tilraunir náðist ekki að þrengja mælisviðið í Matlab, sem notað var sem viðmót.

Síðasta sumar kom upp annað vandamál með vogina tengt rafsegultruflunum frá vindgöngunum. Þessar truflanir lýstu sér þannig að þegar kveikt var á göngunum tók gagnasafnarinn upp mikið suð sem gerði mælingar ómarktækar. Þetta var að mestu lagfært með því að yfirfara mótortengingar og jarðtengja alla vindgangasamstæðuna en suðið hvarf þó ekki alveg. Myndir 45 til 47 sýna spennugildi á tíma fyrir alla nemanna fyrir öll tilföll.

*Mynd 45: Kveikt á mótör**Mynd 46: Mótör í gangi*



Mynd 47: Mótor í gangi. Búið ganga betur frá tengingum.

Til að draga saman, þá eru þeir þættir sem eru í ólagi í voginni eftirfarandi:

- Upplausnin í mælingunni er ekki nógu góð.
- Miðgildi tímaháðra mælinga er oft langt frá því gildi sem verið er að mæla, þannig að vogin mælir vitlaust.
- Einhverjar truflanir eru frá segulsviði en óvíst er hversu mikið vægi sú skekkja hefur.

Til þess að vogin verði nothæf þyrfti að fá annan gagnasöfnunarbúnað sem annað hvort hefur hærri bitatölu eða vinnur á þrengra spennusviði. Einnig má kanna hvort annar hugbúnaður bjóði uppá fleiri stillingar fyrir þennan söfnunarbúnað. Það að fá betri upplausn og nákvæmni í gagnasöfnunarbúnaðinn getur reynst nauðsynlegt til að geta lagt almennilegt mat á vægi annara skekkjuvalda því erfitt er að segja til um hvað orsakar skekkjuna í mælingunum. Hugsanlega var kvörðunin ekki nógu nákvæm, það getur verið þvingun í voginni eða jafnvel eru togviðnámín ekki nógu vönduð. Þegar fyrrnefndir þættir hafa verið skoðaðir og vogin er farin að mæla rétt er hægt að leggja mat á truflun frá hátíðnisuði. Sé suð frá vindgöngunum ennþá að valda skekkjum gæti hjálpað að nota skermaða víra til að tengja vogina við gagnasöfnunarbúnaðinn.

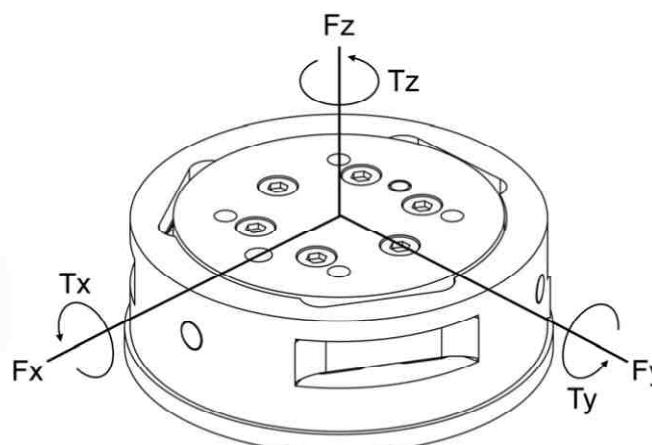
Ekki var farið ítarlegar í bilanagreiningu á voginni þar sem að önnur kraftvog fékkst að láni. Það þótti því ekki borga sig að nota meiri tíma í að reyna að koma þessari vog í lag. Voginni sem fékkst að láni er lýst í næsta kafla þessarar skýrslu.

3.6 ATI – kraftvog

Vogin sem fengin var að láni og var á endanum notuð er af gerðinni Delta IP68 Transducer og framleidd af ATI Industrial Automation (mynd 48). Vogin er úr ryðfríu stáli og vatnsheld upp að þrýsting sem samsvarar 10 m vatnssúlu. Togviðnám vogarinnar eru úr kísil, en slík togviðnám skila merki sem er 75 sinnum sterkara en merki frá hefðbundnum togviðnámum (ATI Industrial Automation, 2011). Þar sem vogin er ætluð til iðnaðarnotkunar er vel gengið frá skermingum á köplum og tengjum. Frágangur á skermingum, efnisval og val á togviðnámum skilar því að vogin er ekki jafn viðkvæm fyrir truflunum frá rafsegulsviði eins og heimasníðaða vogin. Vogin er kvörðuð hjá framleiðanda samkvæmt staðli ISO9001. Til eru nokkrar mismunandi gerðir kvarðana fyrir vogina, en þessi tiltekna vog er kvörðuð samkvæmt kvörðun SI-330-30. Í töflu 5 má sjá helstu upplýsingar um kvörðunina og þá mæliupplausn sem að henni fylgir. Endurkvörðun vogarinnar fer aðeins fram hjá framleiðanda (ATI Industrial Automation, 2011). Á mynd 49 má sjá hvernig mæliásar vogarinnar eru skilgreindir.



Mynd 48: Delta IP68 frá ATI Industrial Automation¹



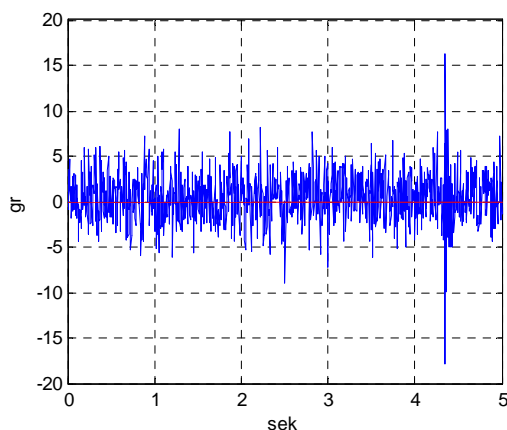
Mynd 49: Mæliásar vogarinnar

Tafla 5: Kvörðun kraftvogar.²

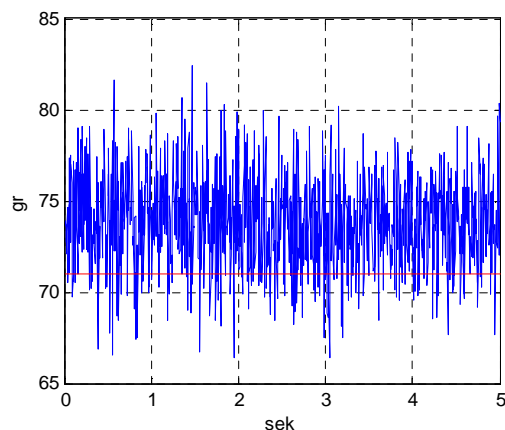
Kvörðun	F_x, F_y	F_z	T_x, T_y	T_z	F_x, F_y	F_z	T_x, T_y	T_z
SI-165-15	165 N	495 N	15 N-m	15 N-m	1/32 N	1/16 N	1/528 N-m	1/528 N-m
SI-330-30	330 N	990 N	30 N-m	30 N-m	1/16 N	1/8 N	5/1333 N-m	5/1333 N-m
SI-660-60	660 N	1980 N	60 N-m	60 N-m	1/8 N	1/4 N	10/1333 N-m	10/1333 N-m
	MÆLISVIÐ				UPPLAUSN			

¹ (ATI Industrial Automation, 2011)

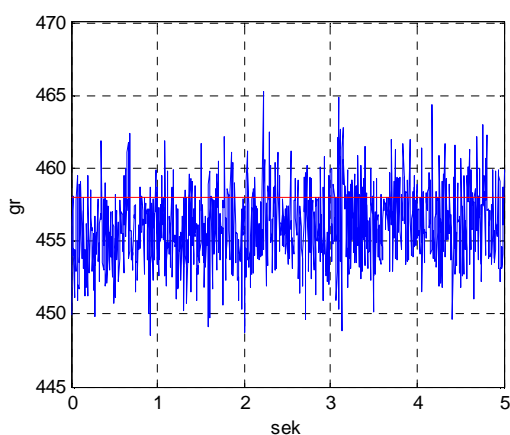
² Tafla: http://www.ati-ia.com/products/ft/ft_models.aspx?id=Delta+IP65%2fIP68 (19.11.2011)



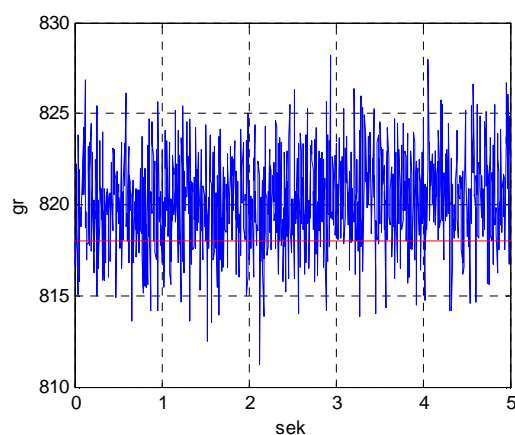
Mynd 50: Raungildi álags: 0 gr.



Mynd 51: Raungildi álags: 71 gr.



Mynd 52: Raungildi álags: 458 gr.



Mynd 53: Raungildi álags: 818 gr.

Þegar við fengum vogina í hendurnar virkaði hún ekki sem skildi. Eftir stutta bilanagreiningu kom í ljós að einn pinninn í tenginu var var lítilla tærður auk þess sem að tengið hafði snúist svo að pinnarnir hittu ekki í klónna, sem staðsett er í tengiboxi vogarinnar. Með því að nota ryðvökva var tæringin hreinsuð af. Þá var tengill losaður í sundur og honum snúið svo að hann passaði í klónna. Eftir það virkaði vogin rétt. Með voginni fylgdi notendavænt viðmótsforrit sem að nýtt var til þeirra mælinga sem framkvæmdar voru með voginni. Vogin var prófuð með því að setja þekkt álag á hana og reyndist nákvæmnin talsvert meiri heldur en sú sem að heimasíðaða vogin bauð upp á. Á myndum 50 til 53 má sjá samanburð mælimerkis og raunálags, til samanburðar við heimasíðuðu vogina.

Eins og áður sagði voru þær kraftmælingar sem að gerðar voru í þessu verkefni framkvæmdar með umræddri kraftvog. Að mestu leyti heppnuðust þær mælingar vel, þó kom upp vandamál þegar kraftmælingar voru framkvæmdar á kyrrstæðum vængjum. Sökum þess að vogin er vatnsheld er lóðrétti kraftneminn lokaður af inn í loftþétu rými og er hann þarf af leiðandi viðkvæmur fyrir breytingu í umhverfisþrýstingi, en þegar að vindgöng eru sett í gang lækkar sá þrýstingur samkvæmt jöfnu Bernoullis. Því kom fram föst skekkja sem erfitt var að útskýra, en eftir að við áttuðum okkur á þessum eiginleika vogarinnar var skekkjan leiðrétt með mælingum á henni. Nánari umfjöllun um þessa skekkju og leiðrétingu hennar er að finna í kafla 5.8 um kraftmælingar á kyrrstæðum vængjum.



Mynd 54: Áfallsprýstimælir staðsettur í smærri vindgöngum.

3.7 Áfallsprýstimælir (e. pitot tube)

Hægt er að mæla vindhraða með margs konar mismunandi tækjum. Ein af einfaldari gerðum slíkra mæla er svokallaður áfallsprýstimælir og er einn slíkur staðsettur í aðstöðunni (mynd 54). Slíkur mælir er í grunninn mjög einfaldur, í rauninni samanstendur hann aðeins af röri með tveimur götum, einu að framan, sem er látið standa beint á móti streymisátt og öðru á hliðinni, með stefnu hornrétt á streymisátt. Þegar loftstreymið streymir inn um framendann ferðast það í gegnum slöngur að þrýstinema, sem er vatnsfylltur. Frá hliðargatinu, sem nemur kyrruþrýsting (e. static pressure) er svo tengd slanga að hinum enda þrýstinemans. Við það myndast mismunur í vatnshæð, Δh , sem er mælikvarði á mismun svokallaðs heildarþrýstings (e. total pressure) og stöðuþrýstings (e. static pressure) loftstreymisins. Sá mismunur kallast hreyfiþrýstingur (e. dynamic pressure, q). Þegar hreyfiþrýstingur er þekktur, sem fall af lóðréttri vegalengd vatnssúlu, er einfalt mál að túlka hann yfir í vindhraða (v) samkvæmt¹:

$$v = \sqrt{\frac{2 \cdot q(\Delta h)}{\rho_L}} = \sqrt{\frac{2 \cdot (\rho_v \cdot g \cdot \Delta h)}{\rho_L}}$$

þar sem að ρ_L og ρ_v tákna eðlismassa loftstreymisins og vatnsins og g stendur fyrir þyngdarhröðun. Þægilegt er að notast við áfallsprýstimæla til mats á meðalvindhraða og má nefna sem dæmi að hraðamælar flugvéla nýta slíka mæla til að mæla flughraða sinn (Shevell, 1989). Þó henta mælarnir ekki jafnvel til mats á iðustreymi, þar sem þörf er á meiri mæliupplausn og nákvæmari skrásetningu mæligilda með tilliti til tíma.

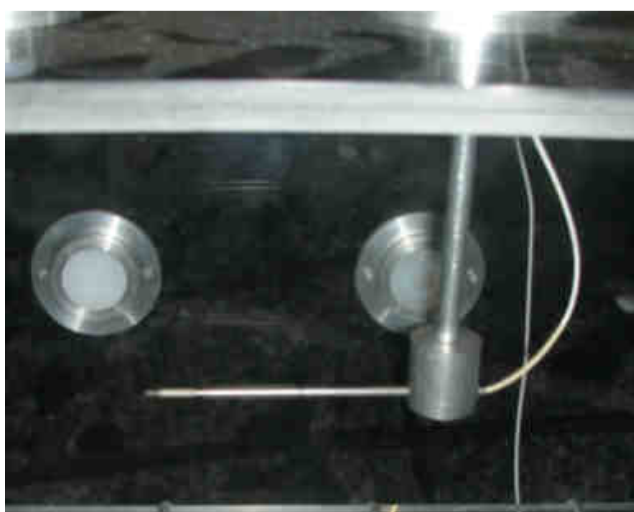
¹ (Shevell, 1989)

3.8 Jafnhitavindhraðamælir (e. constant temperature anemometer, CTA)

Í iðustreymisrannsóknum (e. turbulence measurements) er, eins og áður sagði, nauðsynlegt að geta skráð vindhraða sam fall af tíma með hárrí upplausn. Ástæðan er sú að iðustreymnir hvirflar geta verið af öllum stærðum, allt frá örsmáum sem eyðast fljótt vegna seigju loftsins upp að stærð sem að takmarkast eingöngu af jaðarskilyrðum eins og breidd inntaks, í tilfelli vindganga. Ein gerð mæla sem hagnýta má í slíkum mælingum nefnist jafnhitavindhraðamælir, sem er ein tegund af fjölskyldu mæla sem kallast heitvírsvindmælar (e. hot wire anemometers). Einn slíkur, frá danska fyrirtækinu Dantec Dynamics, er staðsettur í aðstöðunni. Mælirinn sá er ætlaður fyrir mælingar í iðustreymi í gösum við hófleg hitastig. Hægt er að nota mælinn í allt að 100 m/s vindhraða¹. Mælirinn er búinn örfínnum vír úr wolfram sem staðsettur er hornrétt á straumstefnu í mælingum. Þegar loftstreymi berst að vírnum kælir það hann niður, því meira eftir því sem að straumhraðinn eykst. Við það leitast sérstök rafrás við að hita hann upp aftur að óskhitastigi (e. reference temperature) með því að auka rafstraum í gegnum hann. Þar sem rafviðnám vírsins á mismunandi hitastigum er þekkt verður rafstraumurinn, samkvæmt lögmáli Kirchoffs, mælikvarði á vindhraða. Mynd 55 sýnir vindnemann staðsettan í smærri vindgöngunum, þar sem verið er að kvarða hann.

3.8.1 Lýsing og virkni

Mynd 56 sýnir uppsetningu mælisins, en hún samanstendur af nokkrum hlutum. Fremst í röðinni er nemi (e. probe) sem búinn er örfínnum vír úr wolfram (e. tungsten) sem er 1,2 mm á lengd og 5 μ m í þvermál. Til varnar þessum viðkvæma búnaði er hlífðarkápa sem hægt er að renna aftur þegar mælirinn er í notkun og síðan fram þegar hann er ekki í notkun. Í skynjarann er föst 1 m löng snúra sem tengist síðan í gegnum 4 m langa snúru við jafnhitavindhraðamælitækið sjálft, sem er af gerðinni MiniCTA, til að tryggja rétt viðnám í snúrum. Hann inniheldur jafnhitavindhraðamælarás (e. constant temperature anemometer circuit) sem inniheldur heilbrú og ferjald (e. signal conditioner) sem magnar upp og sýar innmerkið áður en það fer í frekari vinnslu. Þrjú tengi eru á tækinu, tvö BNC tengi (annað fyrir inntak og hitt fyrir úttak) og það þriðja fyrir 12V jafnstraumsspennubreyti. Síðasta tækið sem merkið kemur við áður en það fer í tölvu til aflestrar má útleggja á íslensku sem gagnasöfnunarbúnaður (e. DAQ, Data Acquisition) og er frá fyrirtækinu National Instruments. Hlutverk þess er að breyta merkinu frá jafnhitavindhraðamælinum yfir á 16-bitu stafrænt form. Þaðan er merkið tekið inn í tölvu í gegnum USB tengi til aflestrar og vinnslu.



Mynd 55: CTA – nemi staðsettur í smærri vindgöngunum.

¹ MiniCTA user guide.

3.8.2 Samband rafstraums og vindhraða

Lögmál King's um kælingu vírs í vökvastreymi sem almennt má leggja út sem (Doebelin, 2004):

$$h = C_0 + C_1 \cdot \sqrt{v} \quad (1)$$

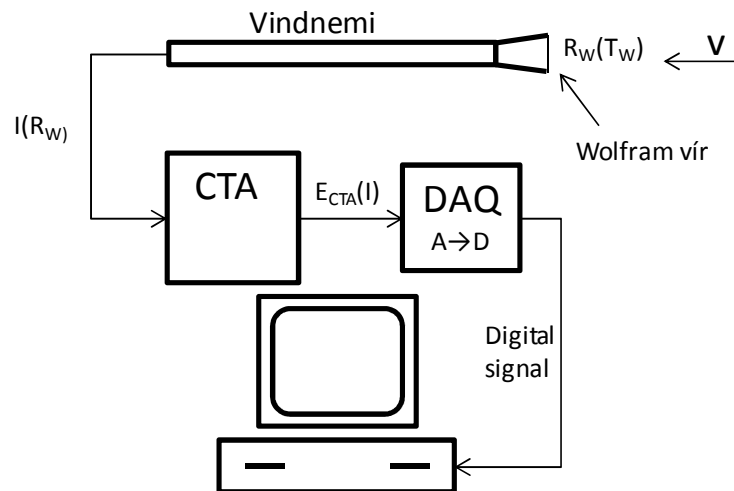
þar sem h er varmaburðarstuðull vírsins, v er vindhraði með ákveðna eðlisþyngd (hitastig) og C_0 , C_1 eru fastar sem ákvarðast með kvörðun. Fyrir varmajafnvægi í vírnum þarf að uppfylla, samkvæmt kæliögmáli Newtons:

$$I^2 \cdot R_w = h \cdot A \cdot (T_w - T_f) \quad (2)$$

þar sem I er rafstraumur, R_w er viðnám vírsins (háð hitastigi T_w), A er flatarmál vírsins, T_w er hitastig vírsins og T_f er hitastig loftsins. Með samtengingu (1) við (2) má því almennt segja að samband innspennu og vindhraða sé:

$$I = \left[\frac{A \cdot (C_0 + C_1 \cdot v^{1/2}) (T_w - T_f)}{R_w} \right]^{1/2}$$

Úttaksspennugildi tækisins, E_{CTA} , er síðan fengið með því að meta spennugildið sem fæst þegar rafstraumurinn I streymir gegnum fast viðnám af þekktri stærð.



Mynd 56: Flæðirit af jafnhitavindhraðamæli.

4 Endurbætur á vindgöngum og kortlagning á streymiseiginleikum

Mat á umfangi og gæðum loftflæðis í gegnum vindgöng eru afar mikilvæg til þess að staðfesta hæfi þeirra til tilrauna. Í þeim tilgangi hefur því verið haldið fram að allra mikilvægast sé að leggja mat á iðustreymi (White, 1992), sem við metum með því að mæla vindflökt, það er sveiflur í vindhraða um meðalhraða sinn. Slíkt vindflökt hefur neikvæð áhrif á gæði rannsókna á þann hátt að það hrindir af stað óeðlilegum streymisaðskilnaði og þar af leiðandi verður mat á viðnámskrafti, lyftikrafti og hraðaferlum ekki rétt miðað við gefnar forsendur, sem á einhverju stigi innihalda ályktun um einsleitt streymi. Skekkjan er á þann veg að eftir því sem flöktið er meira verður streymisaðskilnaður framar á vængsniði. Ástæðan er rakin til flökts í staðbundinni Reynoldstölu, en fjöldamargar rannsóknir hafa staðfest áhrif breytilegra Reynoldstalna í flæði m.t.t. streymisaðskilnaðar (Manshadi, 2009). Til að koma í veg fyrir slíkar skekkjur á milli forsenda og raunveruleika hlýtur því sérhver vindgangahönnuður að vilja beita öllum tiltækum ráðum til að draga sem mest úr vindflökti, þ.e. iðustreymi, í gegnum göngin. Í því skyni hafa allmargar aðferðir verið þróaðar, sem þó hafa það sameiginlegt að byggjast mest á reynslu, enda skortir menn fullkomna fræðilega þekkingu á fyrirbærinu iðustreymi. Þó hafa allnokkrir sett fram sitt sjónarhorn með því að lýsa fyrirbærinu með tilliti til þekktra hugtaka í eðlisfræði. Í einni slíkri lýsingu er fyrirbærinu lýst sem:

„Prívíðri, tímaháðri hreyfingu þar sem mismunandi hvirflastærðir valda vindhraðaflökti á öllum bylgjulengdum milli lágmarksstærðar sem skilgreind er af seigjukröftum og hámarksstærðar sem skilgreinist af jaðarskilyrðum flæðisins. Á öllum nema lágum Reynoldstölum er iðustreymi hið venjulega ástand vökvastreymis“¹

Af þessu má ráða að það að ná fram fullkomlega lagstreymnu flæði sé ekki sjálfsagður hlutur, enda lagstreymi í eðli sínu óstöðugt, nema í lághraðatilfellum þar sem seigjukraftar eru ríkjandi. Mælingar í vindgöngum fara eins og gefur að skilja fram á slíku streymishraðabili að slíkir kraftar verða hverfandi litlir samanborið við tregðukrafta í streyminu. Okkar eina tæki til að vinna gegn hvirflamyndunum liggur því í því að hafa stjórn á jaðarskilyrðum flæðisins til að draga úr iðustreymi. Þannig verðum við, sem höfum áhuga á slíkri temprun, að setta okkur við það hlutskipti að þreifa okkur áfram með reynslu annarra, tölfræðilegar aðferðir og skynsamlega gagnaframsetningu að vopni.

4.1 Þekktar aðferðir til lágmarkunar vindflökts

Nokkrum aðferðum hefur verið beitt til að ná fram einsleitu flæði í vindgöngum. Í gegnum tíðina hafa þessar aðferðir þróast og einangrast þannig að þegar smíða á ný vindgöng í dag er aðeins um nokkur atriði að velja sem yfirleitt eru öll hagnýtt á einhvern hátt.

4.1.1 Hönnun inntaks

Inntakshluta vindganga má skipta í þrennt, bjöllumör, setklefa og þrengingu. Allir hafa hlutarnir sínum tilgangi að þjóna, bjöllumörin sér um að stefna lofts sem sogast inn í göngin frá jöðrum inntaks sé sem mest samsíða öðru lofti sem sogast inn áður en í setklefann kemur. Hún þarf eins og nafnið gefur til kynna að hafa slétt, rúnnað yfirborð og að auki að fylgja aðvífandi lofti í gegnum a.m.k. 90°stefnubreytingu. Setklefinn hefur það hlutverk að draga úr og jafna út þá þætti vindhraðans sem eru

¹ Bein þýðing. Á frummálinu útleggst skilgreiningin sem: “A three-dimensional time-dependent motion in which vortex stretching causes velocity fluctuations to spread to all wavelengths between a minimum determined by viscous forces and a maximum determined by the boundary conditions of the flow. It is the usual state of fluid motion except at low Reynolds numbers.” (Bradshaw, 1996)

ekki í flæðisstefnu. Þótt að freistandi sé að hafa þennan hluta ganganna sem lengstan til að fá sem mesta einsleitni í flæðistefnu hefur verið bent á að óhófleg lengd setklefans sé ekki æskileg þar sem að aukinni lengd fylgir þykking jaðarlags frá yfirborði og þar með iðustreymi í gegnum vindgöngin. Því er mælt með að hafa lengd setklefa um helming af þvermáli inntaks (Barlow, Rae, & Pope, 1999). Þegar kemur að þrengingunni á hraðadreifing flæðisins að vera orðin tiltölulega einsleit. Með því að hafa þrenginguna smám saman mjókkandi, með engu broti í ferlinum, hraðar flæðið jafnt og þétt á sér gegnum hana samkvæmt lögmáli um massavarðveislu. Samhliða þeirri hraðaaukningu fylgir lækkun loftþrýstings samkvæmt lögmáli um varðveislu orku. Þrenging lækkar vindhraðaflökt í beinu hlutfalli við aukinn vindhraða í gegnum hana, þar sem að sömu hvirflarnir eða iðustreymisskalarnir og bærust inn um inntak ganganna, með tilheyrandi vindflökti, eru bornir áfram óbreyttir í gegnum göngin meðan að vindhraði er að aukast (Soltani, Ghorbanian, & Manshadi, 2010). Við ákvörðun á lengd og lögun þrengingar verður að gæta þess að lengdin sé ekki of mikil vegna þykkingu jaðarlags. Of stutt þrenging leiðir á hinn bóginn af sér hraðapætti sem eru ósamsíða flæðistefnu, með tilheyrandi streymisaðskilnaði við enda þrengingarinnar. Af þeim sökum er ráðlegt að fara út í einhvers konar bestun á þrengingarferlinum, t.d. með hjálp straumfræðilíkana, miðað við það vindhraðabil sem áætlað er að vindgöngin starfi á, áður en ráðist er í smíði. Þrengingarhlutfall, þ.e. hlutfall flatarmáls loftstreymis fyrir og eftir þrengingu, er einnig ráðlegt að velja af kostgæfni þar sem að hátt hlutfall tryggir minni þrýstitöþ í gegnum inntakið með minni streymishraða í gegnum flæðiréttara (e. honeycomb) og inntaksnet (e. turbulence screens). Á hinn bóginn, fyrir ákveðið flatarmál mælisniðs í mæliklefa (e. test section), kallar hátt þrengingarhlutfall einnig á meiri efnisnotkun og meira pláss fyrir inntakshlutann. Því er þrengingarhlutfallið eitt af því fyrsta sem ákveða þarf áður en farið er út í hönnun vindganga fyrir fyrirfram ákveðið rými og fjárhagsramma.

4.1.2 Flæðiþeinar (e. flow straighteners) og inntaksnet (e. turbulence reduction screens)

Þrátt fyrir að öllum góðum og gildum hönnunarreglum sé fylgt við hönnun vindganga er afar ólíklegt að gæði flæðisins verði ásættanleg án sérstakra flæðiþeina og inntaksneta. Flæðiþeinar hafa, eins og nafnið ber með sér, það hlutverk að rétta af loftstreymið sem í gegnum þá flæðir þannig að það verði laust við hraðapætti sem ekki eru samsíða straumstefnu. Í þeim tilgangi er oft notast við sexhyrnd gatamynstur (e. honeycomb) sem til að mynda eru framleidd til notkunar með áli í samlokuefni fyrir flugvélagólf. Tilraunir hafa sýnt að slík uppbygging valdi tiltölulega lágum þrýstitöþum. Þó má notast við hvaða annað efni sem er í sama tilgangi, svo sem drykkjarrör, flúrljósaskerma og fleira, en á kostnað hærri þrýstitöþa. Í öllum tilfellum hefur þó reynst hefur best að velja efni sem hefur poruhlutfall í kringum 80%, hlutfall lengdar og breiddar hvers hólf á bilinu 6 - 8 og að nægilegt sé að hafa 150 einstök hólf á hverja þvermálseiningu inntaks, eða um 22.500 hólf í heildina á hverjum vindgöngum (Barlow, Rae, & Pope, 1999). En þrátt fyrir að flæðiþeinar sinni sýnum tilgangi mjög vel, þ.e. að rétta af stefnu flæðisins, gerir hátt poruhlutfall þeirra það að verkum að þeir eru ekki mjög virkir í því að draga úr hraðamismun einstakra loftagna sem fara inn í gegnum inntakið. Í þeim tilgangi er notkun nokkura, fínófina neta í röð algengust. Þekkt er að viðnám á flæði frá föstum hlutum er nálægt því að vera í hlutfalli við annað veldi hraða flæðisins. Af því leiðir að viðnám netsins við staði þar sem streymishraðinn er hærri en á öðrum stað verður hlutfallslega hærri. Að auki verkar netið sem viðnám við flæðirásina í heild sinni og veldur þannig jöfnu þrýstingsfalli yfir allt flatarmál netsins (Prandtl, 1933). Þannig jafnar það hreyfi- og þrýstiorkunum loftagnanna sem að netinu koma áður en þær svo sogast í gegnum þrenginguna. Þar eykst hreyfiorka allra loftagna jafnt og sá litli munur sem var á hraða agnanna eftir inntaksnetin verður, þegar í mæliklefan er komið, aðeins lítið hlutfall af heildarhraða þeirra. Nokkrar hönnunarreglur hafa verið settar fram fyrir inntaksnet. Nægilegt bil þarf að vera á milli netanna til að iðustreymi sem fremra net framkallar hafi náð að hnigna nægilega mikið áður en að næsta neti kemur. Í því samhengi hefur verið mælt með því að hafa bil sem svarar til a.m.k. 30 möskvastærða milli neta. Groth og Johanson (1988) sýndu fram á að

umfang iðustreymis hækkar í raun fyrir aftan hvert net en lækkar svo aftur mjög hratt og hefur náð nýju jafnvægi eftir um 20 möskvastærðir. Ástæðuna rekja þeir til hvirflamyndana frá vírnum og skerlags milli vírs og möskva sem framkallar hátt hlutfallslegt smáskala iðustreymi sem hnignar fljótt. Þá sýndu þeir fram á að finna net, með minni möskvastærðum, draga meira úr iðustreymi en grófara fyrir gefið poruhlutfall. Að lokum komust þeir að því að tvö finni net saman draga ekki meira úr iðustreymi heldur en eitt grófara og eitt finna saman. Þar sem að tvö finni net valda hærri þrýstítöpum en síðari samsetningin er því mun skynsamlegra að velja net með mismunandi möskvastærðum og raða þeim í röð eftir stærð þannig að fínasta netinu sé stillt upp aftast. Út frá kostnaðarsjónarmiði má einnig áætla að slíkt fyrirkomulag sé heppilegra þar sem að verð slíkra neta hækkar vanalega með fínari möskvum og grennri vírþvermálum. Fínleika aftasta netsins má svo velja út frá því hversu smáa hvirfla vindgangahönnuður hefur áhuga á að brjóta upp. Poruhlutfall neta á að vera um eða yfir 57% þar sem að net með lægra hlutfalli þjást af óstöðugu flæði sem kemur fram í mæliklefa (Barlow, Rae, & Pope, 1999). Groth og Johanson (1988) segja hins vegar að fyrirbærið komi fram þegar hlutfallið er komið undir 50%. Til að gefa hugmynd um hversu mikið hægt er að minnka umfang iðustreymis með inntaksnetum getum við tekið dæmi úr skýrslu þeirra þar sem að þremur netum var stillt upp þannig að fremsta netið hafði 3,2 mm möskva og 0,5 mm vírþykkt, annað netið hafði 2,1 mm möskva og 0,5 mm vírþykkt og það þriðja og aftasta hafði 0,74 mm möskva og 0,19 mm vírþykkt. Niðurstaðan varð sú að umfang iðustreymis lækkaði úr 5,5% fyrir framan fremsta netið niður í 0,78% í eins metra fjarlægð fyrir aftan það aftasta.

4.1.3 Ofisræmur (e. stall strip, trip strip)

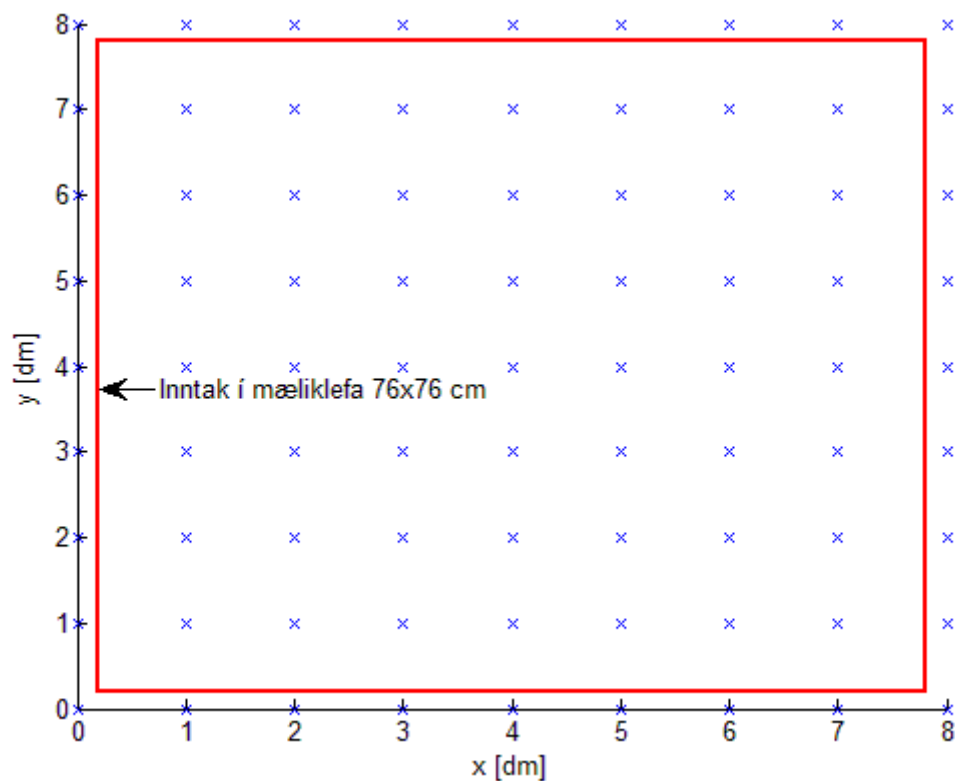
Notkun á ofisræma er vel þekkt á frambrún vængja flugvéla í þeim tilgangi að milda ofrishegðun. Er það gert með því að koma þeim þannig fyrir á frambrún vængs að þegar að vængurinn nálgast ofris “fellir” ofisræman lagstreymna jaðarlagið og umbreytir því yfir í iðustreymið. Þannig ofris vængurinn fyrr aftan við þann stað sem ræmunni er komið fyrir á en jafnframt verður ofrisið ekki jafn snögg eins og ef vængurinn væri ekki búinn ofisræmunni, þ.e. vængurinn viðheldur einhverjum lyftikrafti þrátt fyrir að hann sé ofrisinn. Ástæðan er sú að iðustreymið jaðarlag nær að halda viðloðun lengur en lagstreymið, þrátt fyrir öfugan þrýstistigul. Sýnt hefur verið fram á að notkun á slíkum ræmum getur verið mjög til bóta fyrir streymið í mæliklefa vindganga, sé hún að réttri stærð og rétt staðsett (Soltani, Ghorbanian, & Manshadi, 2010). Með því er átt við að lagstreymna jaðarlagið getur veikst það mikið við enda þrengingarhluta vindganganna að hætta verður á lagstreymnum streymisaðskilnaði, sérstaklega á lágum streymishröðum. Því getur verið æskilegra að hafa jaðarlag aftasta hluta þrengingarinnar iðustreymið til að tryggja betri viðloðun, þrátt fyrir að iðustreymið jaðarlag sé í öllum tilfellum þykkara heldur en lagstreymið. Í rannsókn sinni notuðust þeir félagar við gítarstreng sem límdur var á vegg þrengingar rétt fyrir enda hennar, á allar fjórar hliðar þannig að strengurinn var alls staðar staðsettur jafn langt frá úttaki þrengingar.

4.2 Tækjabúnaður

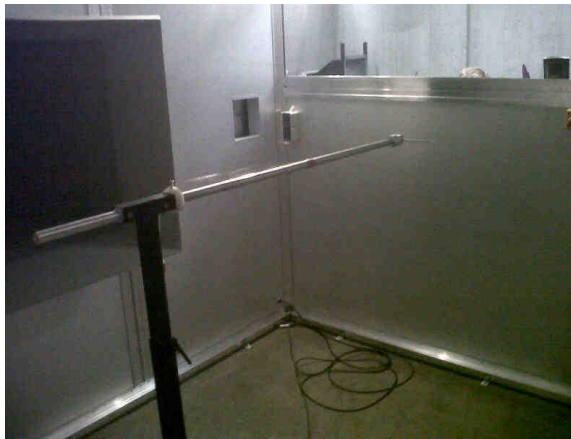
Til mælinga á vindhraða var notaður jafnhitavindhraðamælir (e. constant temperature anemometer, CTA), 16 bita stafrænn gagnasöfnunarbúnaður sem ræður við söfnunartíðni að 100 kHz og notendaviðmót frá fyrirtækinu Dantec Dynamics. Í öllum mælingum var söfnunartíðnin 10 kHz og fjöldi söfnunargilda 2^{16} . Söfnunartími hvernar mælingar var því rétt yfir 6,5 sekúndum. Mælt var í mælisniðum í 9×9 punkta hornréttu hnitakerfi sem skilgreint var yfir þversnið nothæfs flæðis í mæliklefa, þannig að á milli hvernar tveggja næstliggjandi punkta voru 10 cm í lárétta og lóðrétta stefnu (mynd 57). Í öllum mælingum er mælisnið staðsett 60 cm aftan við inntak mæliklefa sem jafngildir 1/3 af heildarlengd hans. Ástæðan fyrir þessu vali staðsetningar er sú að á þeim stað átti síðan að koma fyrir mælibúnaði fyrir tilraunir á föstum og blakandi vængjum.

Tafla 6: Kennitölur vindgangamælinga.

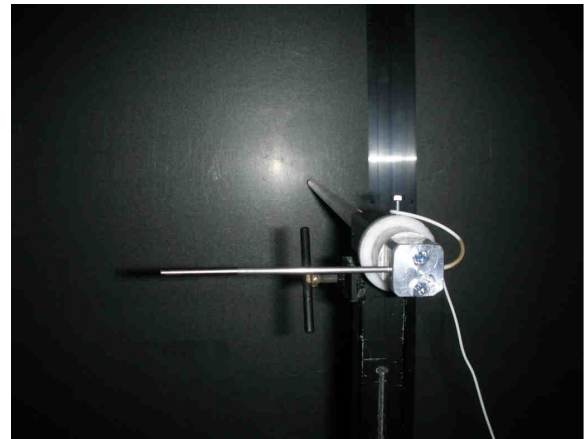
Söfnunartíðni	10 kHz
Söfnunargildi	$2^{16} = 65536$.
Söfnunartími	6,55 sek.
Hnitakerfi	9×9 punktar með 10 cm millibili.



Mynd 57: Hnitakerfi mælipunkta á mælisniði



a)



b)

Mynd 58: a) Mælistandur uppsettur í 33% af lengd mæliklefa. b) CTA vindhraðanemi áfastur við mælistand

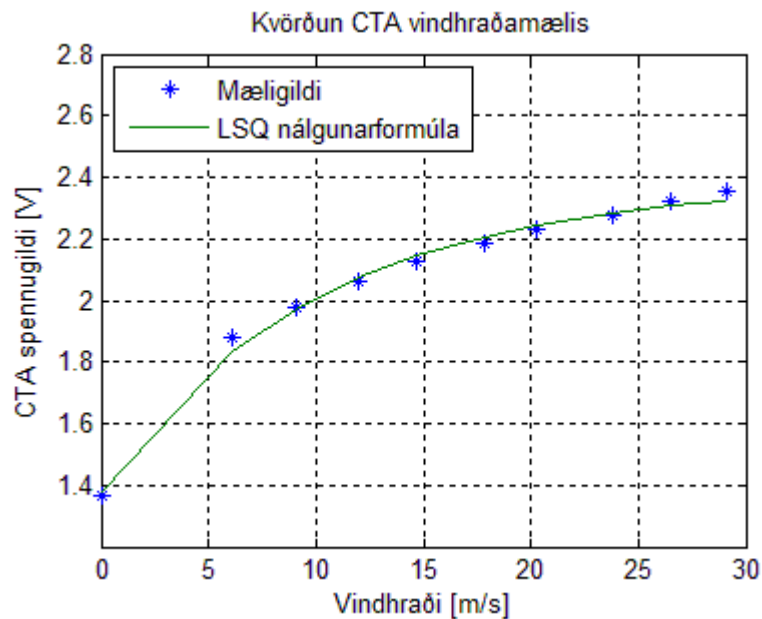
Sérsmíðaður var mælistandur til að færa vindhraðamælinn milli punkta í hnitakerfinu. Var hann látinn standa utan við mælisniðið þannig að aðeins láréttur festiarmur hans ásamt vindmælinum sjálfum stóð inn í flæðinu í hverri mælingu. Var mælinum beint upp í flæðið andsælis straumstefnu og mælirinn sjálfur staðsettur eins langt fyrir framan lárétta festiarminn eins og mögulegt var. Þannig var truflun á flæðinu af völdum mælistandsins lágmarkuð.

4.3 Kvörðun mælibúnaðar.

Notast var við smærri vindgöng til kvörðunar CTA vindhraðamælisins. Fór kvörðunin þannig fram að áfallsprýstimælir var notaður til að áætla meðalvindhraða í miðpunkti vindganganna þar sem snúningshraði viftu var stilltur með tíðnibreyti frá 10 - 50 Hz með 5 Hz millibili. Að því loknu var áfallsprýstimælirinn fjarlægður, CTA mælinum komið fyrir á sama stað í flæðinu og spennugildi mælisins skráð við sömu skilyrði og áfallsprýstigildin voru skráð áður. Að lokum var svo fundið samband milli spennugildanna og vindhraða sem síðan var nýtt til mælinga í vindgöngunum.

Tafla 7: Kvörðun CTA-vindhraðamælis

Tíðnibreytir [Hz]	Aflestur af áfalls-prýstimæli [tommur vatnssúlu]	Vindhraði (20°C) [m/s]	Spennugildi E_{CTA} [V]
0	0	0	1,364
10	0,09	6,1	1,881
15	0,20	9,1	1,977
20	0,35	12,0	2,059
25	0,52	14,7	2,126
30	0,77	17,8	2,183
35	1,00	20,3	2,233
40	1,37	23,8	2,278
45	1,70	26,5	2,321
50	2,05	29,1	2,352

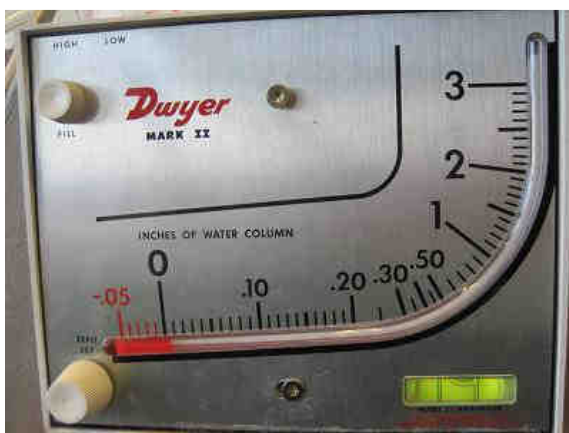


Mynd 59: Útspenna CTA-vindhraðamælis kvörðuð miðað við þekkta vindhraða.

Valin er sú jöfnugerð sem notandi telur falla best að mæligögnum. Forritið notast svo við aðferð lægstu kvaðrata (e. least squares method, LSQ) til að finna stuðla nálgunarjöfnunnar. Mældur vindhraði verður þannig fall af spennugildi frá vindhraðamæli. Kvörðun vindhraðamælisins leiddi til eftirfarandi nálgunarformúlu:

$$V_{CTA} = 2,34 - e^{-0,1 \cdot E_{CTA}}$$

þar sem V_{CTA} er vindhraði mældur með CTA-mæli og E_{CTA} er spennugildi frá CTA-mæli.



a)



b)

Mynd 60: a) Aflestrarbúnaður áfallsþrýstimælis, kvarðinn er í tommum vatnssúlu, b) áfallsþrýstimælir uppsettur í smærri vindgöngum.

4.4 Jöfnur og úrvinnsla mæligagna

Út úr hverri mælingu fæst línuvígur sem inniheldur 2^{16} fjölda vindhraðagilda. Til að meta meðalhraða sérhvers mælipunkts er tekið meðaltal \bar{u} af öllum mæligildum samkvæmt:

$$\bar{u} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n u_i$$

þar sem n táknar fjölda mæligilda og u_i táknar hvert stak mælingar. Meðalvindhraðinn er eins og gefur að skilja háður óvissu vegna vindflöktis sem við skilgreinum sem u' og táknar fráhvarf sérhvers mælipunkts frá meðaltalinu. Við getum því táknað sérhvert mæligildi sem:

$$u_i = \bar{u} + u'_i$$

Þar sem að við getum nálgast mæligildi sérhverrar mælingar að normaldreifingu skilgreinum við meðalvindflökt sem eitt staðalfrávik frá meðalhraða samkvæmt:

$$u'_{RMS} = \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (u_i - \bar{u})^2 \right)^{\frac{1}{2}}$$

Sem mælikvarða á iðustreymi reiknum við svo hlutfallið:

$$TI = \frac{u'_{RMS}}{\bar{u}}$$

og nefnum það umfang iðustreymis (e. turbulence intensity, TI). Þá höfum við skilgreint þær tvær kennitölur sem notaðar eru til að greina niðurstöður mælinga á loftflæði í vindgöngunum.

4.5 Fyrirkomulag mælinga.

Gerðar voru mælingar við þrjár mismunandi aðstæður; án inntaksneta, með einu inntaksneti og með þremur inntaksnetum. Athugaðar voru aðstæður flæðisins við þrjár mismunandi stillingar tíðnibreytis, $F = 10$ Hz, 20 Hz og 30 Hz fyrir tilfellið án inntaksneta og með þrem inntaksnetum. Mælingar á einu inntaksneti voru aðeins gerðar við tíðnibreytisstillinguna $F = 20$ Hz. Allar mælingar voru gerðar með vindhraðamæli staðsettan í 60 cm fjarlægð frá inntaksstút í mæliklefa, eða 33% af heildarlengd hans. Niðurstöður eru settar fram með hæðarlínugröfum (e. contour plots) auk þess sem að hraða-tíma línurit og tíðniróf (e. amplitude - frequency spectrum) staðlaðs vindflöktismerkis fyrir miðpunkt mælisniðs eru borin saman fyrir mismunandi fjölda inntaksneta.

Staðsetning inntaks vindganganna var okkur einnig mikið hugarefni, nálægð þess við vegg rýmis auk þess að inntakið stendur ósamsíða veggnum, þ.e. sitthvor hlið frambrúnar inntaks er ekki í sömu fjarlægð frá vegg. Til samanburðar var umfang iðustreymis í smærri vindgöngum metið við þrjár aðstæður, þar sem engin hindrun er fyrir inntaki, þar sem inntak stendur nálægt og samsíða vegg og loks þar sem að inntak smærri vindganga stendur nálægt vegg undir sama horni og stærri vindgöng. Niðurstöður þess samanburðar eru settar fram í töflu auk þess sem hraða - tíma línurit og tíðniróf vindflöktismerkis eru borin saman. Nánari upplýsingar um hönnun, smíði og uppsetningu netanna er að finna í kafla um val inntaksneta og í viðauka A (smíðateikningar).

4.6 Samanburður vindflöktmerkis.

Með því að taka út og skoða sérstaklega hvernig vindhraði í mælingu þróast í þær rétt rúmu 6,5 sekúndur sem að mælingin stendur yfir er mögulegt að átta sig betur á og greina iðustreymi í streyminu. Með því að skoða tíðniróf vindsflöktmerkis má enn betur átta sig á hvort að einhverjar sérstakar hvirflastærðir, eða skalar, komi reglulega fyrir og á hvaða tíðni. Þannig mætti hugsa sér að hægt væri að segja til um ýmsa hluti svo sem ójafnt sog frá víftublöðum og/eða eigintíðnivandamál ef einhver slík eru til staðar. Þær upplýsingar má svo til dæmis nota til grundvallar við ákvörðun um hversu mörg og hversu fínöfin inntaksnet verði sett upp, sem og hvort nauðynlegt sé að fara út í aðrar sérstakar leiðréttingaraðgerðir, eins og að skipta út víftublöðum eða stífa af einstaka byggingahluta vindganganna í því skyni að hækka eigintíðni þeirra upp fyrir tíðni útslagstoppa vindflökt. Til að geta gert beinan samanburð milli mismunandi vindhraða og mismunandi vindganga munum við notast við eingingalausar stærðir.

Við skilgreinum því *normgert vindflöktútslag* sem:

$$\frac{u_i}{\bar{u}} - 1$$

og með DFT Fourier – vörpun samkvæmt¹;

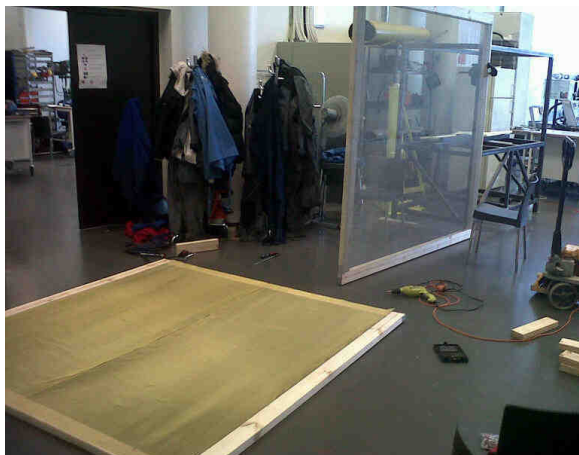
$$U'(k) = \frac{|\mathcal{F}(\mathbf{u}_k)|}{L} = \left| \sum_{n=0}^{N/2-1} \left(\frac{u_n}{\bar{u}} - 1 \right) \cdot e^{-\frac{k}{N} n \cdot 2 \cdot \pi \cdot i} \right| \cdot L^{-1}$$

þar sem U' táknar normgert vindflöktútslag, N táknar söfnunartíðni, k táknar hvert stak í tíðnirúminu og L táknar fjölda söfnunargilda, fæst tíðniróf normgerða vindflöktútslagsins.

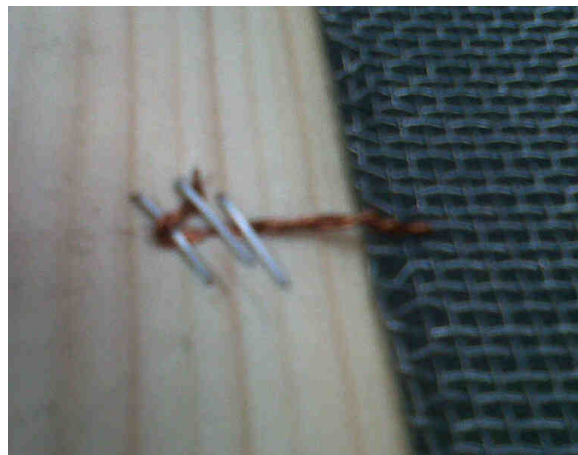
4.7 Val og uppsetning inntaksneta

Samkvæmt ofangreindum hönnunarreglum voru valin inntaksnet. Eftir talsverða leit að heppilegum netum fundust þau til sölu hjá Poulsen Ehf. Þó voru þau þeim ókostum búin að þau voru ekki fáanleg í öðrum breiddum en einum metra, sem þýddi fyrir okkur að nauðsynlegt yrði að skeyta þeim saman í miðju. Ákveðið var að smíða ramma úr 45 x 90 mm heflaðri smíðafuru og strengja netin endilangt yfir þá. Það var gert með því að hafa eina hlið rammans þannig gerða að mögulegt væri að hliðra henni inn í rammann með skrúfu sem áföst er festivinkli. Með hliðina hliðraða inn í rammann voru svo báðar skammhliðar netanna heftaðar við rammann. Að lokum var svo hliðinni hliðrað til baka með skrúfvél og þannig náðist ásættanleg strekkja á langveginn. Því næst voru netin, sem nú voru orðin strekkt eftir endilöngu, saumuð saman í miðju og að lokum strengd út á þverveginn með koparvír sem svo var heftaður við fururammann (mynd 62). Í sauminn var notast við 0,4 mm veiðigirni og voru netin fest saman með krosssaum með um 100 mm millibili. Mynd 61 sýnir tvö inntaksnet í smíðum, netið sem liggur á gólfinu er koparnet með 33 x 33 möskva á fertommu og var það staðsett aftast af þeim þremur netum sem sett voru upp. Netið sem sést standa er úr galvaníseruðu stáli með 16 x 16 möskva á fertommu og var það staðsett í miðjunni, milli fremsta netsins (sem vantar á myndina, en er af sams konar gerð nema með 12x12 möskva á fertommu) og þess aftasta.

¹ Heimild: Matlab 2011 user guide.



Mynd 61: Tvö inntaksnet í smíðum.



Mynd 62: Inntaksnet strengt út á ramma með koparvír.

Að lokum voru svo allir þrír rammarnir settir saman, stilltir af og festir framan á inntak vindganga með snittteinum. Saumurinn var látinn standast á þannig að fremsta netið hefur sauminn lárétt, miðnetið lóðrétt og það aftasta hefur sauminn lárétt. Þá var römmunum snúið þannig að hliðin sem að netin höfðu verið strengd á sneru inn í göngin, nema á því fremsta þar sem sú hlið sneri út. Þannig fékkst ásættanlegt bil á milli þeirra með tilliti til þeirra hönnunarreglna sem settar voru fram hér að ofan. Tafla 8 sýnir helstu kennitölur þeirra neta sem valin voru fyrir inntakið en valið grundvallaðist af því sem til var á lager hjá seljanda, kaupverði þar sem að koparnet og ryðfrí stálnet eru um fjórum sinnum dýrari en galvaniseruð stálnet, auk fyrrnefndra hönnunarreglna. Fyrst koma tvær jöfnur sem skilgreina þær kennitölur sem er að finna í töflunni;

Möskvalengd:

$$L + D = \frac{25,4}{M} [mm]$$

Þar sem L er opnunarlengd möskva, D er vírþykkt og M er fjöldi möskva á tommu .

Poruhlutfall:

$$\beta = \frac{L^2}{(L + D)^2}$$

Tafla 8: Kennitölur valinna inntaksneta.

	Efni	Möskvar á fertommu (MxM)	Möskvalengd (L+D) [mm]	Vírþykkt (D) [mm]	Poruhlutfall (β)	Bil að næsta neti [mm]	Bil í möskvaþvermálum [L]
Fremsta net	Ofið galv.	12 x 12	2,12	0,50	0,58	90	55,6 L
Miðjunet	Ofið galv.	16 x 16	1,59	0,34	0,62	45	36,0 L
Aftasta net	Ofið kopar	33 x 33	0,77	0,20	0,55	-	-

4.8 Kostnaður

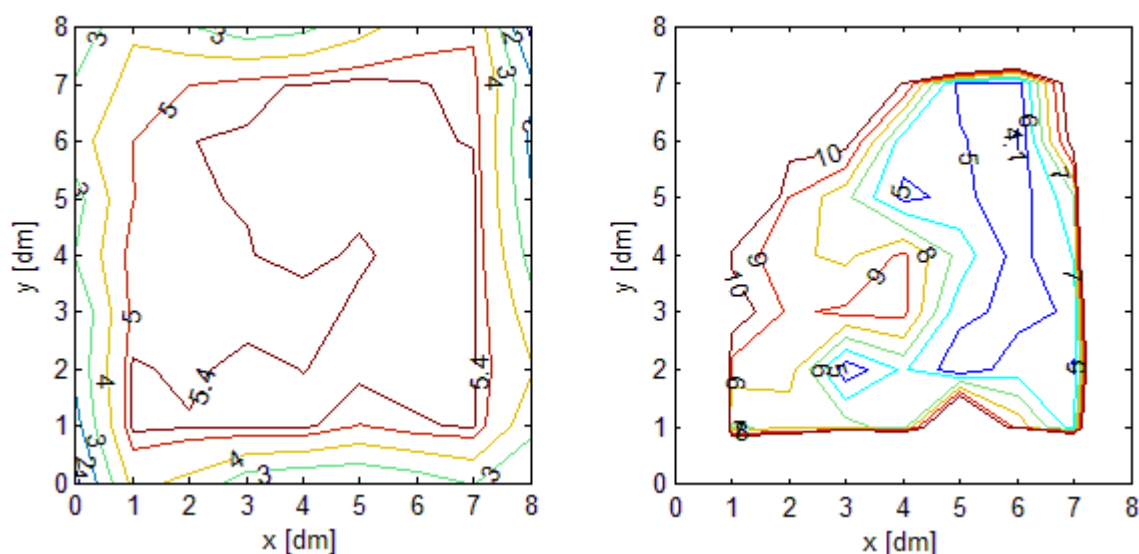
Áður en verkefnið hófst hafði fengist tilboð frá bandaríska fyrirtækinu ELD (Engineering Laboratory Design) í sex inntaksnet. Hljómaði tilboðið uppá 7.630 USD eða um 900.000 íslenskar krónur. Þótti þetta verð heldur í hærra lagi og fórum við því á stúfana til að kanna hvort að sambærileg net myndu finnast innanlands, sem þau og gerðu því eins og áður sagði fást sambærileg net í Poulsen Ehf,

með þeim annmörkum þó að breidd þeirra takmarkast við einn metra. Smíðað var eitt inntaksnet til að kanna hvort að einhver áhrif myndu greinast af saumnum. Þar sem mælingar komu vel út, saumarnir héldu og verðið var aðeins brot af verði innfluttra tilbúinna neta var ákveðið að notast við þessa aðferð. Heildarkostnaður við netin þrjú, tréramma og annað smíðaeefni nam kr. 107.636, þar af vóg kostnaður við fínasta netið þyngst eða kr. 45.666. Til að setja kostnaðinn í samhengi, þá má ætla að kostnaður við að bæta þremur netum við verði svipaður og við fyrri þrjú netin. Miðað við það má gróflega áætla að kostnaður við okkar aðferð sé um 23% af innkaupsverði innfluttu netanna, þar sem kostnaður við ramma og annað smíðaeefni er ekki innfalin.

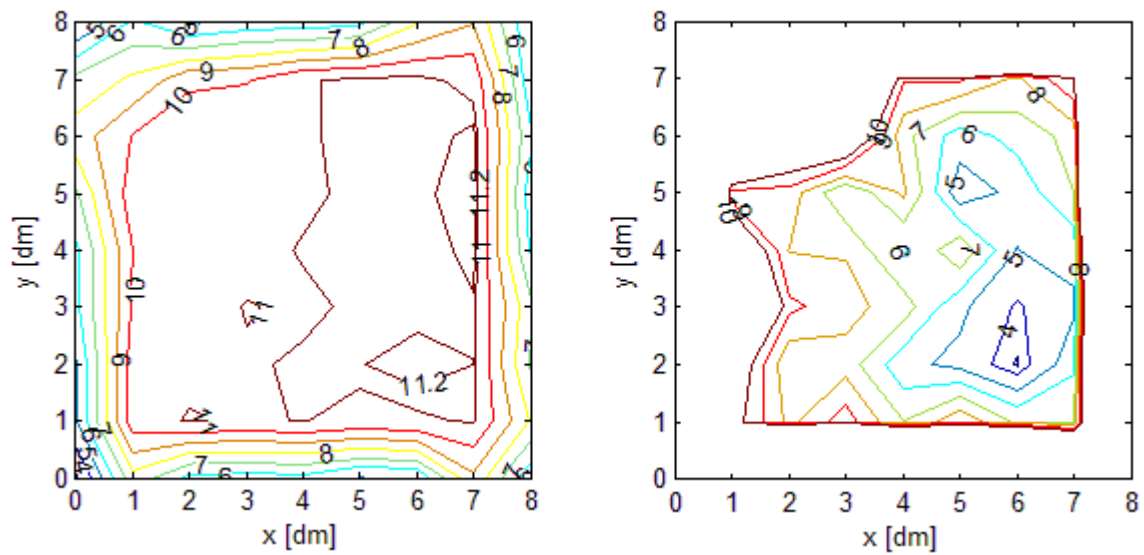
4.9 Niðurstöður

Hæðarlínugröf voru sett upp til að sýna niðurstöður mælinga myndrænt. Á öllum myndum eru jafnhæðarlínur á heilum tölum auk þess sem að efsta tíundahluta gildi er tilgreint sérstaklega í meðalhraðagröfum en neðsta tíundahluta gildið er tilgreint í iðustreymisgröfum. Gröf sem sýna umfang iðustreymis sýna aðeins upp að 10% umfangi. Óþarfi er talinn að sýna hærri hlutföll af tveimur ástæðum; a) vegna þess að svo hátt hlutfall er algerlega ónothæft til vindgangamælinga, b) betra er að átta sig myndrænt á nothæfu mælisniði þar sem að útlínur grafsins sýna þá eingöngu þann hluta mælisniðsins sem er innan 10% markanna.

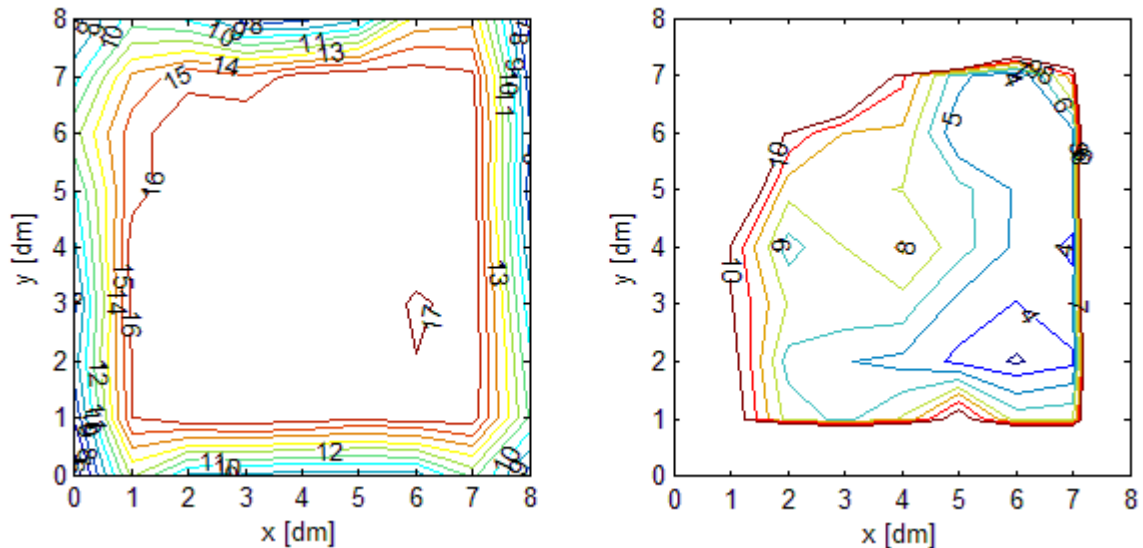
Á myndum 63 til 65 má sjá hæðarlínugröf fyrir mælingar sem gerðar voru án inntaksneta. Aðaleinkenni myndanna er hátt iðustreymisumfang, jafnvel hærri en búist var við áður en mælingar hófust. Annað sem sammerkt er með öllum þremur myndunum er að áberandi mesta vindflöktið er að finna upp í vinstra horni mælisniðsins, meðan lægsta hlutfall er almennt að finna niður í hægri horni. Hvað varðar meðalhraða þá virðast afbrigðilegheitin vinstra megin einnig hafa þau áhrif að draga úr meðalhraða þeim megin miðað við aðra hluta mælisniðsins og hæsti meðalhraði verður í öllum tilfellum á þeim punkti þar sem að lægsta vindflöktið er að finna. Ekki er hægt með fullri vissu að fullyrða um orsök þessa háa iðustreymishlutfalls, en truflun á loftflæði vegna nálægðar inntaks vindganganna við vegg rýmisins er sterklega grunuð um að vera orsakavaldur. Þá er að finna hitaveiturör fyrir ofan inntak vinstra megin sem jafnframt er sá hlutur sem næst inntakinu stendur. Er truflun á loftflæði frá þeim talinn líklegur orsakavaldur fyrir því aukna vindflökti sem greina má efst í vinstra horni mælisniðsins. Nánari útlistun á athugunum vegna óvenju hás vindflöks er að finna í kafla 4.11 um samanburð við smærri vindgöng.



Mynd 63: Án inntaksneta, $F = 10$ Hz. T.v.: meðalhraði [m/s], t.h.: umfang iðustreymis [%]

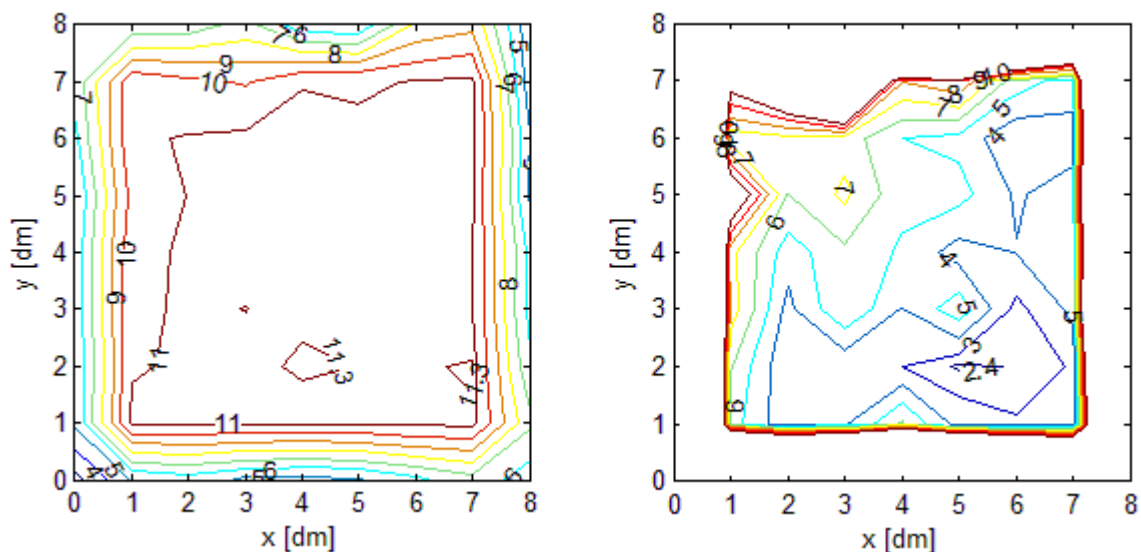


Mynd 64: Án inntaksneta, $F = 20$ Hz. T.v.: meðalhraði [m/s], t.h.: umfang iðustreymis [%]



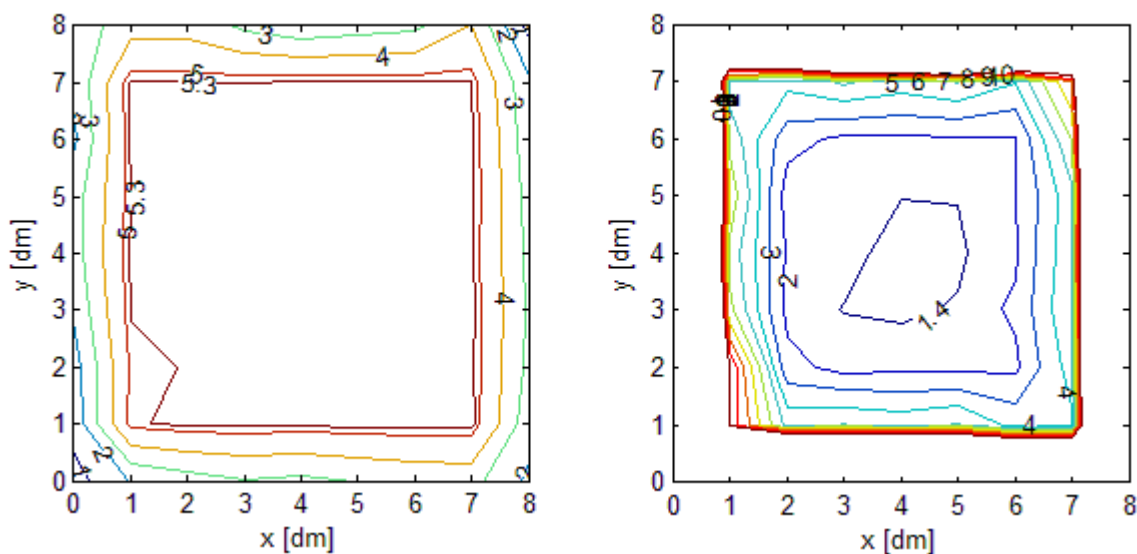
Mynd 65: Án inntaksneta, $F = 30$ Hz. T.v.: meðalhraði [m/s], t.h.: umfang iðustreymis [%]

Ein mæling var gerð þar sem einu inntaksneti hafði verið komið fyrir. Í þeirri mælingu var stilling tíðnibreytisins höfð 20 Hz. Mynd 66 sýnir niðurstöðu þeirrar mælingar. Eins og sjá má hefur talsvert dregið úr umfangi iðustreymis frá mynd 64. Einnig hefur dregið úr iðustreymishlutfallinu í efra horni vinstra megin, þó að enn megi greina sömu einkenni og áður, þ.e. stígandi iðustreymishlutfall frá neðra horni hægra megin að efra horni vinstra megin. Enn má greina lækkun í meðalhraða samhliða hækkun iðustreymishlutfalls.



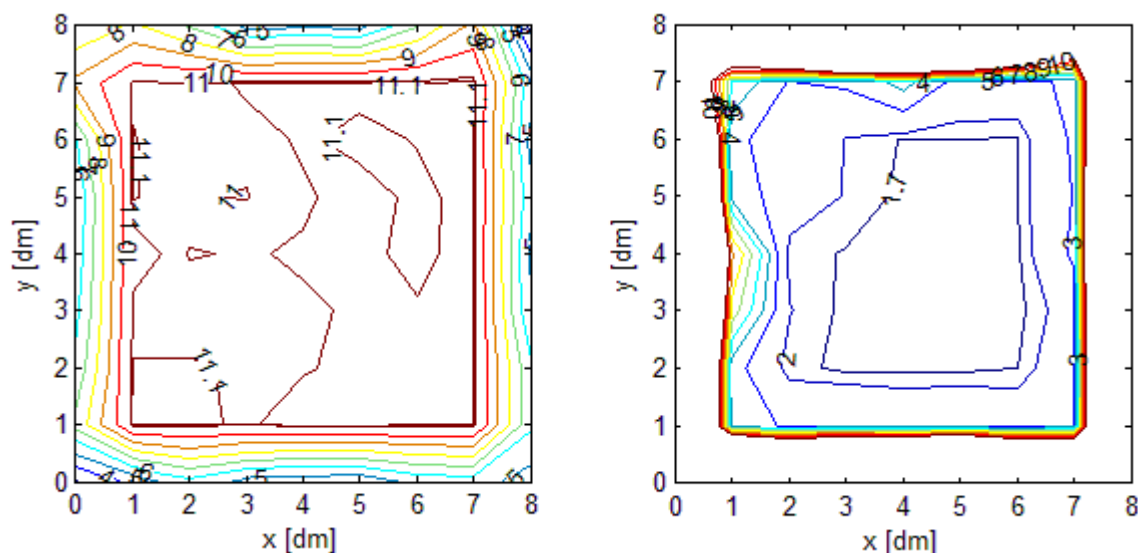
Mynd 66: Eitt inntaksnet, $F = 20$ Hz. T.v.: meðalhraði [m/s], t.h.: umfang iðustreymis [%]

Þegar öllum þremur inntaksnetum hafði verið komið fyrir voru framkvæmdar mælingar á sömu stillingum tíðnibreytis og áður, þ.e. 10, 20 og 30 Hz, sjá myndir 67 til 69. Helstu niðurstöður eru þær að mjög hefur dregið úr umfangi iðustreymis og truflun í efra horni vinstra megin er ekki greinanleg lengur. Jafnframt hefur staðsetning lægsta iðustreymishlutfalls færst nær miðju, nema á hæsta hraðanum þar sem staðsetningin er enn í neðri fjórðung hægra megin, þrátt fyrir að hafa nú færst nær miðju en áður. Einnig kemur nú skýrt fram hversu langt inn í mælisniðið skerlag flæðisins nær og afmarkar þannig nothæfan hluta þess. Sá hluti er nú orðinn nær ferningslaga og hefur málín 60 x 60 cm. Við skilgreinum því *nothæfta mælisniðið* sem ferningslaga svæðið sem nær frá $(x,y) = 1,1$ að $(x,y) = 7,7$.

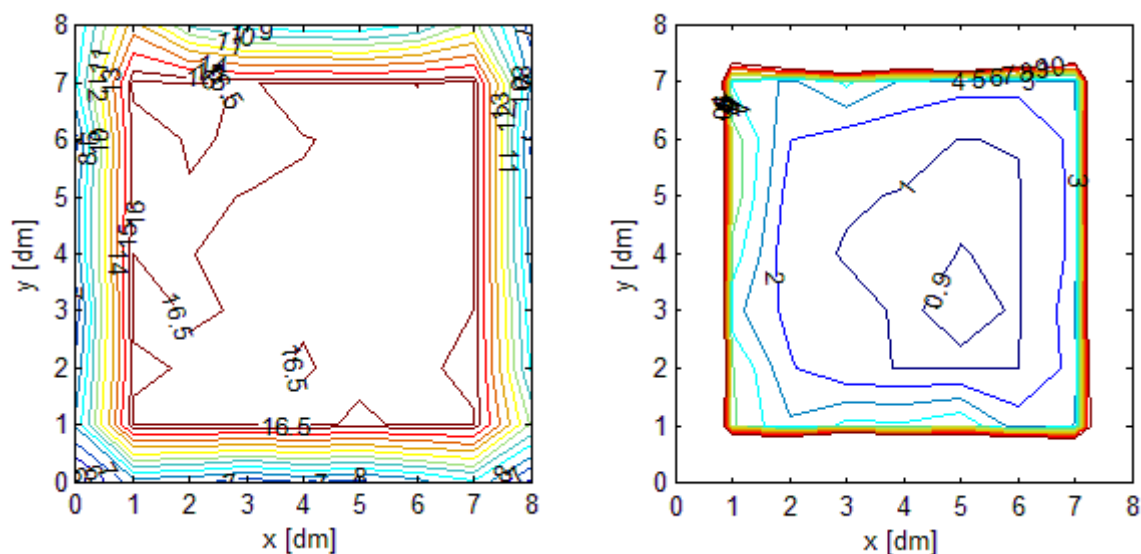


Mynd 67: Þrjú inntaksnet, $F = 10$ Hz. T.v.: meðalhraði [m/s], t.h.: umfang iðustreymis [%]

Dreifing meðalvindhraða er nú orðin svo gott sem óháð staðsetningu, a.m.k. er ekki hægt að greina neinn sérstakan stigul í vindhraða frá vinstri hlið að hægri hlið eins og áður. Við fyrstu sýn virðist einsleitni hraðans á $F = 20$ Hz og $F = 30$ Hz vera ábótavant, en þar er jafngildislínum myndanna um að kenna þar sem að efsta gildið, sem er 0,1 frá hæsta gildi, hittir einfaldlega illa á miðað við næstu heiltölu. Heppilegri aðferð til að leggja mat á einsleitni er að kanna staðalfrávik mældra meðalhraðagilda frá meðalhraða í öllu nothæfa mælisniðinu. Með því að deila því svo upp í samsvarandi meðalvindhraða fæst *einsleitnihlutfall* hvers mælisniðs á þeirri tíðnibreytitíðni sem mælingin var framkvæmd á, sem gagnlegt er að nota til að bera saman einstaka skilyrði m.t.t. fjölda inntaksneta og tíðnibreytitíðni. Tafla 10 sýnir yfirlit yfir kennitölur nothæfa mælisniðsins. Sérlega er áberandi hversu stórlega einsleitnihlutfallið og umfang iðustreymis lækkar með auknum fjölda inntaksneta (mynd 78). Sé þróun iðustreymisumfanga með tilliti til aukinnar tíðnibreytitíðni borin saman fyrir vindgöng án inntaksneta annars vegar og með þremur inntaksnetum hins vegar sést að hlutfallið fer lökkandi með auknum vindhraða með þremur netum, en eykst og minnkar svo aftur þegar engin inntaksnet eru fyrir hendi (mynd 79). Rennir sú staðreynd enn styrkari stoðum undir þá kenningu að truflun frá vegg og öðrum hlutum sem standa nálægt inntaksopi sé ráðandi í flæðinu fyrir framan inntakið.



Mynd 68: Þrjú inntaksnet, $F = 20$ Hz. T.v.: meðalhraði [m/s], t.h.: umfang iðustreymis [%]

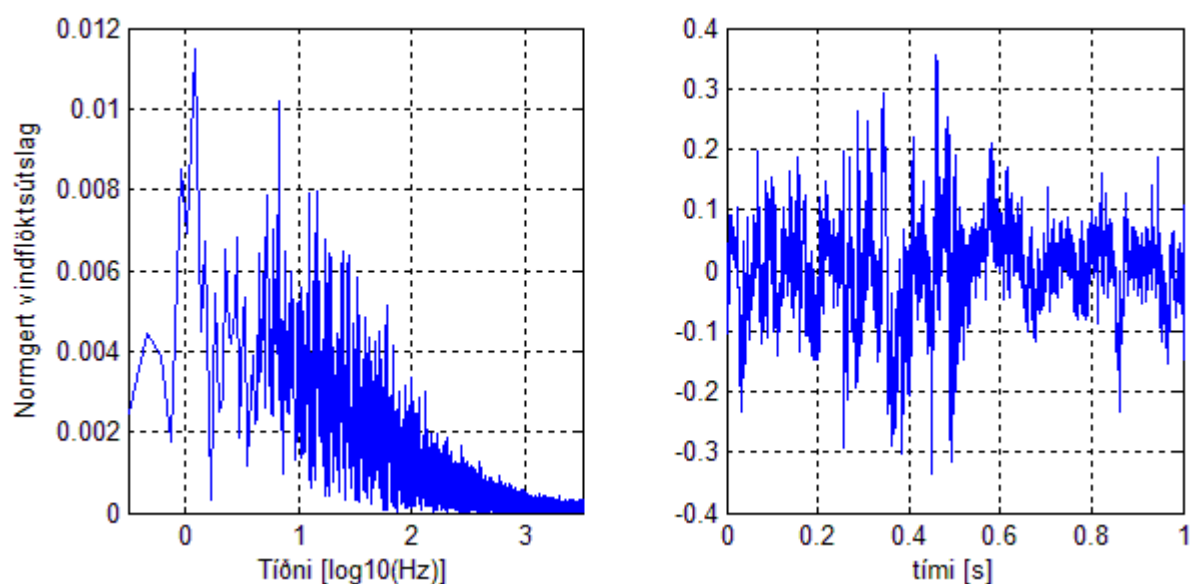


Mynd 69: Þrjú inntaksnet, $F = 30$ Hz. T.v.: meðalhraði [m/s], t.h.: umfang iðustreymis [%]

4.10 Vindflöchtsmerki í tíma og tíðnirúmi.

Til að greina sérstök vandamál, svo sem tengd eigintíðni einstakra hluta vindganganna, er heppilegt að líta betur á merkið sem vindhraðamælirinn les sem fall af upptökutímanum og varpa því svo yfir í tíðnirúmi með FFT - aðferð (e. Fast Fourier transform). Notast er við vindhraðamerki úr miðpunkti mælisniðs í hvert skipti, þ.e. punkt $(x,y) = 4,4$. Á myndum 70 til 72 er vindhraðapróun fyrstu sekúndu upptökutímans birt fyrir hvert tilfalli. Manshadi o.fl. (2008) könnuðu áhrif mismunandi margra inntaksnetna með og án ofrisræma í vindgöngum og komust að lækkað vindflökt hefur umtalsverð áhrif til lækkunar á FFT – vörpuðum merkjum og aflrófum (e. power spectrum) vindhraðamerkja. Ákváðum við að gera tilraun til að staðfesta þessi áhrif samhliða þessari greiningu. Útslög eru gerð einingalaus til að mögulegt sé að gera beinan samanburð milli mismunandi vindhraða. Borin eru saman merki þegar tíðnibreytistöðni (F) er stillt á 20 Hz án inntaksnetna, með einu inntaksneti og með þremur inntaksnetum. Í viðauka F má svo virða fyrir sér sambærileg gröf fyrir aðrar tíðnibreytistöðnir.

Eins og sjá má á vindhraðamerki án inntaksnetna (mynd 70) er vindflöktið nokkuð hátt, eða allt að 30% þegar mest er. Greinanlegar eru sveiflur af mörgum tíðnum. Einnig má greina iðustreymishvirfla á lægri tíðnum sem FFT – greiningin staðfestir og sýnir topp í flökti á um 1 Hz og tiltölulega hátt flökt greinist allt að 100 Hz. Eftir það má greina veldislækkandi útslög allt að um eða yfir 1000 Hz, þar sem sléttist úr útslaginu sem verður nokkuð jafnt á hærri tíðnum. Hér erum við því líklega komin að þeim mörkum þar sem að vindflöktið einkennist af seigju flæðisins sbr. skilgreiningu Bradshaws (1996). Á mynd 71, sem sýnir sambærileg gögn með einu inntaksneti, má sjá sömu þróun, þ.e. tiltölulega hátt flökt á lægri tíðnum þótt að algildið hafi lækkað umtalsvert. Inntaksnetið virkar því fyrst og fremst til að tempra þá hvirfla sem eru á lengri bylgjulengdum. Þetta fæst enn betur staðfest þegar inntaksnetin eru svo orðin þrjú (mynd 72), en þar má sjá greinilega minnkun í vindflökti á lægri tíðnunum. Út frá skilgreiningu Bradshaws(1996) um að lengri bylgjulengdir takmarkist af jaðarskilyrðum flæðisins er áhugavert að áætla þá bylgjulengd sem svarar þeirrar tíðni sem að toppur í vindflöchtsútslagi greinist á. Ef myndirnar eru skoðaðar út frá þessu sjónarmiði, greinist í öllum tilfellum toppur á tíðni sem er um 8 – 9 Hz. Einnig greinist toppur á myndunum án inntaksnetna og með einu inntaksneti á tíðninni 1,3 Hz, en sá toppur virðist alveg horfinn á myndinni þar sem þremur inntaksnetum höfðu verið sett upp.



Mynd 70: Án inntaksnetna: Vindhraðamerki í tíðnirúmi (t.v.) og tímarúmi (t.h.).

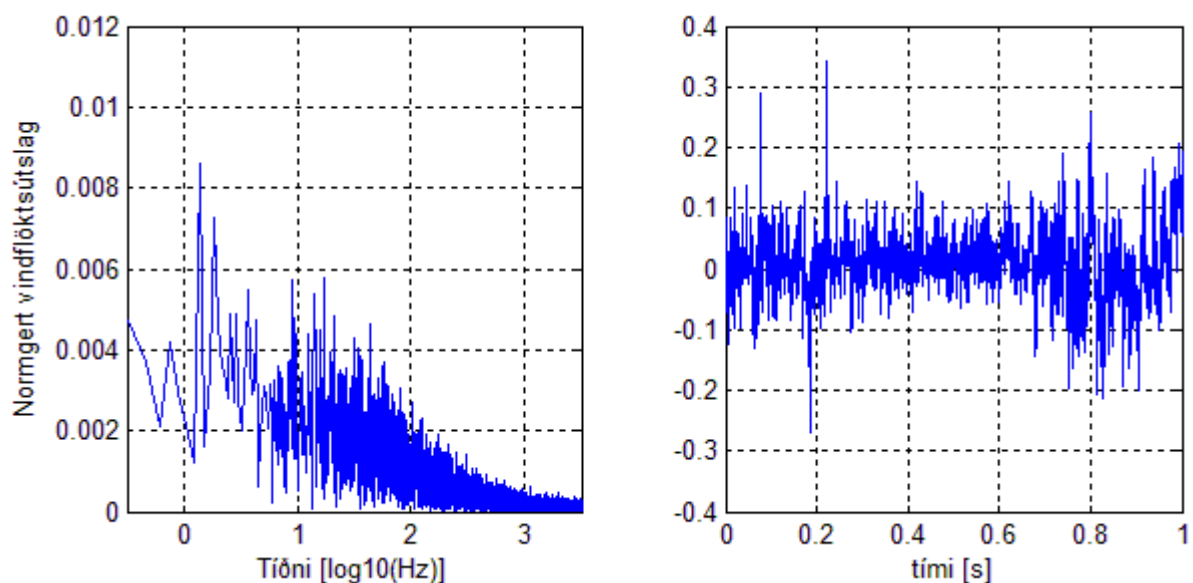
Lögmál um massavarðveislu segir okkur að hraði loftflæðis í setklefa, miðað við mældan meðalhraða í mælisniði og þrengingarhlutfallið 1:8 sé:

$$v_{\text{inntak}} = \frac{1}{8} \cdot v_{\text{mælisnið}}$$

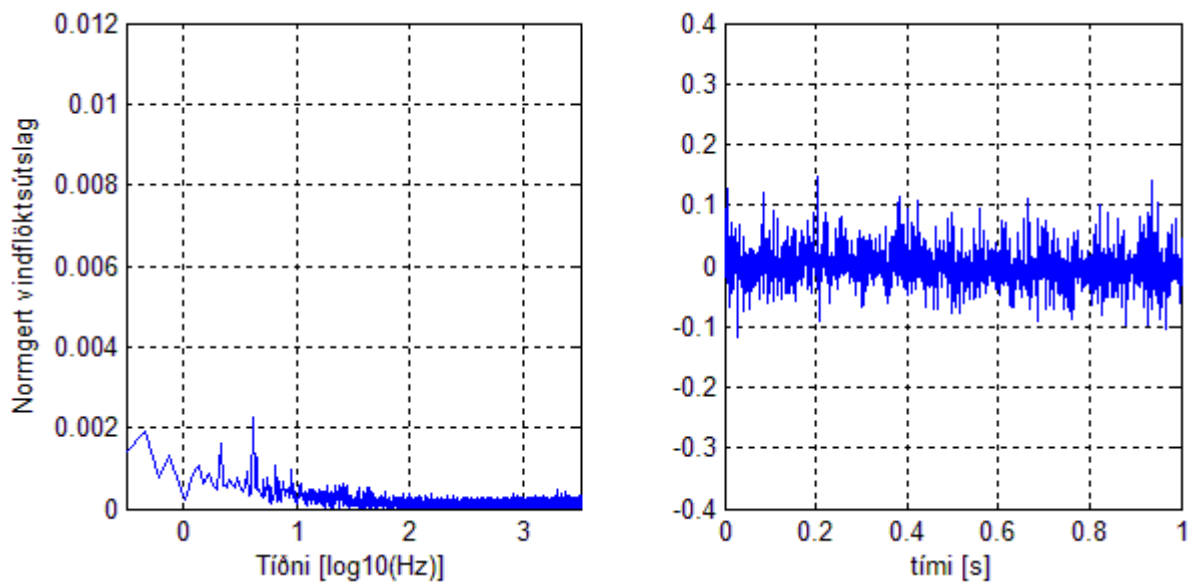
Því má gera ráð fyrir loftflæðihraða í kringum 1,4 m/s í setklefa. Þá getum við áætlað bylgjulengd hvirfla af tíðninni 8 Hz fyrir öll þrjú tilfelli og 1 Hz fyrir fyrstu tvö út frá:

$$\lambda = \frac{v}{f}$$

Þar sem λ er bylgjulengd [m] og f er tíðni [Hz]. Í ljós kemur að bylgjulengd lægri tíðnarinnar er um 1,1 m og 0,2 m fyrir þá hærrí. Samkvæmt fræðunum eiga inntaksnetin að brjóta niður stærstu vinhdhraðasveiflur, sem við getum litið á sem einstaka hvirfla, sem að þeim berast. Séu þessar niðurstöður settar í samhengi við þær kennilengdir (e. characteristic lengths) sem svara til jaðarskilyrða flæðisins, að breidd inntaksins er 2 metrar og sú hlið sem stendur nær veggnum er í um 50 cm fjarlægð frá honum má áætla að bylgjulengdir toppanna ákvarðist af helmingi þessara lengda. Jafnframt er hvirfillinn af lægri bylgjulengdinni “lífseigari”, þ.e. hann stendur af sér öll þrjú inntaksnetin, þó að hann hafi dofnað töluvert í tilfelli þriggja inntaksneta, meðan að hinn hvirfillinn, sem ákvarðast af breidd inntaksins hverfur svo að segja alveg þegar inntaksnetin eru orðin þrjú. Með öðrum orðum, fleiri inntaksnet þarf til að tempra hvirfla sem myndast vegna stuttrar fjarlægðar inntaksins frá vegg heldur en til að tempra hvirfla sem ákvarðast af breidd inntaks.



Mynd 71: Eitt inntaksnet: Vindhraðamerki í tíðnirúmi (t.v.) og tímarúmi (t.h.).



Mynd 72: Þrjú inntaksnet: Vindhraðamerki í tíðnirúmi (t.v.) tímarúmi (t.h.).

4.11 Athugun á áhrifum afstöðu inntaks smærri vindganga miðað við vegg.

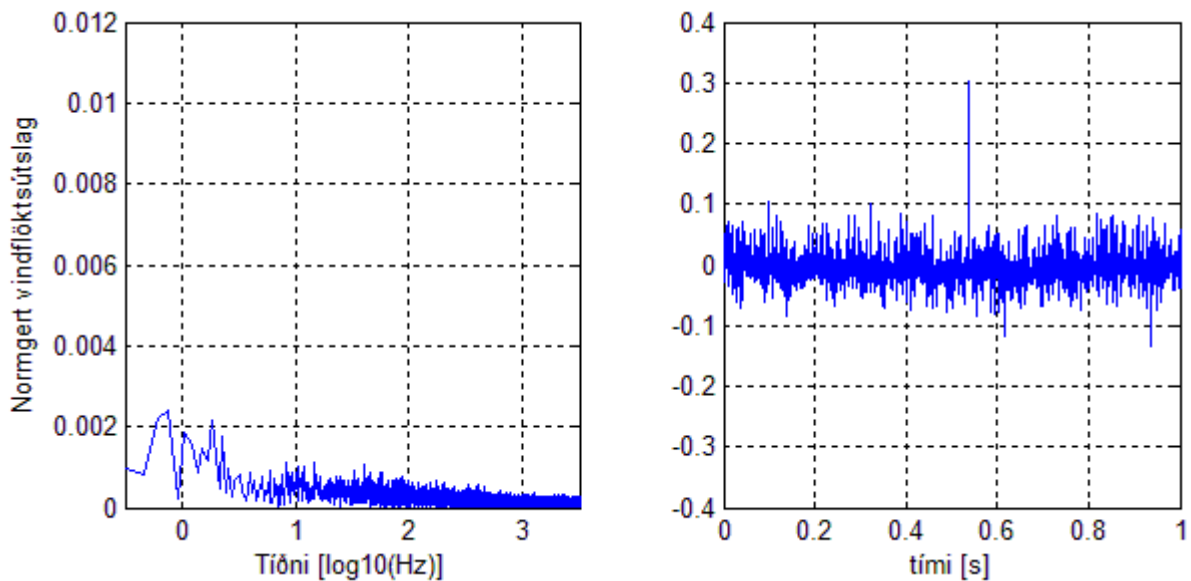
Grunur okkar um að afstaða ganganna, þ.e. nálægð inntaks þeirra við vegg rýmisins, hefði áhrif á merki vindhraðamælis leiddi okkur að því að kanna áhrifin á smærri vindgöngin, sem eru færanleg og því auðvelt að stilla þeim upp með mismunandi afstöðum inntaksops miðað við innvegg rýmisins. Einnig voru þau án inntaksneta sem ætti að gera samanburð við stærri vindgöngin án inntaksneta raunhæfan. Reyndar voru þrjár mismunandi uppstillingar þar sem vindgöngum var stillt upp með;

1. Engum truflanavaldi fyrir framan inntak,
2. Inntaksopi samsíða innvegg 20 cm frá,
3. Inntaksopi þannig að það myndaði um 30° horn með nálægari endann um 20 cm frá innvegg.

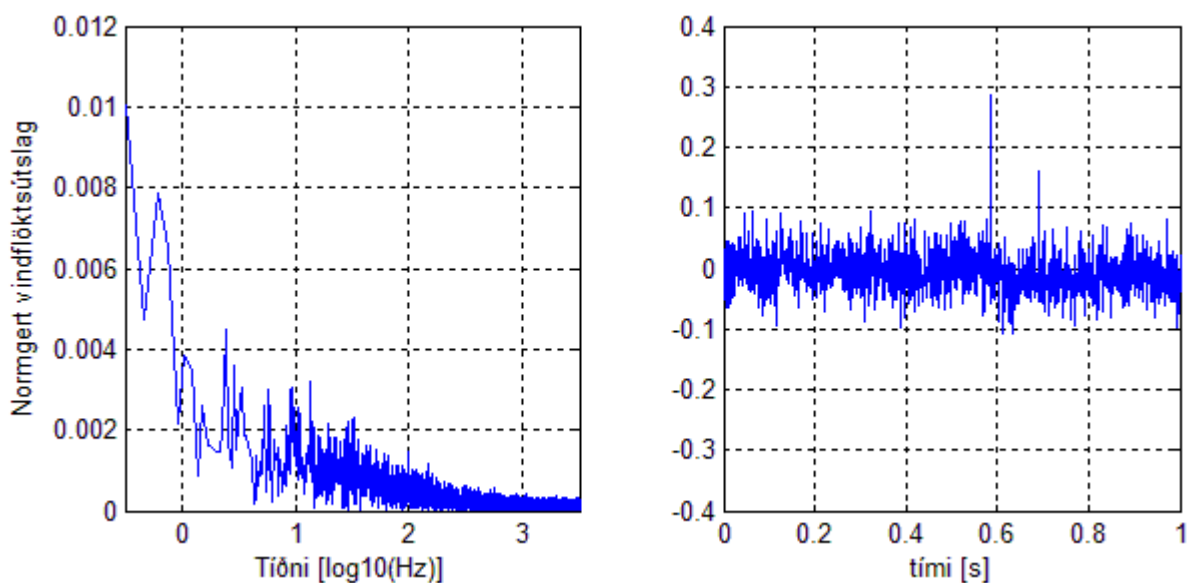


Mynd 73: (T.v.) uppstilling 2, (t.h.) uppstilling 3.

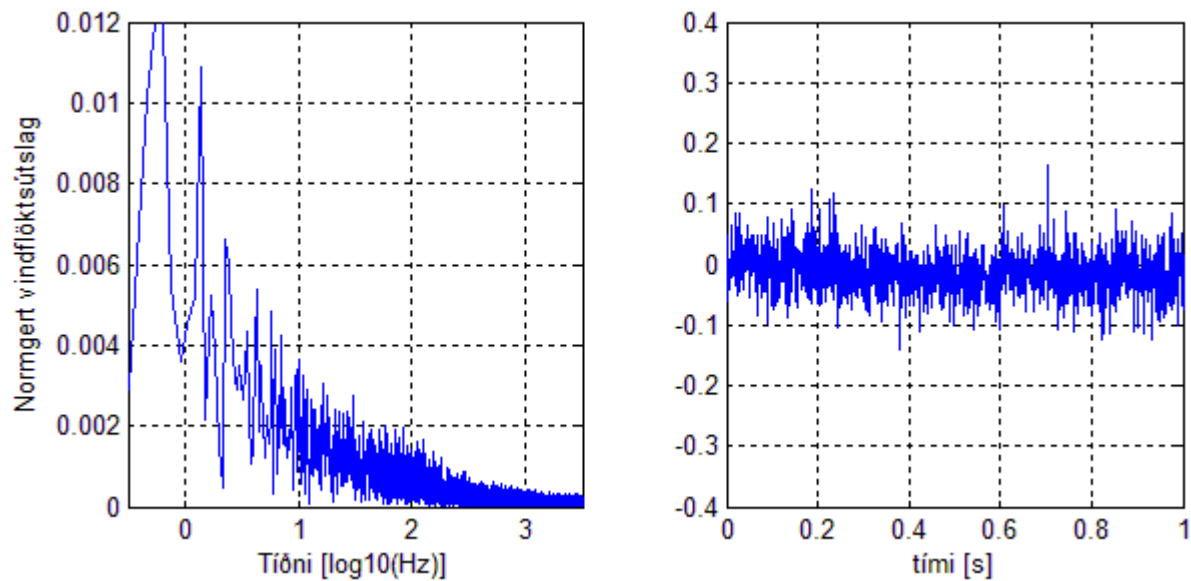
Mynd 73 sýnir uppstillingar 2 og 3. Samkvæmt okkar tilgátu ætti uppstilling 3 að gefa vindhraðamerki sem líkast því sem mældist í stóru göngunum, án inntaksneta. Þróun merkisins með tilliti til uppstillingar 1 - 3 er ekki ólík þeirri þróun sem átti sér stað með lækkuðum fjölda inntaksneta á stóru vindgöngunum, þ.e. skilyrðið án truflunar gefur ekki ólíka niðurstöðu, en þó heldur lægri sveiflur, heldur en þegar þrem inntaksnetum hafði verið komið fyrir framan á stærri vindgöngum (mynd 74). Á svipaðan hátt má bera saman merki fyrir uppstillingu 2 við merkið þegar að einu inntaksneti hafði verið komið fyrir á stærri vindgöngum. Mestu útslögin eru þó greinanleg á síðasta skilyrðinu, þ.e. uppstillingu 3. Fyrir uppstillingu 1 má þó enn greina einhverjar sveiflur á skalanum 0,5 - 2 Hz en útslög þeirra eru til muna lægri en þegar inntakinu er stillt upp samkvæmt uppstillingum 2 (mynd 75) og 3 (mynd 76). Tafla 9 sýnir umfang iðustreymis á hverri uppstillingu ganganna. Þar sést að mesta vindflöktið er þegar að göngunum er stillt upp samkvæmt uppstillingu 3 sem er í takt við það sem kemur fram á tíma – og tíðnirúmsmyndunum.



Mynd 74: Uppstilling 1: Vindhraðamerki í tíðnirúmi (t.v.) og tímarúmi (t.h.).



Mynd 75: Uppstilling 2: Vindhraðamerki í tíðnirúmi (t.v.) og tímarúmi (t.h.).

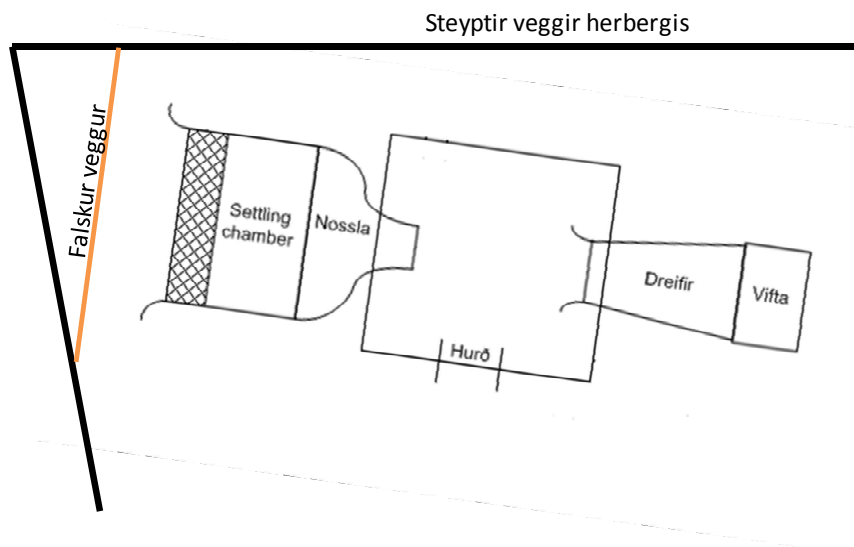


Mynd 76: Uppstilling 3: Vindhraðamerki í tíðnirúmi (t.v.) og tímarúmi (t.h.).

Tafla 9: Umfang iðustreymis við mismunandi uppstillingar

Uppstilling	Umfang iðustreymis[%]
1	1,76%
2	2,89%
3	3,50%

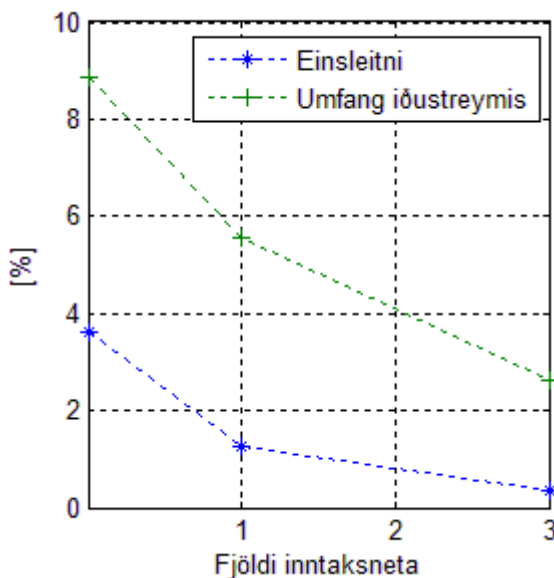
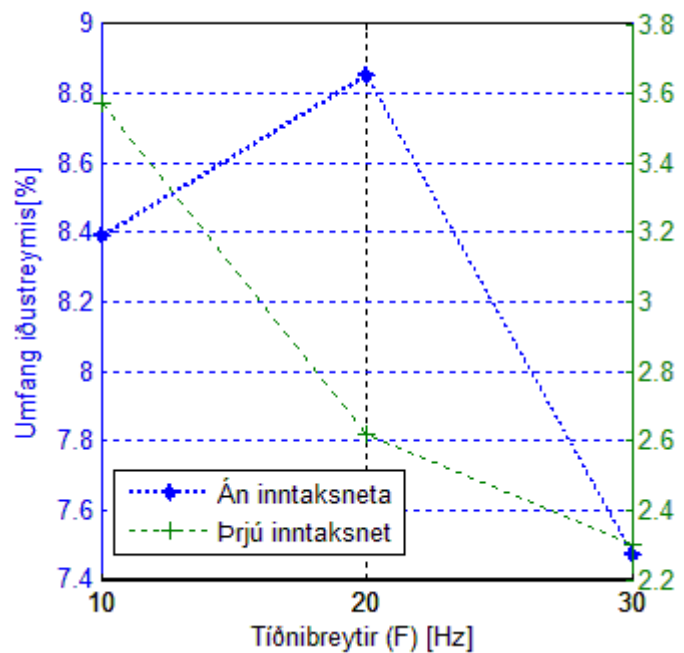
Það er því augljóst að staðsetning inntaks hefur umtalsverð áhrif á gæði loftflæðis í vindgöngum. Athyglisvert er að mælingin sem gerð var með inntak ganganna ósamsíða vegg (uppstilling 3) gefur verri niðurstöðu, þ.e. hærra umfang iðustreymis, heldur en þegar að göngunum er stillt upp samsíða veggnum (uppstilling 2), þrátt fyrir að rúmmál fyrir framan inntakið sé í raun meira í uppstillingu 3 heldur en í uppstillingu 2. Samkvæmt þessari niðurstöðu gæti það hugsanlega bætt gæði loftflæðis í stóru vindgöngunum að slá upp fölskum vegg fyrir framan inntaksop þeirra sem jafnframt væri samsíða því. Mynd 77 sýnir hvernig hugsanlega mætti koma slíkum vegg fyrir.



Mynd 77: Skemamynd af því hvernig mætti koma fölskum vegg fyrir framan inntak.

Tafla 10: Kennitölur nothæfs mælisniðs.

Fjöldi inntaksneta	Stilling tíðnibreytis [F]	Meðalhraði [m/s]	Staðalfrávik [m/s]	Einsleitnihlutfall [%]	Meðalumfang iðustreymis [%]
0	10 Hz	5,37	0,122	2,27%	8,39
0	20 Hz	10,84	0,390	3,60%	8,85
0	30 Hz	16,51	0,340	2,06%	7,47
1	20 Hz	11,08	0,139	1,25%	5,57
3	10 Hz	5,38	0,036	0,67%	3,57
3	20 Hz	11,10	0,040	0,36%	2,62
3	30 Hz	16,52	0,027	0,16%	2,30

Mynd 78: Þróun einsleitni og umfangs iðustreymis með auknum fjölda inntaksneta þegar $F = 20$ Hz.

Mynd 79: Samanburður á þróun umfangs iðustreymis með tíðnibreytitíðni án inntaksneta og með þrem inntaksnetum.

4.12 Meðalvindhraði sem fall af tíðnibreytitíðni.

Samkvæmt líkanlögum (e. affinity laws) gildir að rúmmálsflæði lofts sé í beinu hlutfalli við snúningshraða viftu samvæmt¹;

$$\frac{\dot{Q}_1}{\dot{Q}_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

Þar sem \dot{Q} er rúmmálsflæði lofts [m^3/s] og N er snúningshraði viftu [rad/s]. Lögmál um massavarðveislu segir okkur:

$$\dot{Q} = A \cdot v$$

Þar sem A er flatarmál hornrétt á flæðistefnu [m^2] og v er vindhraði [m/s].

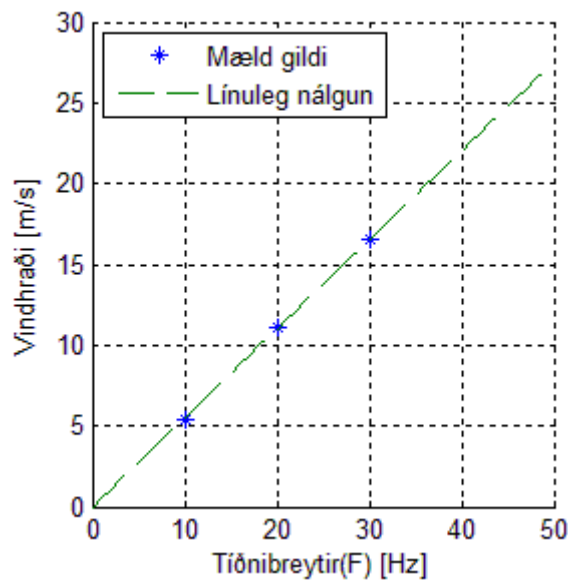
¹ (Logan, 1993)

Þar sem að flatarmál í ákveðnu mælisniði í mæliklefa breytist ekki með tíma, getum við sagt:

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

Og þar sem að tíðnibreytir viftunnar breytir snúningi hennar línulega með tíðnibreytitíðni (F) ætti samband milli tíðnibreytitíðni og vindhraða að vera línulegt fyrir fast mælisnið. Á mynd 80 má sjá línulega nálgun að mældum gildum meðalvindhraða í mælisniðinu með þremur inntaksnetum og má sjá að ekki er óeðlilegt að áætla að kenningin standist. Hagnýting þessarar niðurstöðu er að fyrir mælingar í mælisniðinu okkar getum við áætlað að vindhraða sem fall af tíðnibreytitíðni sé lýst með formúlunni:

$$v = 0,551 \cdot F$$



Mynd 80: Meðalvindhraði í mælisniði sem fall af tíðnibreytitíðni.

5 Líkangerð og vindgangatilraunir fyrir vélfugla

Við getum litið á flug vélfugla sem, öðruvísi en hefðbundin flugvél með fasta, stífa (e. rigid) vængi, nýtir vængsláttarhreyfingar vængja sinna til myndunar beggja í senn, lyftikrafts og knýs. Þannig verða kraftar fyrir flug slíkra flygilda óstöðugir með tilliti til tíma, sem er öfugt við hefðbundnar flugvélar þar sem að stöðugt kraftajafnvægi ríkir í flugi í jafnri hæð og á jöfnum hraða. Þar að auki verða vængirnir aðalstjórnartækin og mjög mikilvægt að vængsláttarhreyfingar verði ekki til þess að minnka stjórn hæfni (e. control performance) þeirra (Rayner, 2001). Það er því ljóst að greining og líkanagerð loftaflsfræðilegra eiginleika vélfugla verður mjög fljótt mun flóknari heldur en fyrir hefðbundnar flugvélar. Við það bætist að sá stærðar- og flughraðaflokkur sem slíkt flygildi fellur í jafngildir í flestum tilfellum streymisaðstæðum þar sem Reynoldstala er lægri en 200.000. Rannsóknunum í loftaflfræði við slíkar aðstæður hefur skort talsverða athygli í gegnum tíðina þar sem að áherslan hefur aðallega beinst að þróun mannaðra flugvéla, en þær streymisaðstæður sem eiga við flugsvið þeirra jafngilda mun hærri Reynoldstölum. Þó hefur áhugi á rannsóknum við streymisaðstæður þar sem Reynoldstölur eru lágar aukist til muna hin seinni ár, einkum með framþróun í tölvu- og rafeindatækni sem gera mönnum kleift að hanna afl- og stýrikerfi sem komast fyrir í mun minna rúmmáli en áður var (Mueller, 2001).

5.1 Vélfuglar á flugi í jafnri hæð og á jöfnum hraða

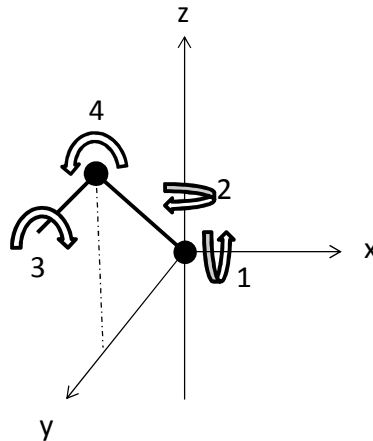
Einfaldast er að byrja að ræða og skilgreina flug út frá flugi í jafnri hæð og á jöfnum hraða. Eins og áður sagði verður kraftajafnvægið sem nauðsynlegt er að ríki fyrir flug í jafnri hæð og á jöfnum hraða óstöðugt með tilliti til tíma í tilfelli vélfugla. Sem fyrstu nálgun getum við þó byrjað á því að skipta flugham slíks flygildis í tvennt. Sá fyrri myndum við kalla svifham, þar sem að vélfuglinn nýtir sér stöðuorku sína til að viðhalda hreyfiorku. Því fylgir að sjálfsögðu lækkun í flughæð og þar með missum við skilyrðið um að vélfuglinn haldi jafnri hæð, nema að aðrir utanaðkomandi kraftar, eins og uppstreymi lofts undir fuglinn komi til. Hinn flughamurinn yrði síðan vængsláttarhamur, þar sem að vélfuglinn nýtir sér síendurteknar vængsláttarhreyfingar til að mynda í senn, bæði láréttan og lóðréttan kraft til að viðhalda kraftajafnvæginu. Í því tilfelli er hentugt að hugsa um atlagið (e. impulse) sem ein vængsláttarsveifla veitir fuglinum og jafngildir neikvæðu atlagi frá viðnámskröftum yfir eina vængsláttarlotu fyrir fastan skriðþunga og þar með stöðugt flug.

5.2 Svifhamur

Við höfum áður séð að besta svifhorn jafngildir andhverfu svifstuðuls. Vélfugl í svifi er á engan hátt frábrugðinn hefðbundnum flugvélum, hann einfaldlega breiðir út vængi sína eins og hann getur og reynir að svífa sem lengst miðað við þá flughæð sem hann er staddur í og það streymisástand sem ríkir. Það gerir hann á sem áhrifríkasta hátt með því að velja sér að fljúga á því áfallshorni sem að gefur besta svifhorn því þá tapar hann lágmarksflughæð miðað við flogna vegalengd.

5.3 Vængsláttarhamur

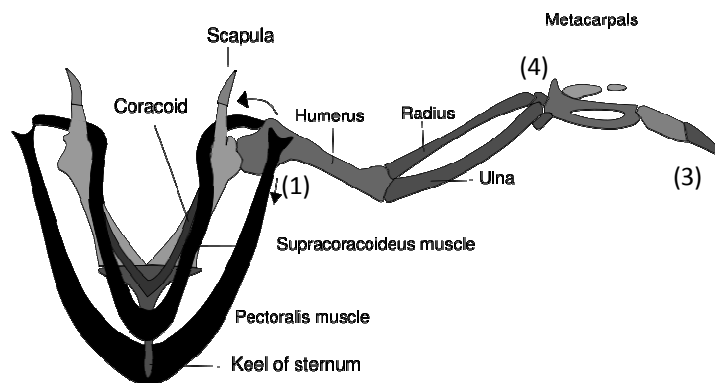
Til þess að viðhalda orkuástandi sínu, þ.e. flughæð og hraða, þarf fuglinn að nýta sér eiginleika vængja sinna til hröðunar lofts í andstæða stefnu við þyngdar- og viðnámskraft. Vandinn liggur hins vegar í því hvernig hann á að gera það. Fyrir flesta fugla, sérstaklega þá stærri, leysir náttúran vandamálið á máta sem lýsa má vélrænt með því að skipta vængjaslætti í þrívíðu rúmi upp í fjórar grunnhreyfingar. Ef við skilgreinum x-ás sem langás (e. longitudinal axis), y-ás sem þverás (e. lateral axis) og z-ás sem lóðás (e. vertical axis) getum við lýst þessum hreyfingum á eftirfarandi hátt (Azuma, 2006):



Mynd 81: Hreyfilysingarmynd af fuglsvæng.

1. Hreyfing um x-ás sem við nefnum blakhreyfingu (e. flapping).
2. Hreyfing um z-ás sem við nefnum fram- og aftur hreyfingu (e. lead lag).
3. Vindingu um langás vængsins sem við köllum fjöðrun (e. feather).
4. Hreyfingu um liðamót á miðju vængsins (olnboga) sem við köllum spönnun (e. spanning).

Í gegnum eina vængsláttarsveiflu spilar fuglinn svo á þessar hreyfingar þannig að útkoman verður tímaháður kraftavigur sem að skilar í heildina lóðréttum krafti, sem myndast aðallega á þeim hluta vængsins sem er næst skrokknum og láréttum krafti, sem að ytri hluti vængsins sér um að mynda með því að vinda mismikið upp á vænginn eftir stöðu vængsláttarsveiflunnar. Að auki eru vængir fugla sveigjanlegir (e. elastic), sem hjálpar vængnum að aðlagast loftstreyminu. Þannig nær fuglinn að besta áfallshorn á öllu vænghafinu miðað við staðbundna áfallshraðavigna (e. total inflow velocity) loftstreymisins. Skoðun á aflvél, þ.e. vöðvum, fugla leiðir í ljós að langstærsti einstaki vöðvinn er brjóstvöðvinn (e. pectoralis muscle) sem stjórnar aðallega grunnhreyfingu 1, þ.e. blakhreyfingunni. Tölfræðileg athugun leiðir í ljós að þyngd brjóstvöðvans jafngildir frá 10% - 30% af heildarþyngd stærri fugla en allt að 40% fyrir smærri fugla eins og kólíbrífugla, dúfur og svölur, sem hafa það sammerkt að vera einstaklega liprir flugfuglar (Azuma, 2006). Út frá þeirri staðreynd að þyngd brjóstvöðva sé svo hátt hlutfall heildarþunga fugla má fullyrða að blakhreyfingin (1) sé sú hreyfing sem ræður mestu um afl fugla sem nýtanlegt er á flugi, meðan að hinar hreyfingarnar segja meira til um hvernig það afl er notað til myndunar kraftvigursins.



Mynd 82: Þversnið af vöðvauppbyggingu fugls. Grunnhreyfingar 1, 3 og 4 eru merktar inn á myndina.¹

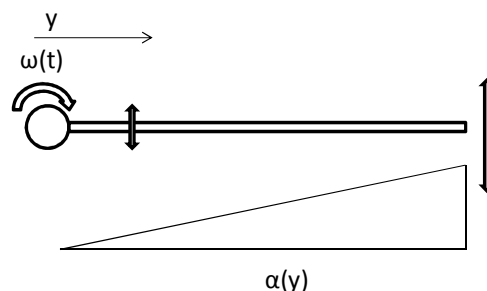
¹ Mynd: <http://www.rexresearch.com/ornithopter/ornithopter.htm> (30/11/2011)

5.4 Áfallshorn og kraftamyndanir stífs vængs í blakhreyfingu.

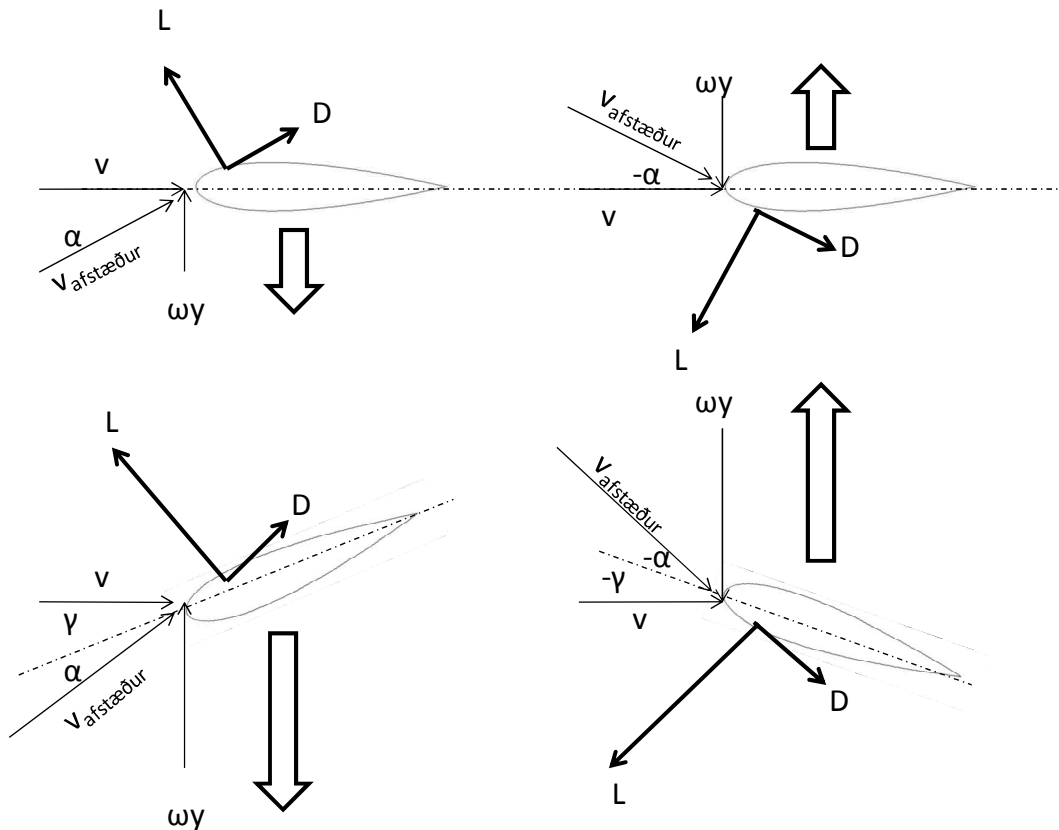
Við höfum áður sýnt fram á mikilvægi áfallshorns til að ákvarða yfirborðskrafta vængsniðs. Hugsum okkur fugl með stífan (e. rigid), samhverfan væng með vænglínu samsíða streymishraða. Hann framkvæmir hreina blakhreyfingu, sem er merkt með (1) á mynd 81. Þegar vængurinn sjálfur er kominn á hreyfingu, með stefnu hornrétt á streymishraða, flækjast málin örlítið. Fyrir væng sem að blakar um ás sem að er samsíða straumstefnu og staðsettur við skrokk fuglsins er augljóst að afstæður hraði (e. relative wind) við vængenda verður hærri og með aðra stefnu en hraðinn við vængrótina, nema í topp-og botnstöðu þar sem vængurinn stendur kyrr augnablik. Þannig verður áfallshornið fall af staðsetningu á vænghafi, blaktíðni, blakútslagi og streymishraða loftstreymis og stefna kraftvigursins hornrétt á hornstöðu vængsins í hverju tilfalli. Áfallshorni á hverjum stað y á vænghafinu frá skrokk að vængenda má því lýsa með jöfnunni:

$$\alpha(t, y) = \tan^{-1} \left(\frac{\omega(A, F, t) \cdot y}{v} \right)$$

Þar sem ω táknar hornhraða, sem stjórnast af útslagi (A) og blaktíðni (F), y táknar staðsetningu á vænghafi út frá skrokk fuglsins, v táknar streymishraða loftsins og t táknar tíma þar sem að áfallshornið er breytilegt með tilliti til tíma. Mynd 83 sýnir lausn jöfnunnar myndrænt fyrir fast, óundið (e. untwisted) vængsnið. Með aukinni blaktíðni og/eða útslagi eykst hornhraðinn og þar með lóðréttur þáttur afstæða vindhraðans sem að gefur fuglinum tilefni til að fara að snúa vængnum um þverás sinn (fjæðra, fjöðrunarhorn hér eftir táknað með γ) til að viðhalda besta áfallshorninu, sem ákvarðast eingöngu af því að mynda sem mestan lyftikraft. Það gerir vængur á ofrisáfallshorninu α_{crit} (mynd 84). Út frá sjónarmiði fuglsins hafa skilyrðin nú breyst til muna því að bæði stærð og stefna lyftikraftsins (sem er hornétt á stefnu afstæða vindhraðans) hafa breyst þannig að þáttur heildarkraftsins í lárétta stefnu, sem er summa lárétta þátta lyfti og viðnámskraftsvigra, er nú mun meiri en áður og fuglinn getur þannig viðhaldið meiri flughraða en áður. Höfum það í huga að sammerkt er með öllum þessum tilfellum að áfallshorn upp við skrokk er 0° og því engin breyting í kraftamyndun í því sniði. Hins vegar er stærð og stefna streymishraðans alls staðar sú sama og því ekki vitlaust að hafa bingu á vængnum upp við skrokkin til að mynda jafnan lóðréttan kraft þar sem sæi að mestu leyti um að vega upp á móti þyngd fuglsins. Bungan myndi svo minnka eftir því sem utar dregur og endaði sem samhverfur við vængenda, sem er hentugast með tilliti til myndunar jákvæðra krafta sem verka í lárétta stefnu. Með auknum flughraða eykst hraði loftstreymis og fuglinn þarf á ný að hagræða fjöðrunarhreyfingunni til að halda sér á besta áfallshorni. Þar að auki þarf fuglinn stöðugt að vera að gera smábreytingar á áfallshornum sitt hvors vængs til að viðhalda stefnu eða framkvæma stjórnhreyfingar, jafnvel í ókyrru lofti. Frá tæknilegu sjónarmiði fylgir blakhami vélfugls þannig talsvert mikil reglunarvinna með tilheyrandi þörf á reiknigetu stýrikerfis og kvikri svörun vélbúnaðar.



Mynd 83: Breyting á áfallshorni fasts vængsniðs sem fall af vænghafsstaðsetningu (vængur í miðstöðu – hornraði og áfallhorn á hverjum stað y í hámarki.)



Mynd 84: Breyting í kraftamyndun með aukinni blaktíðni og/eða útslagi.

Ef við gerum ráð fyrir því að slíkur búnaður sé fyrir hendi getum við haldið áfram að velta fyrir okkur hvernig fuglinn ætti að beita þeim tveimur hreyfingum sem hann ræður yfir til að mynda láréttan kraft. Mynd 84 sýnir þróun kraftajafnvægis á föstum punkti í einni vængsláttarsveiflu með aukinni blaktíðni (neðri myndir). Við getum stillt upp jafnvæginu (í hverju vængsniði) á eftirfarandi hátt:

Fyrir láréttan kraft:

$$F_X = L \cdot \sin(|\gamma + \alpha|) - D \cdot \cos(|\gamma + \alpha|) \quad (1)$$

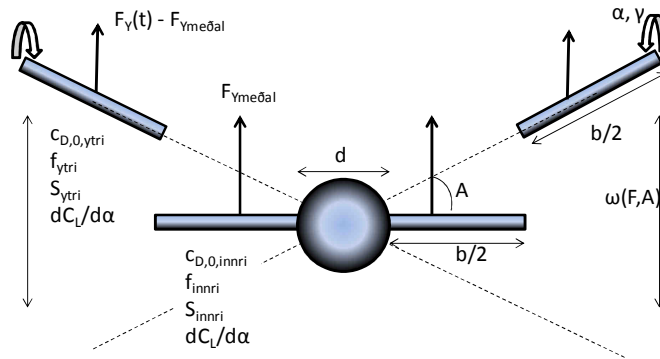
Fyrir lóðréttan kraft:

$$F_Y = L \cdot \cos(\gamma + \alpha) + D \cdot \sin(\gamma + \alpha) \quad (2)$$

Þar sem F_X táknar heildarkraft í lárétta stefnu og F_Y heildarkraft í lóðréttu stefnu, þ.e. andsælis stefnu þyngdarkrafts. Við sjáum að fyrir lóðréttu stefnu mun krafturinn sveiflast um ákveðið gildi í kringum núllstöðu sem ákvarðast af bingu vængsins. Fyrir lárétta kraftana er augljóst að við fáum tvo jákvæða toppa í hverri sveiflu, einn þegar vængurinn er á leið upp og annan þegar hann er á leiðinni niður. Þá höfum við áður séð hvernig áfallshornið, sem er beintengt við myndun lyfti og viðnámskrafta, breytist með aukinni vegalengd frá skrokki að vængenda fyrir fasta blaktíðni og útslag. Þannig verða lausnir jafnanna hér að ofan háðar geyismörgum breytistærðum svo að hér er kominn tími til að gera nálgun til að einfalda lausnina.

5.5 Reiknilíkan af vélfugli

Hugsum okkur að við skiptum vængnum, sem við gerum ráð fyrir að sé stífur og hafi ferhyrnt ofanvarpsflatarmál, í tvo hluta, innri væng sem að næði frá skrokki fuglsins að hálfri vegalengdinni að vængenda og ytri væng sem að næði yfir hinn helminginn, að vængenda (mynd 85 Mynd 85). Á innri helming setjum við einsleitt vængsnið með föstu vængbunguhlutfalli og gerum ráð fyrir, þar sem að skapað horn af völdum staðbundins áfallsvindhraða ($\alpha + \gamma$) á þeim hluta vængsins er lægra en ytri hlutar, að hann hafi hverfandi áhrif á sveiflur í lóðréttum og láréttum þáttum heildarkraftsins. Með öðrum orðum, við lítum á hann sem óhreyfanlegan. Ytri vænginn lítum við á sem samhverft vængsnið með meðaláfallshorn það sama og raunáfallshornið í staðsetningunni $\frac{3}{4}$ af vegalengdinni frá skrokk að vængenda. Markmiðið á þeim hluta vængsins er að besta áfallshornið þannig að í öllum tilfellum sem það er mögulegt jafngildi það áfallshorni sem næst α_{crit} . Mynd 86 sýnir hvernig slík bestun gæti mögulega farið fram. Þar er litið svo á að það áfallshorn sem kerfið leitast við að halda jafngildi ofrishiorni (α_{crit}) að frádregnum 3° til að skapa öryggi gagnvart ofrishi. Þar sem að áfallshornið nær því horni á ákveðnum tímabilum (merkt með örvum) að fara yfir $\alpha_{crit} - 3^\circ$ mun fuglinn beita fjöðrunarhreyfingu til að snúa vængnum til þess að halda því áfallshorni. Sveiflan sem sýnd er á myndinni miðar við að vængsláttarsveiflan sé hrein sínussveifla, blaktíðnin sé 2 Hz, blakútslagið 30° , streymishraði 10 m/s og vænghaf annars vængsins 0,5 m. Við skilyrðum fjöðrunarhornið γ með stefnu hornhraða þannig að það fái aldrei að verða lægra en 0° þegar hornhraði er jákvæður og aldrei hærri en 0° þegar hornhraði er neikvæður (Azuma, 2006).



Mynd 85: Nálgunarlíkan af vélfugli með væng skipt upp í innri og ytri vænghluta.

5.5.1 Ytri vængur.

Ef við látum b tákna vænghaf annars vængsins, S_{ytri} tákna ofanvarpsflatarmál ytri vængjar, q tákna hreyfibrýsting og ákveðum að blaksveifla jafngildi hreinni sínussveiflu með útslagið A og blaktíðnina F getum við stillt jöfnum fyrir lyfti-og viðnámskrafta sem fall af áfallshorni inn í (1) og fengið jöfnu sem lýsir láréttum krafti frá ytri væng (T) sem fall af tíma á eftirfarandi hátt :

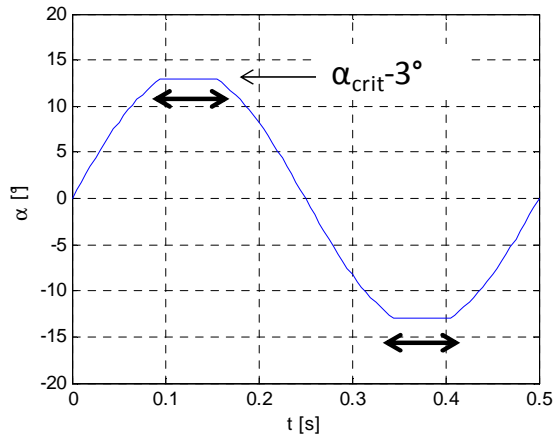
$$T(t) = q \cdot S_{ytri} \left(\frac{dC_L}{d\alpha} |\alpha(t)| \cdot \sin(|\gamma(t) + \alpha(t)|) - (C_{D0,ytri} + f_{ytri} \cdot \alpha(t)^2) \cdot \cos(|\gamma(t) + \alpha(t)|) \right)$$

Þar sem:

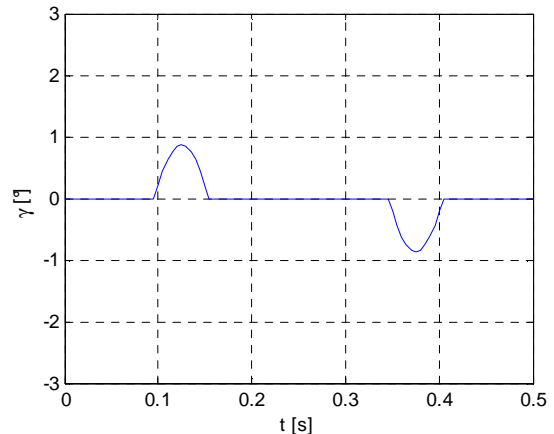
$$\gamma(t) = \tan^{-1} \left(\frac{\omega(t) \cdot 0,75b}{v} \right) = \tan^{-1} \left(\frac{A \cdot F \cdot 2\pi \cdot \sin(2\pi \cdot F \cdot t) \cdot 0,75b}{v} \right) - \alpha(t) \cdot \text{sgn}(\omega(t))$$

Og:

$$\omega(t) \cdot \gamma(t) \geq 0$$



Mynd 86: Áfallshornsferill í gegnum eina vængsláttarsveiflu með blakhreyfingu og fjöðrun.



Mynd 87: Fjöðrunarhorn í gegnum eina vængsláttarhreyfingu.

Til þess að fuglinn haldi hraða sínum þarf atlag (e. impulse) lárétta kraftsins að vera jafnt atlagi viðnámskrafts frá skrokk og innri væng fuglsins, en tekið er tillit til viðnámskrafts ytri vængs í jöfnu hér að ofan. Við skilgreinum skrokkin sem hringlaga straumlínulagaðan hlut með þvermálið d . Þá verður viðnámskraftur frá skrokknum (D_b):

$$D_b = q \cdot \pi \cdot \frac{d^2}{4} \cdot 0,1$$

Þar sem q táknar hreyfiþrýsting og stuðullinn 0,1 má áætla sem viðnámsstuðul fyrir straumlínulagaða hluta svo sem skrokk fugla (Pennycuick, 2008). Fyrir ákveðinn, fastan streymishraða (stöðugt flug) verður viðnámskrafturinn frá skrokknum og innri væng fasti og atlögin sem T , D_{innri} og D_b veita fuglinum verða að núlla hvort annað út:

$$2 \int T(t) dt = \left[2 \left((C_{D,0,innri} + f_{innri} \cdot \alpha^2) \cdot q \cdot S_{innri} \right) + D_b \right] \int dt$$

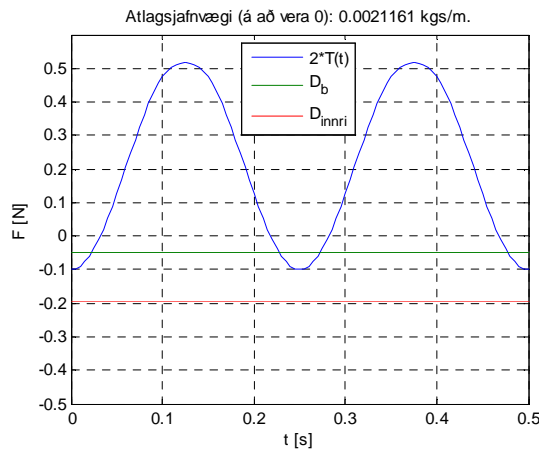
Þar sem stuðullinn 2 kemur til sögunnar til að gera ráð fyrir báðum vængjum. Mynd 88 sýnir hvernig kraftarnir þróast sem fall af tíma yfir eina blaksveiflu og birtir gildi atlagsjafnvægisins, sem á að vera 0 eða mjög nálægt 0 til að fuglinn teljist í stöðugu ástandi.

5.5.2 Innri vængur

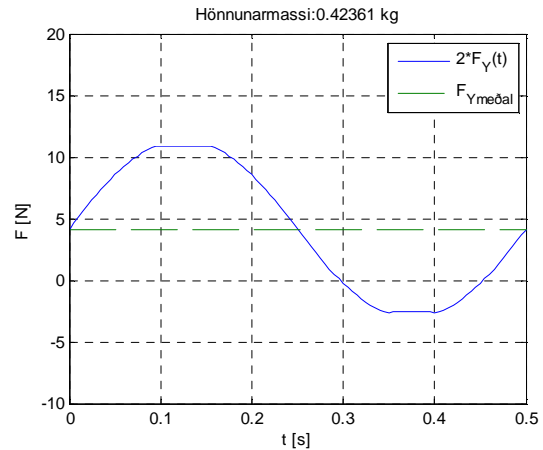
Tilgangur innri vængsins er að veita stöðugan lóðrétta kraft til að vega á móti þyngd fuglsins í stöðugu flugi. Þannig ætti áfallshorn hans, sem við lítum á sem fast, undir hönnunarkringumstæðum að jafngilda því áfallshorni sem hámarkar lyftikraft á móti viðnámskrafti. Fyrir lóðrétta kraft getum við nú sett fram jafnvægisjöfnu, sem að jafnframt ákvarðar leyfilega hönnunarþyngd (m) fuglsins:

$$W = m \cdot g = q \cdot S_{innri} \cdot \left(C_{L,\alpha=0^\circ} + \frac{dC_L}{d\alpha} \cdot \alpha_{L/D,max} \right) \quad (3)$$

Blakhreyfingin hefur einnig þau áhrif að hún veldur sveiflum í lóðrétta krafti um hönnunarþyngdina (sem skilgreind er hér að ofan) með lóðrétta þætti kraftanna $L(t)$ og $D(t)$.



Mynd 88: Kraftar í lárétta stefnu sem fall af tíma yfir eina blaksveiflu, atlagsjafnvægi fæst þegar mismunur flatarmála ferlanna yfir og undir línunni $F=0$ er enginn.



Mynd 89: Heildarloftaflskraftur í lóðrétta stefnu sem fall af tíma yfir eina blaksveiflu.

Heildarjafna sem lýsir lóðrétum loftaflskrafti eins vængs með tilliti til tíma lítur því svona út, þegar búið er að stinga inn í (2) gildum fyrir lyfti- og viðnámskraft sem fall af áfallshorni og bæta við áhrifum innri vængs (3):

$$F_y(t) = q \cdot S_{ytri} \left(\frac{dC_L}{d\alpha} \alpha(t) \cdot \cos(\gamma(t) + \alpha(t)) - (C_{D,0,ytri} + f_{ytri} \cdot \alpha(t)^2) \cdot \sin(\gamma(t) + \alpha(t)) \right) + \dots$$

$$\dots + q \cdot S_{innri} \cdot \left(C_{L,\alpha=0^\circ} + \frac{dC_L}{d\alpha} \cdot \alpha_{L/D,max} \right)$$

Mynd 89 sýnir þróun í lóðrétum loftaflskröftum sem fall af tíma yfir eina blaksveiflu. Við sjáum að sveiflurnar um miðgildið eru talsvert miklar, en rúnnast af á meðan fjaðurhreyfingin heldur áfallshorni föstu. Það segir okkur að eftir því sem að við reynum að halda herra áfallshorni til að ná fram meiri krafti í lárétta stefnu, aukast sveiflurnar í lóðrétta kraftinum.

5.5.3 Tregðukraftar

Við loftaflskraftana í lóðrétta stefnu bætist svo tregðukraftur, þ.e. kraftur vegna hröðunar vængjanna, sem sífellt er til staðar nema í það augnablik sem að hornhraðinn stendur í stað í miðri upp- eða niður sveiflu (þar sem að jákvæður kraftur í lárétta stefnu er í hámarki). Ef við gerum ráð fyrir einsleitri þyngdardreifingu vængsins frá rót að enda getum við lýst tregðukrafti fyrir annan vænginn sem:

$$F_t = \frac{2\tau}{b}$$

Þar sem τ stendur fyrir snúningsvægi og er fundið samkvæmt:

$$\tau = I \cdot \dot{\omega}$$

Þar sem I er tregðuvægi vængsins og reikna má samkvæmt¹:

$$I = \frac{m_v \cdot b^2}{3}$$

¹ (Young & Freedman, 2008)

Þar sem m_v táknar massa annars vængsins. Miðað við að hornhraðanum sé lýst eins og áður fæst fyrir hornhröðunina:

$$\dot{\omega}(t) = A \cdot 4\pi^2 \cdot F^2 \cdot \cos(2\pi \cdot F \cdot t)$$

Við getum nú sett fram jöfnu sem lýsir tregðukröftum annars vængsins með tilliti til tíma:

$$F_t = \frac{8}{3} \cdot A \cdot b \cdot F^2 \cdot m_v \cdot \pi^2 \cdot \cos(F \cdot 2\pi \cdot t)$$

Við sjáum að toppur tregðukraftferils er 90° á undan toppi lóðréttu loftaflskrafta. Mynd 90 sýnir kraftferla tregðu- og loftaflskrafta sem fall af tíma yfir eina vængsláttarsveiflu. Massi vængja er stilltur sem 20% af hönnunarmassa. Á mynd 91 hafa kraftarnir verið lagðir saman. Þannig fæst heildarkraftur (F_{heild}) sem verkar á fuglinn í lóðréttu stefnu yfir eina vængsláttarsveiflu.

5.5.4 Afljafnvægi

Aflið sem að fuglinn nýtir sér til að koma sér áfram jafngildir vinnu vængjanna á tímaeiningu. Þannig fæst aflþörf á hverjum tímapunkti með margfeldi láréttra og lóðréttra kraftferla (að frádrægnum lóðréttum meðalkrafti sem er í jafnvægi við þyngdarkraft) við streymishraða í viðkomandi átt. Þannig fæst aflþarfarferill fyrir lárétt afljafnvægi samkvæmt:

$$P_X(t) = v \cdot F_X(t) \quad [F_X \geq 0]$$

og fyrir lóðréttu afljafnvægið:

$$P_Y(t) = \omega(t) \cdot 0,75b \cdot (F_Y(t) - W + F_t(t)) \quad [F_Y - W, F_T \geq 0]$$

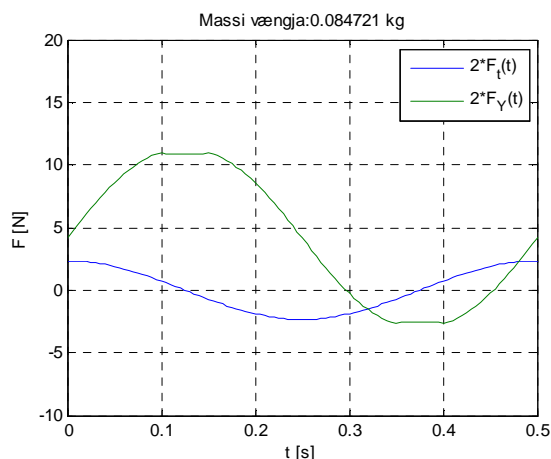
Heildarvinnan sem framkvæmd er í einni vængsláttarsveiflu:

$$\Delta W = \int_0^{1/F} P_X(t) + P_Y(t) dt$$

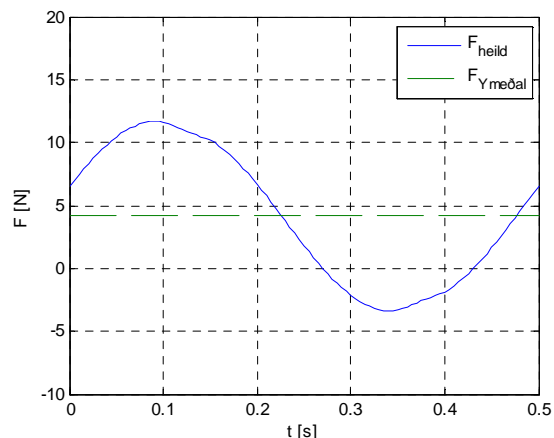
Meðal aflþörf blakhamms fæst svo margfeldi vinnunnar og blaktíðni:

$$\bar{P} = \Delta W \cdot F$$

Mynd 92 sýnir glögglega hversu mikið afl fer í að viðhalda vængslættinum í lóðréttu stefnu. Það afl nýtist ekki í neitt nema að hraða fuglinum upp og niður á víxl á flugi sem eru óæskileg hliðaráhrif þessarar tegundar vængsláttar. Hægt er að hafa áhrif á þessa aflþörf með því að lækka blaktíðni eða blakútslag, en á kostnað lækkaðs lárétts krafts og þar með flughraða. Mikill ávinningur fælist því í að geta hagrætt hreyfingum eða jafnvel bætt við grunnhreyfingu í því skyni að dempa eða eyða þessum sveiflum. Ljóst er að til að uppfylla það skilyrði þarf að koma til talsvert flóknari útbúnaður sem náttúrunni hefur þó tekist að þróa, sé blakhamur náttúrlegra fugla greindur kemur í ljós að fagaðar vængsláttarhreyfingar þeirra leiða í flestum tilfellum ekki til neinnar lóðréttrar hröðunar.



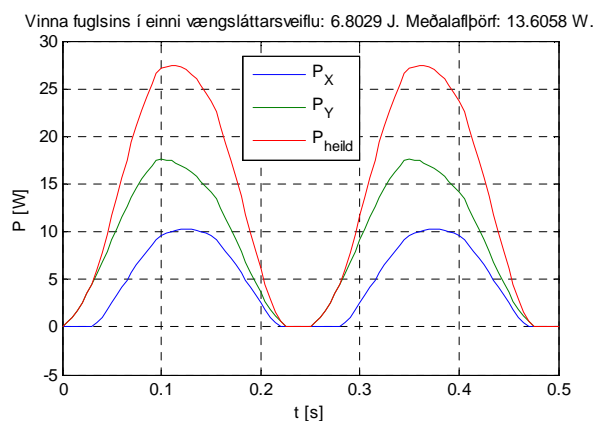
Mynd 90: Samanburður tregðukrafts og loftaflskrafta í lóðréttu stefnu.



Mynd 91: Heildarkraftur í lóðréttu stefnu sem fall af tíma yfir eina vængsláttarstefnu.

5.6 Fastur lóðréttur kraftur í vængsláttarlotu.

Rannsóknir á vökum (e. wake) sem myndast á eftir náttúrulegum fuglum í vængslætti hafa leitt í ljós að vakarferillinn gengur í raun í bylgjum, þannig að vakaryfirborðið (e. vortex wake surface) breytir um stefnu í samræmi við á hvaða stað í blaksveiflunni þeim hluta vakarferilsins var varpað (e. shed) af vængjum fuglsins. Við höfum áður séð hvar í vængsláttarsveiflunni hámarks loftaflskraftar myndast, þ.e. þegar hornhraði blaksveiflunnar er í hámarki, sjá myndir 88 og 89. Í ljós kemur að fuglinn notar sér samspil grunnhreyfinga til að halla vængsláttarplani (e. stroke plane) sínu til að gefa vakaryfirborðinu neikvæða stefnu meðan lóðkraftamyndun er í jákvæðu hámarki og jákvæða stefnu þegar lóðkraftamyndun er í neikvæðu hámarki. Þannig er niðurstreymi (e. induced velocity, downwash) beint niður á við og aftur á bak, en bylgjumyndunum gefur til kynna að lóðrétti þáttur niðurstreymisins helst nánast fastur í gegnum heila vængsláttarstefnu (Azuma, 2006). Sé þessi niðurstaða tengd við myndun lyftikrafts út frá skriðþungalögmáli (sjá kafla 2.15) kemur í ljós að lóðkraftur helst þannig fastur í gegnum vængsláttarhreyfinguna og jafngildir þyngd fuglsins. Til þess að ná að líkja eftir þessum áhrifum er ljóst að bæta þyrfti við einni grunnhreyfingu í vélfuglsbúnaðinn okkar, fram- og aftur hreyfingunni (e. lead lag), sem gerði okkur þá kleyft að halla vængsláttarplaninu eftir þörfum.



Mynd 92: Aflþarfarferlar vélfugls í einni vængsláttarsveiflu.

5.7 Nauðsyn á gagnagrunni til að líkja eftir streymisskilyrðum.

Eins og fram kom í fyrstu málsgrein kafalans hér að ofan er afar lítið til af flokkuðum, stöðluðum gögnum sem lýsa myndun lyfti og viðnámskrafts mismunandi vængsniða á Reynoldstölum lægri en um það bil 200.000, en slík gögn eru nauðsynleg í líkanaframsetningu fyrir smærri flygildi líkt og þeirri sem lýst var hér að ofan. Ef vélfugl á á annað borð að vera á stærð við raunverulegan fugl úr náttúrunni er nauðsynlegt að koma upp slíkum gagnagrunni. Sem fyrstu aðgerð í þeirri viðleitni framkvæmdu höfundar þessarar skýrslu tvær tilraunir, á föstum og blakandi vængjum, sem höfðu þann tilgang fyrst og fremst að sýna fram á raunhæfi þess að stunda slíkar rannsóknir í þeirri aðstöðu sem Háskólinn í Reykjavík býður upp á og höfundar áttu stóran þátt í að skapa. Næstu þrír kaflar fjalla um uppsetningu, framkvæmd og niðurstöður þeirra tilrauna. Fyrst kemur skýrsla um tilraun þar sem að yfirborðskraftar kyrrstæðra vængja voru mældir á þremur mismunandi Reynoldstölum. Þar eru beinar niðurstöður settar fram, auk þess sem að kraftferlar voru nálgðir samkvæmt skilgreiningum sem settar voru fram í kafla 2 um grunnhugtök í straum- og loftaflsfræði. Niðurstöður þeirra nálgana eru svo settar fram á töfluformi og eru þær meðal annars ætlaðar til notkunar í líkönum eins og því sem sett var fram hér að ofan. Þar á eftir kemur kafla sem að sýnir hvernig raunmæligögnin koma út í samanburði við vængsniðahermiforritið XFOIL, sem er gjarnan notað til hönnunar vængja á smærri flygildi svo sem á fjarstýrð flugmódel. Í lokin kemur svo kafla um tilraun sem framkvæmd var með blakara, tæki sem höfundar þessarar skýrslu hönnuðu og smíðuðu sérstaklega til að framkvæma þá tilraun, en hreyfilýsing hans takmarkast við grunnhreyfingu 1. Eftir á að hyggja voru niðurstöður þeirrar tilraunar helst til að styrkja okkur í þeirri trú að það reiknilíkan sem var sett fram hér að framan endurspegli raunverulega hegðun slíks tækis nokkuð vel, sérstaklega með tilliti til lóðréttra kraftamyndana.

5.8 Kraftmælingar á kyrrstæðum vængjum.

Tilgangur þessarar tilraunar er tvíþættur. Í fyrsta lagi að sannprófa aðstöðuna, vindgöng, mælitæki o.s.frv. og hins vegar að hagnýta niðurstöðurnar sem grundvöll fyrir hönnun vængbúnaðs á vélfugl, þ.e. notfæra okkur túlkun á útkomu mælinga til að koma upp stöðluðu gagnasafni kraftferla mismunandi vængsniða við mismunandi streymiskilyrði, sem þó eiga það sameiginlegt að hafa Reynoldstölu á því bili sem að raunverulegur vélfugl myndi búa við. Auk þess eru bornir saman kraftferlar fyrir mismunandi þykkt, bunguhlutfall og staðsetningu hámarksbungu, sem eru skilgreiningabreytur NACA fjögurra stafa vængsniða. Eins og áður hefur komið fram gilda ekki endilega hefðbundin lögmál loftaflfræðinnar við þau streymiskilyrði sem skoðuð voru þar sem að Reynoldstala vængja smárra flygilda er talsvert lægri en hefðbundinna mannaðra flugvéla. Ekki er um mjög auðugan garð að gresja í bókum og vísindagreinum hvað varðar slíka gagnastöðlun þó að fjölmargir hafi áður gert tilraunir í vindgöngum við svipuð skilyrði. Má þar nefna þá G.E. Torres og T.J. Mueller (2001) sem könnuðu áhrif lágrar Reynoldstölu á vængi með lágt vænghlutfall ($AR < 2$) fyrir nokkur mismunandi vængsnið. Gagnagrunnur sá sem að settur er fram í niðurstöðum takmarkast þó við það að vænghlutfalli var haldið föstu í öllum tilfellum. Til að stækka grunninn mælum við því með að frekari sambærilegar tilraunir verði framkvæmdar á öðrum vænghlutföllum og niðurstöðurnar svo bornar saman við niðurstöður þessarar tilraunar með hliðsjón af fræðilegum hugtökum í loftaflfræði er varða vænghlutföll.

5.8.1 Skilgreining vængja

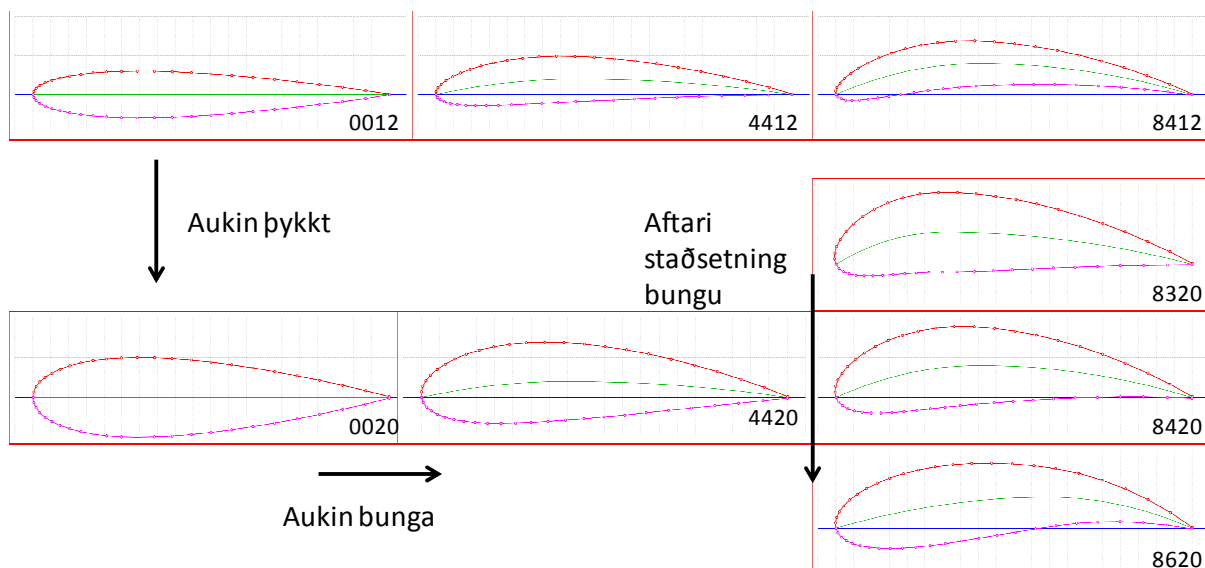
Allir vængir sem mældir voru höfðu einsleit vængsnið, þ.e. engin breyting á vængsniði með staðsetningu frá miðju. Vænghaf var í öllum tilfellum 60 cm, sem jafngildir breidd nothæfa mælisniðs vindganganna. Ákveðið var að gera tilraunina við fast vænghlutfall þannig að allir vængir hefðu vænghlutfallið 6. Þar sem að allir vængir höfðu ferhyrnt ofanvarpsflatarmál jafngildir það því að vænglína hvers vængs sé $c = 10$ cm.

5.8.2 Listi yfir mæld vængsnið.

Kannaðar voru breytingar í lyfti og viðnámskraftsstuðlum með breytingum í kennistærðum vængsniðanna, þ.e. þykkt, bungu og staðsetningu bungu. Einnig var gerð samanburðarmæling á væng með NACA0020 vængsniði sem ekki hafði verið plasthúðaður. Tafla 11 og mynd 93 sýna yfirlit yfir þau vængsnið sem voru prófuð:

Tafla 11: Yfirlit yfir mæld vængsnið.

Aukin bunga →			
Aukin þykkt →	NACA0012	NACA4412	NACA8412
			NACA8320
	NACA0020	NACA4420	NACA8420
			NACA8620
	NACA0020X (án plasthúðar)		



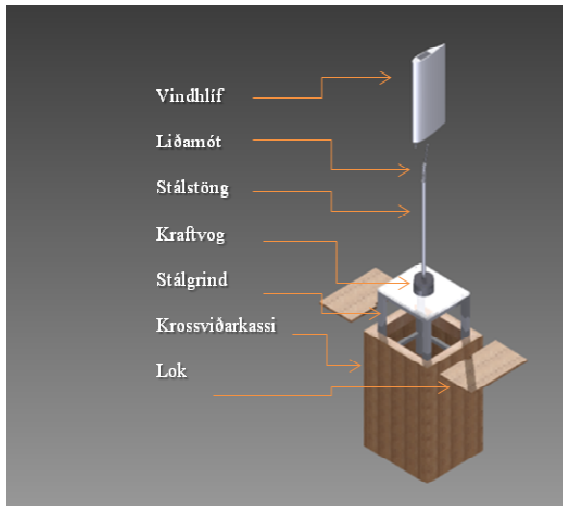
Mynd 93: Yfirlit yfir mæld vængsnið. Myndræn framsetning.

5.8.3 Lýsing á mælibúnaði

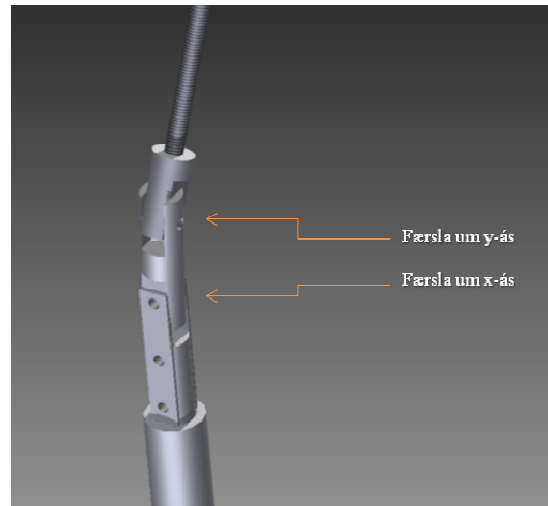
Notast var við kraftvog af gerðinni ATI – delta IP68 til að mæla krafta bæði í lóðrétta og lárétta stefnu. Var henni stillt upp með + x ásinn á móti streymisátt, áföst við lárétta plötu sem fest er við stálgrind með stillanlega fætur sem svo stendur á gólfinu. Neðst á stálgrindinni er hilla sem að ætluð er undir þyngingu til að gera búnaðinn stöðugri. Í þynginguna var notast við gangstéttarhellur sem vega um 25 kg. Upp úr kraftvoginni stendur stálstöng sem að hefur tvö liðamót á efri endanum, til stillingar á afstöðu vængs um x og y ás (mynd 95). Í kringum samsetninguna er svo krossviðarkassi sem að nær upp fyrir kraftvogina, en lok á kassanum er með gati í miðjunni þar sem að stálstöngin fer upp úr. Á lokið er svo fest vindhlíf (e. fairing) sem nær upp að neðri liðamótum. Upp úr liðamótunum stendur 6 mm snittteinn sem að vængir, sem hafa innsteypta 6 mm ró, skrufast á. Eru þeir svo stilltir af þannig að frambrún þeirra er samsíða y-ás og að lokum er önnur ró hert að vængnum til að festa afstöðu frambrúnarinnar. Uppsetningu mælibúnaðar má virða fyrir sér á mynd 94. Búnaðinum var þannig komið fyrir að notast var við miðlínu sem límd hafði verið á gólfið til að grófstaðsetja stálgrindina á y - ás. Því næst voru mældir 60 cm frá inntaki í mæliklefa (1/3 af heildarlengd) að miðju stangar. Loks voru mældir 150 cm frá vegg að miðju stangar til að staðsetja búnaðinn endanlega á y - ás. Því næst var þyngingu komið fyrir, þá var krossviðarkassi settur utan yfir, vog sett í samband í gegnum gat á hlið kassans, lok sett á kassann og loks var vindhlíf skrufluð á lokið. Notast var við 16 bita stafrænan gagnasöfnunarbúnað frá National Instruments. Var hann stilltur þannig að fyrir hverja gagnaöflunarkeyrslu voru tekin 500 mæligildi á söfnunartíðninni 1 kHz, en hvert mæligildi samanstendur af meðaltali 16 mældra gilda svo að raunsöfnunartíðnin var 62,5 Hz. Hver keyrsla stóð því yfir í 8 sekúndur.

Tafla 12: Kennitölur vængmælinga.

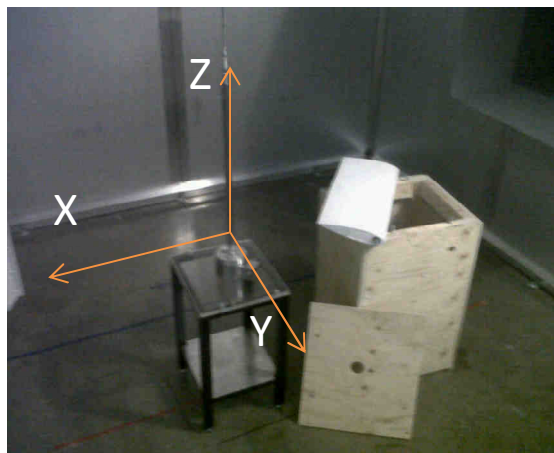
Söfnunartíðni	1 kHz
Meðaltalsstilling	16 gildi/mæligildi
Raunsöfnunartíðni	62,5 Hz
Söfnunargildi	500 mæligildi
Söfnunartími	8 sek



Mynd 94: Uppsetning mælibúnaðar



Mynd 95: Liðamót



Mynd 96: Hnitakerfi mælinga.



Mynd 97: Mæling í gangi.

5.8.4 Kvörðun kraftvogar

Kraftvogin er kvörðuð hjá framleiðanda samkvæmt staðli ISO9001. Nokkrar gerðir kvarðana eru til en þessi tiltekna vog er kvörðuð samkvæmt SI-330-30 kvörðun. Tafla 5 sýnir yfirlit yfir eiginleika mismunandi kvarðana vogarinnar.

5.8.5 Mælingar á áfallshorni.

Samkvæmt skilgreiningu á áfallshorni er það skilgreint sem hornið á milli straumstefnu og vænglínu. Þar sem að gera má ráð fyrir að a.m.k. meðalstraumstefna¹ vindganganna sé hornrétt á þyngdarkraft var ákveðið að notast við gráðuboga með lóðviðmið til að mæla áfallshorn. Mynd 98 sýnir gráðubogann, en ákveðið var að festa þyngingu neðst á lóðréttan hlutann til að gera mælinn nákvæmari og þægilegri í meðhöndlun.

¹ Ekki var mögulegt með þeim mælibúnaði sem var til reiðu þegar vindgangamælingar voru framkvæmdar að meta nákvæmlega stefnu vindhraðans í mælisniði, en þar sem að vindgöngin eru sett upp þannig að miðja inntaks vindganga, inntaks og úttaks mæliklefa og miðja viftu eru í nákvæmlega sömu hæð frá gólfi rýmisins má gera ráð fyrir því að meðalstraumstefna sé hornrétt á þyngdarkraft.



Mynd 98: Gráðubogi með lóðviðmiði.

5.8.6 Reynoldstala.

Fyrir vængsnið er Reynoldstölulýst sem:

$$Re = \frac{v \cdot c}{\nu}$$

Þar sem ν er vindhraði ótruflaðs loftstreymis [m/s], c er lengd vænglínu [m] og ν er kvikseigja (e. kinematic viscosity) [m²/s]. Þar sem að lengd vænglínu og kvikseigja lofts við ákveðið hitastig eru fastar¹ er okkar eina aðferð til að breyta Reynoldstölunni sú að breyta vindhraða loftstreymisins. Í okkar tilfalli er það gert með því að breyta tíðnibreytistöðni (F). Því breytist Reynoldstalan línulega með vindhraða og þar sem að vindhraði er línulega háður F , verður Reynoldstalan línulegt fall af F . Tafla 13 sýnir þá stuðla í Reynoldstölunni sem litið var á að héldist óbreyttir í öllum mælingum.

Tafla 13: Fastar í Reynoldstölunni

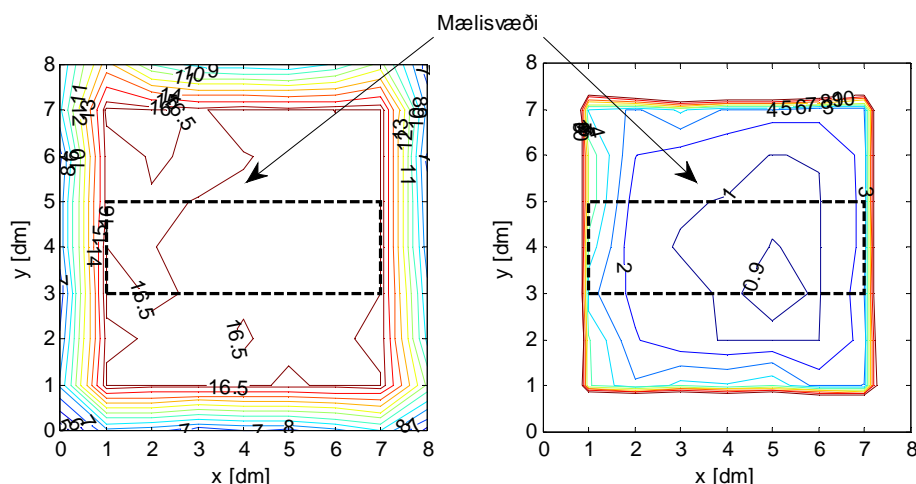
Fasti	Gildi
c [m]	0,1
ν [m ² /s]	$1,52 \times 10^{-5}$

Mælingar á öllum vængjum voru gerðar við þrjár mismunandi Reynoldstölur, $Re = 35.000, 73.000, 109.000$.

5.8.7 Fyrirkomulag mælinga

Þegar væng hafði verið komið fyrir samkvæmt lýsingu hér á undan, voru efri liðamót (hreyfing um y-ás) stillt þ.a. áfallshorn yrði -20° . Því næst var kraftvog núllstillt og vindgöngin ræst. Gerðar voru mælingar á þremur tíðnibreytistillingum, þ.e. $F = 10$ Hz, 20 Hz, 30 Hz og vindgöng stöðvuð til að breyta áfallshorninu. Gerðar voru mælingar á áfallshornum upp í $+20^\circ$ með 2° millibili. Þannig voru framkvæmdar 21 keyrsla á vindgöngum fyrir hvern væng sem mældur var. Til áætlunar meðalhraða og meðalvindflökts á áhrifasvæði vængs á loftstreymi var tekið meðaltal mældra hraða- og vindflökts gilda á 20×60 cm fleti sem nær frá $(x,y) = 1,3$ að $(x,y) = 7,5$ (mynd 99). Tafla 14 sýnir niðurstöður þeirra útreikninga.

¹ Hitastig í vindgangarými er stöðugt í 21°C .



Mynd 99: Áhrifasvæði vængmælinga (mælisvæði).

Tafla 14: Meðalvindhraði og meðalumfang iðustreymis á áhrifasvæði vængmælinga.

Stilling tíðnibreytis(F)	Meðalvindhraði [m/s]	Meðalumfang iðustreymis [%]
10 Hz	5,39	2,35
20 Hz	11,07	2,48
30 Hz	16,52	1,64

5.8.8 Skráarkerfi.

Út úr hverri mælikeyrslu kemur .csv (e. comma separated values) skrá með 500 mæligildum fyrir hvern kraftnema, sem auðkennd er með tíðnibreytitíðni (F) og áfallshorni (α) á eftirfarandi hátt. Fyrst koma tveir stafir *FF* sem segja til um hver tíðnibreytitíðnin var í þeirri keyrslu. Því næst kemur einn stafur *P* eða *M* sem segir okkur hvort að áfallshornið sé jákvætt eða neikvætt. Á hlutlausu áfallshorni ($\alpha = 0^\circ$) kemur stafurinn *P*. Að lokum koma einn til tveir stafir, α eða $\alpha\alpha$ sem segir til um algildi áfallshornsins, einn stafur ef það er undir 10 en tveir stafir fyrir gildi jöfn eða hærri 10. Dæmi um skráarnafn væri 30P12.csv sem túlka má sem mælingu sem gerð er á tíðnibreytitíðninni 30 Hz og að áfallshorn mælingarinnar sé $+12^\circ$. Til að auðkenna milli mismunandi vængsniða er svo hvert sett af mælingum vistað í sérstaka möppu sem ber nafn viðeigandi fjögurra stafa NACA vængsniðs.

5.8.9 Gagnaúrvinnsla.

Útbúið var Matlab forrit sem að les skránnar samkvæmt áður útskýrðu kerfi, tekur meðaltalsgildi fyrir kraft í X og Z stefnur, og setur þau inn í sitt hvort fylkið, D fyrir kraft í X-stefnu (viðnámskraftur), og L fyrir kraft í Z-stefnu (lyftikraftur). Hvert fylki inniheldur þrjá línuviga sem lýsa meðalkrafti sem falli af áfallshorni fyrir hverja tíðnibreytisstillingu. Einingalausir lyftikrafts-og viðnámsstuðlar voru svo reiknaðir út, út frá fyrrgreindum fylkjum, fyrir alla vængi, öll áfallshorn og alla vindhraða samkvæmt eftirfarandi jöfnum, fyrir lyftikraftsstuðul:

$$C_L = \frac{2 \cdot \langle L \rangle}{\rho \cdot S \cdot v^2}$$

Þar sem C_L er lyftikraftsstuðull, $\langle L \rangle$ er mælt meðalgildi lyftikrafts [N], ρ er eðlismassi lofts við mælihitastig (21°C) [kg/m^3], S er ofanvarpsflatarmál vængs [m^2] og v er vindhraði [m/s].

Fyrir viðnámsstuðul:

$$C_D = \frac{2 \cdot \langle D \rangle}{\rho \cdot S \cdot v^2}$$

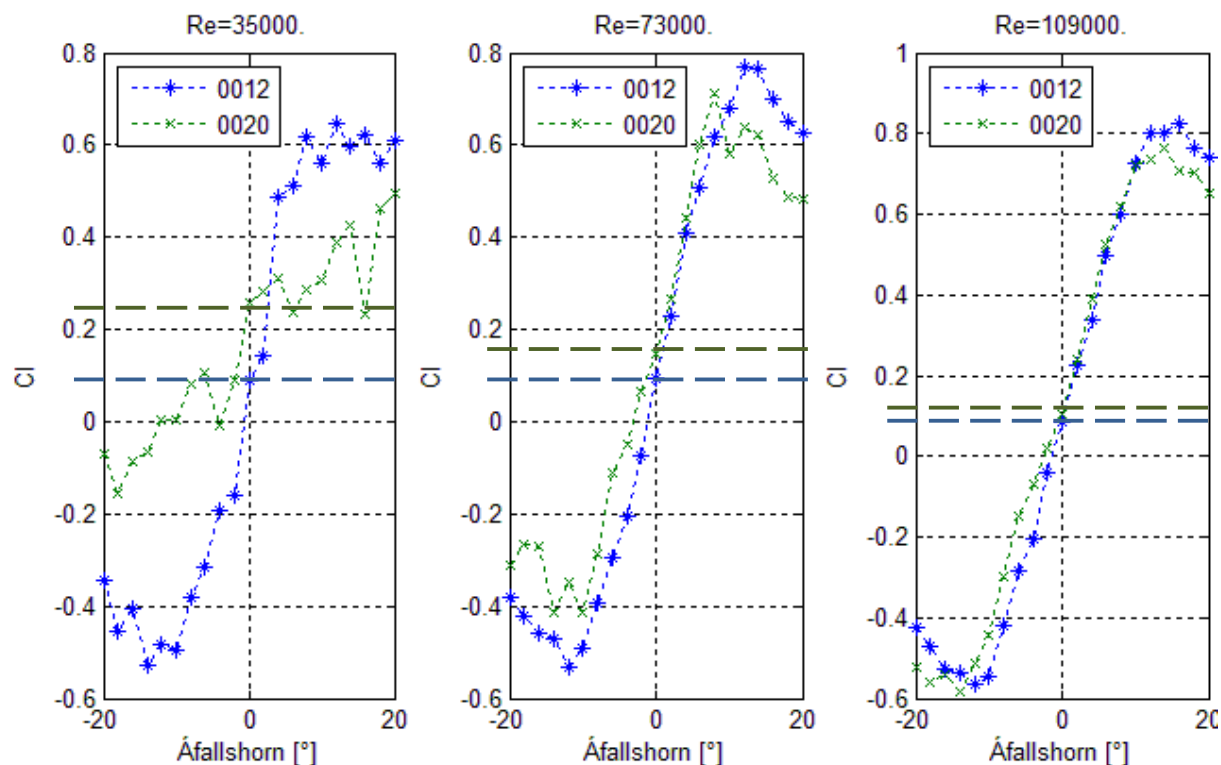
Þar sem C_D er viðnámsstuðull og $\langle D \rangle$ er mælt meðalgildi viðnámskrafts [N]. Teiknaðir voru upp ferlar sem sýna báða stuðlana sem fall af áfallshorni, pólgröf sem sýna lyftikraft sem fall af viðnámskrafti og gröf sem sýna C_L/C_D sem fall af áfallshorni. Þá voru lyftikrafts og viðnámsferlar sem fall af áfallshorni nálgaðir fræðilegum jöfnum á kerfisbundinn hátt og kennitölum ferlanna stillt upp í töflur til að auðvelda samanburð. Í öllum tilfellum var notast við Matlab til að setja upp ferla, famkvæma nálganir og reikna þá stuðla sem settir eru fram í niðurstöðukafla.

5.8.10 Föst skekkja í kraftvog vegna vatnsheldni

Nokkuð óvenjuleg skekkja greindist á samhverfum vængsniðum við fyrstu yfirferð mæligagna, þ.e. gröf sem sýndu lyftikraft sem fall af áfallshorni gáfu það til kynna að ekki næðist sama algildi á hámarkslyftikrafti á neikvæðum og jákvæðum áfallshornum auk þess sem að niðurstöður allra mælinga á samhverfum vængjum gæfi til kynna jákvæðan lyftikraft á 0° áfallshorni (mynd 100), sem er ekki í samræmi við það sem fyrirfram var búist við út frá öðrum heimildum. Svo virtist sem að í Z - ás kraftvogar væri innbyggð einhver föst skekkja sem ykist með auknum vindhraða, sem kom fram í mæligögnum sem lóðrétt hliðrun mæligagna. Ýmsar aðferðir voru reyndar til að finna skekkjuvaldinn en það var ekki fyrir en að við uppgvötuðum að kraftnemi fyrir Z - ás er innilokaður í loftþéttu rými og því næmur fyrir breytingum í umhverfisþrýstingi að kominn var fram þáttur sem dugði fullkomlega til að útskýra skekkjuna. Samkvæmt lögmáli Bernoullis eru vindhraði og loftþrýstingur í lokuðu rými tengdir þeim órjúfanlegu böndum að þegar annað hækkar lækkar hitt á móti. Í handbók með kraftvog er m.a.s. varað sérstaklega við þessari skekkju og leiðréttingastuðull gefinn upp miðað við vatnsdýpi, þ.e. 1907 N / 10 m. Þar sem að sá stuðull, uppreiknaður miðað við lækkun í loftþrýstingi ofmat raunverulega skekkjustærð ákváðum við að gera sjálfstætt mat á raunskekkjunni með mælingum, þar sem reynt var að líkja sem mest eftir raunverulegum mæliferli (sjá kafla 5.8.7 um fyrirkomulag mælinga). Mæld voru meðalgildi skekkjunnar í 5 mismunandi keyrslum fyrir allar mælitíðnir fyrir NACA0012 og NACA0020 með áfallshorn 0°, en marktækur munur mældist þar á milli. Tafla 15 hér fyrir neðan sýnir meðalskekkju fyrir sitt hvort vængsniðið. Gerð var sú nálgun að gera ráð fyrir að innbyggð í mælingar allra vængja með sama þykktarlutfall hefði verið sama fasta skekkja.

Tafla 15: Föst skekkja vegna vatnsheldni

Stilling tíðnibreytis(F)	Föst skekkja(E) – 12% þykkt [N]	Föst skekkja(E) – 20% þykkt
10 Hz	0,2077	0,2324
20 Hz	0,6094	0,6646
30 Hz	1,0750	1,1758



Mynd 100: Gröf sem sýna lyftikraftstuðul NACA0012 og NACA0020 fyrir leiðréttingu vegna fastrar skekkju í kraftvog. Grænu og bláu þverlínurnar sýna lóðréttu hliðrunina vegna skekkjunnar.

Jafnframt uppgvötuðum við að hægt er að losa um bolta til að lofta út og þannig jafna loftþrýstinginn í kraftvoginni umhverfisþrýstingi hverju sinni. En vegna þess hversu vel þessi leiðrétting dugaði til að útskýra skekkju í niðurstöðum var ákveðið að notast við hana frekar en að endurtaka allar mælingar með tilheyrandi umstangi og tímaþörf. Óvissumati lyftikraftsstuðuls var þó breytt til samræmis við óvissu í mati á föstu skekkjunni, en til þess var notast við staðalfrávik skekkjumælinga eins og nánar er útskýrt í kafla um óvissumat.

5.8.11 Óvissur

Notuð var hlutfleiðuaðferð til að meta óvissu í lyftikrafts og viðnámsstuðlum. Tafla 16 sýnir yfirlit yfir þær breytur sem ástæða þótti til að tiltaka sem óvissuvalda. Óvissa í kraftmælingum (ΔD , ΔL) er sett sem uppgæfin upplausnargildi miðað við kvörðun vogarinnar (SI-330-30). Óvissa í ofanvarpsflatarmáli (ΔS) er metin út frá því að um 2 mm munur mældist á vænglínulengdum eftir að vængir höfðu verið útbúnir. Óvissa í hraða ótruflaðs loftstreymis (Δv) er fengin með því að taka meðaltal mælds umfangs iðustreymis á áhrifasvæði vængsins (sjá kafla 5.8.7 um fyrirkomulag mælinga). Að lokum var bætt við óvissuþætti vegna fastrar skekkju (ΔE) sem reyndist vera vegna vatnsheldni kraftvogarinnar. Í því skyni var notast við reiknuð staðalfrávik þeirra fimm mælinga sem notaðar voru til mats á skekkjunni.

Tafla 16: Óvissuvaldar.

	10 Hz	20 Hz	30 Hz
ΔD [N]	0,0625	0,0625	0,0625
ΔL [N]	0,125	0,125	0,125
ΔS [m ²]	0,0012	0,0012	0,0012
ΔV [m/s]	0,13	0,27	0,27
ΔE (12% þykkt) [N]	0,035	0,113	0,250
ΔE (20% þykkt) [N]	0,047	0,080	0,179

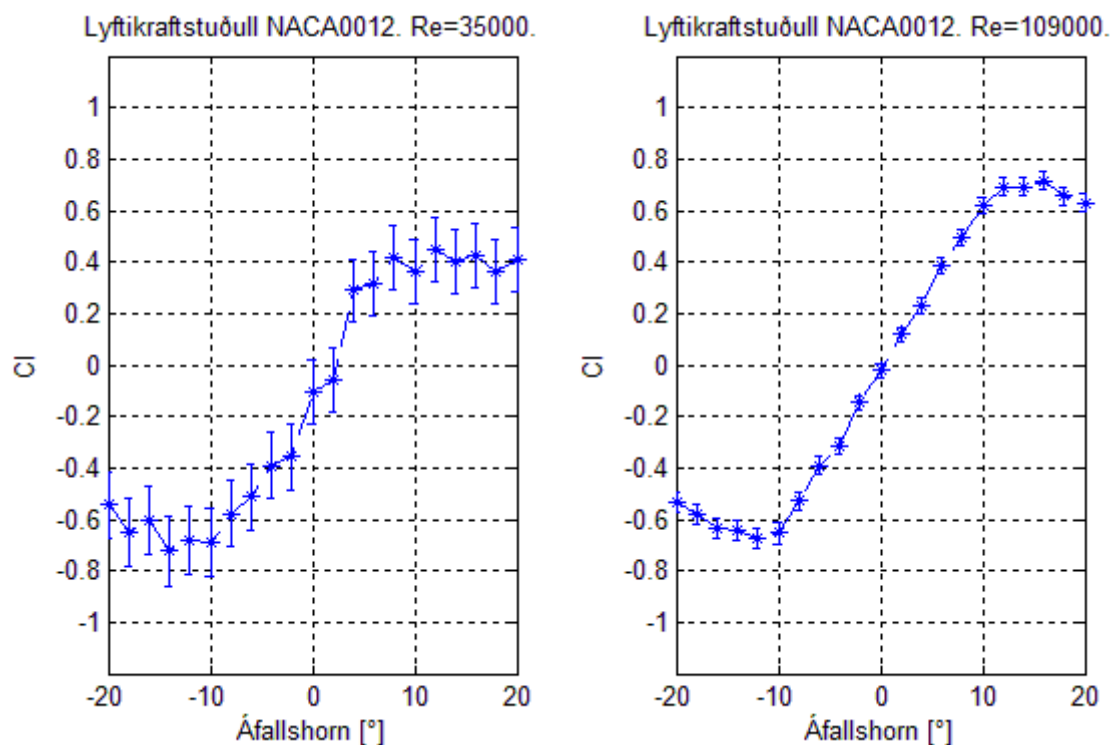
Jöfnur fyrir óvissu í hverjum stuðli má sjá hér fyrir neðan, óvissan er í öðru veldi til að auðvelda lestur jafnanna:

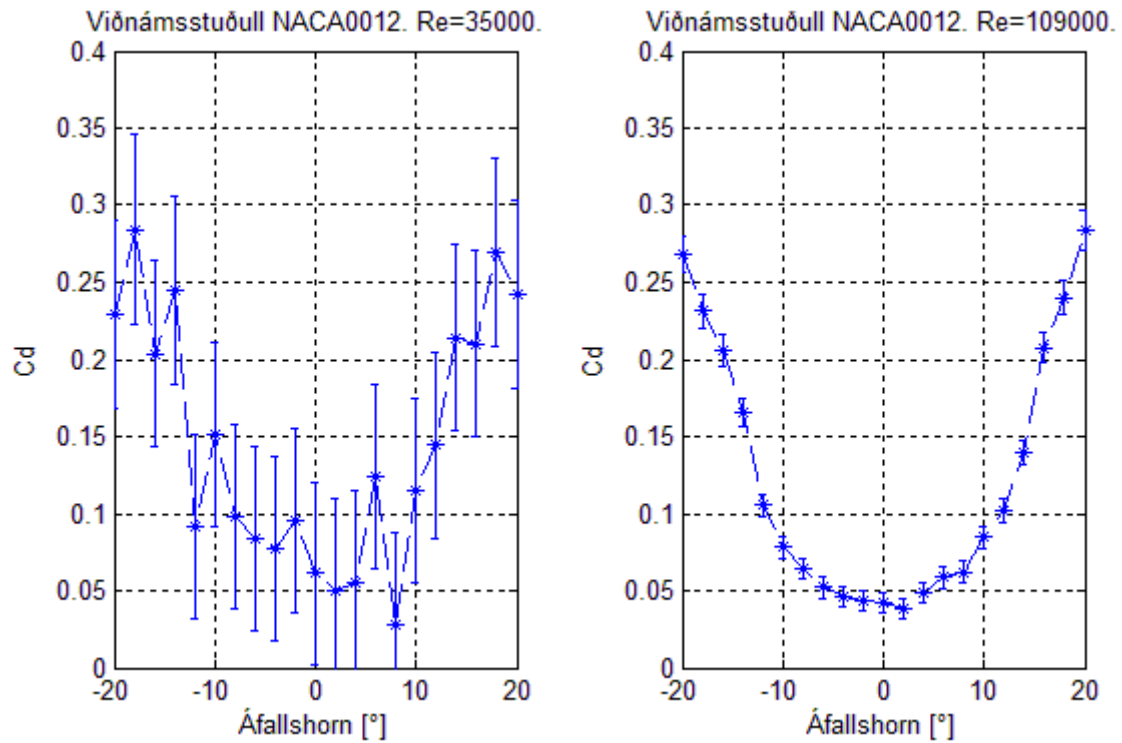
$$\sigma_{c_l}^2 = \left(\frac{2}{\rho \cdot A \cdot v^2} \right)^2 \cdot \Delta L^2 + \left(\frac{-2}{\rho \cdot A^2 \cdot v^2} \right)^2 \cdot \Delta E^2 + \left(\frac{2 \cdot (\langle E \rangle - \langle L \rangle)}{\rho \cdot A^2 \cdot v^2} \right)^2 \cdot \Delta A^2 + \left(\frac{4 \cdot (\langle E \rangle - \langle L \rangle)}{\rho \cdot A \cdot v^3} \right)^2 \cdot \Delta v^2$$

$$\sigma_{c_d}^2 = \left(\frac{2}{\rho \cdot A \cdot v^2} \right)^2 \cdot \Delta D^2 + \left(\frac{-2 \cdot \langle D \rangle}{\rho \cdot A^2 \cdot v^2} \right)^2 \cdot \Delta A^2 + \left(\frac{-4 \cdot \langle D \rangle}{\rho \cdot A \cdot v^3} \right)^2 \cdot \Delta v^2$$

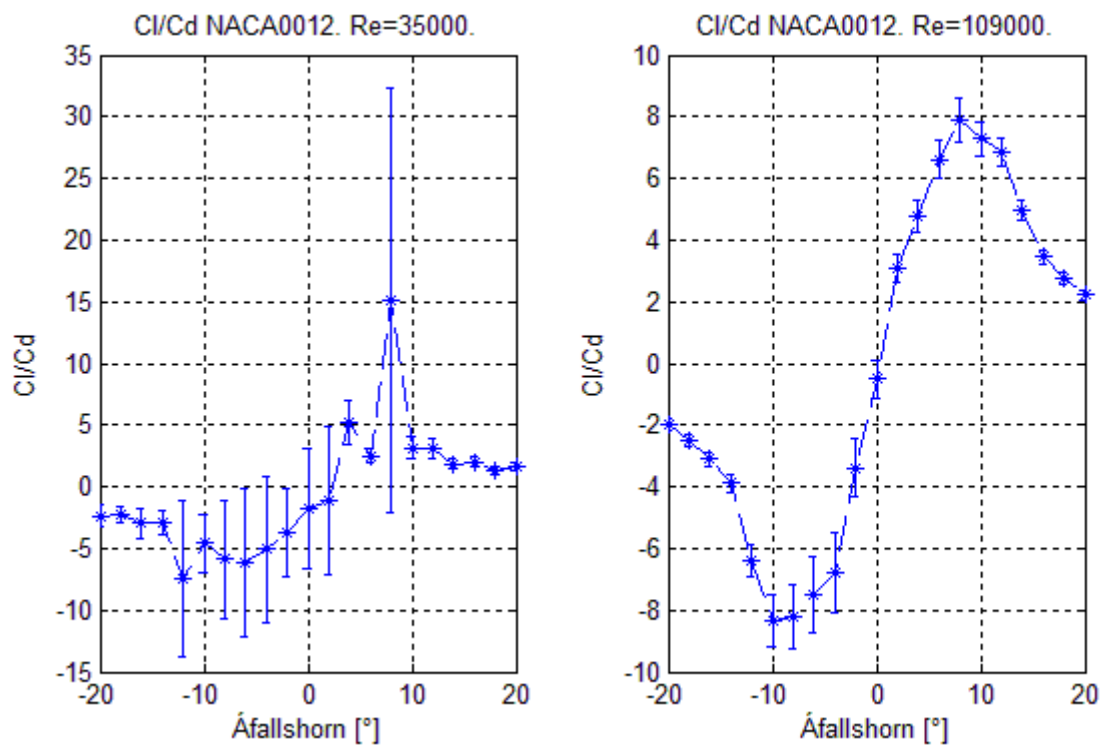
$$\sigma_{\frac{c_l}{c_d}}^2 = \left(\frac{-1}{\langle D \rangle} \right)^2 \cdot \Delta L^2 + \left(\frac{\langle E \rangle - \langle L \rangle}{\langle D \rangle^2} \right)^2 \cdot \Delta D^2 + \left(\frac{1}{\langle D \rangle} \right)^2 \cdot \Delta E^2$$

Ofan á þessa óvissu bætist svo óvissa í mælingu á áfallshorni sem við mátum sem $\pm 0,5^\circ$ í öllum tilfellum. Sem dæmi um niðurstöður óvissuútreikninga er bent á myndir 101 til 103 sem sýna óvissur fyrir NACA0012 á lægstu og hæstu Reynoldstölunni. Fleiri gröf fyrir óvissumati er að finna í viðauka C.

Mynd 101: Óvissa í lyftikraftsstuðli NACA0012. T.v.: $Re=35000$ og t.h.: $Re=109000$



Mynd 102: Óvissa í viðnámsstuðli NACA0012. T.v.: $Re=35000$ og t.h.: $Re=109000$



Mynd 103: Óvissa í C_l/C_d . T.v.: $Re=35000$ og t.h.: $Re=109000$

5.8.12 Kennitölur lyftikraftsferla

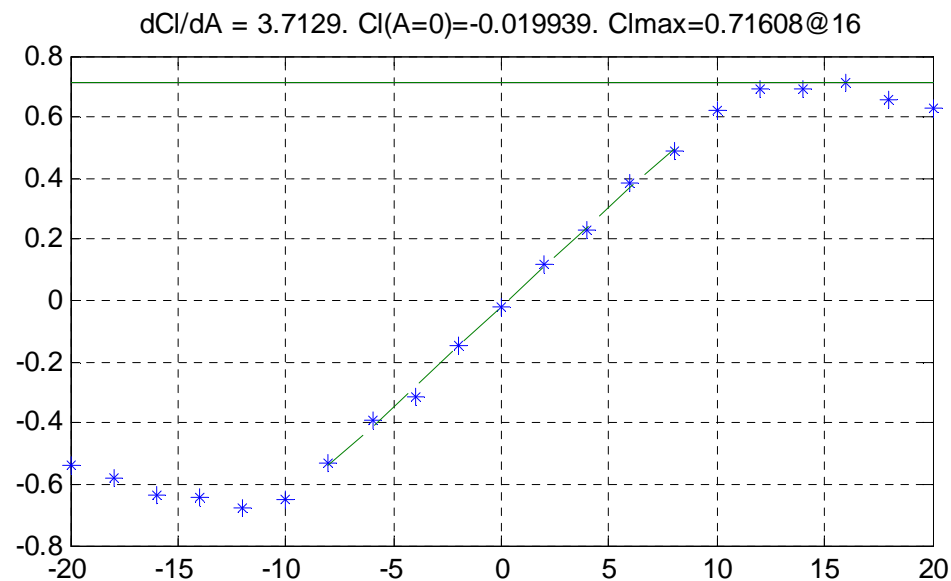
Skoðaðir voru lyftikraftsferlar allra vængja á öllum Reynoldstölum og línuleg nálgun felld að línulegum hluta þeirra með aðferð lægstu kvaðrata skv:

$$C_L(\alpha) = \frac{dC_L}{d\alpha} \cdot \alpha + C_{L,\alpha=0^\circ}$$

Þar sem að eining áfallshornsins α er í radíunum. Einnig var hámarkslyftikraftsstuðull ($C_{L, \max}$) fundinn og áfallshorn þess stuðuls (α_{crit}) skráð. Útbúið var sértakt forrit í Matlab til að vinna verkið, þó að stundum hafi þurft að stilla af bilin þar sem línuleg nálgun átti best við auk þess sem að í sumum tilfellum greindist ofris og hækkandi lyftikraftsstuðull í kjölfarið, sem túlka má sem streymisaðskilnað og endurvíðloðun (sjá kafla um Reynoldstölubilið $10^4 - 10^5$). Slík tilfelli eru merkt með stjörnu í niðurstöðutöflum. Mynd 104 sýnir skjámynd af því þegar verið er að meta slíka nálgun. Þá voru hallatölur leiðréttar með tilliti til vænghlutfalls og þannig fundið hallatölugildi tvívíðs vængsniðs samkvæmt:

$$\frac{dC_L}{d\alpha}, 2D = \frac{dC_L}{d\alpha} \cdot \frac{AR + 2}{AR}$$

Tvívíða gildið er síðan borið saman við fræðilega hámarksgildið, 2π , með hlutfalli. Meðaltal þess hlutfalls fyrir fasta þykkt vængsniða á fastri Reynoldstölu eru svo borin saman á sérstöku grafi.



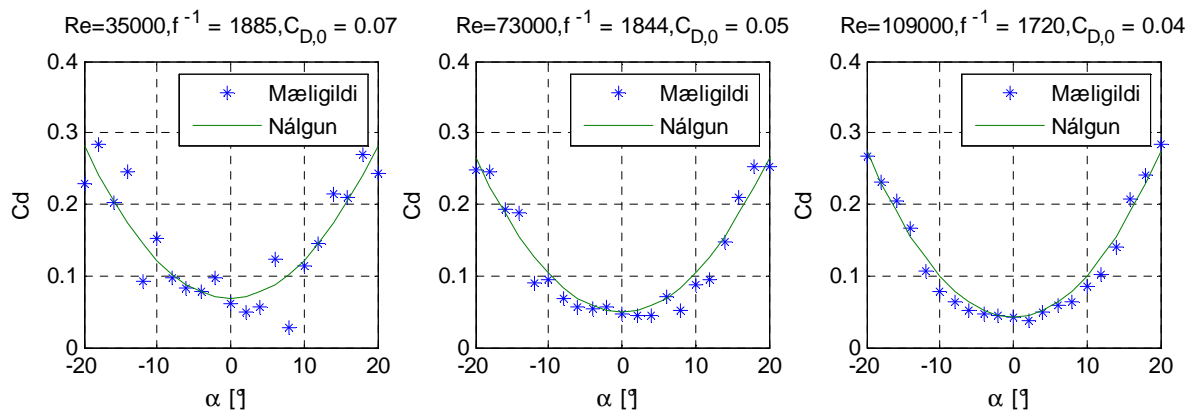
Mynd 104: Línuleg nálgun felld að mæligögnum. Efsta línan (græn) sýnir hæsta gildi lyftikraftsstuðuls.

5.8.13 Kennitölur viðnámsferla

Samkvæmt aðferð sem útskýrð var í kafla um viðnámskraft voru viðnámsferlar að jöfnunni:

$$C_D = C_{D,0} + f \cdot \alpha^2$$

Í niðurstöðukafla er að finna yfirlit yfir slíkar nálganir fyrir þau vængsnið sem mæld voru. Til að lágmarka áhrif mælióvissu voru gildi $C_{D,0}$ fengin með því að taka meðaltal lyftikraftsstuðulsins á bilinu $\alpha = [-2, 2]$ í öllum tilfellum. Mynd 105 sýnir myndrænt hvernig slík nálgun fór fram og hvernig nálgunarferillinn endurspeglar mæligögn. Birtar verði niðurstöður nálganna fyrir f á andhverfuformi til að auka skýrleika þar sem að raungildi f verða mjög lágar tölur og erfiðar til innbyrðis samanburðar.



Mynd 105: Mæligildi viðnámsstuðuls NACA0012 nálgud að nálgunarjöfnu viðnámsferla.

5.8.14 Ákörðun svifstuðla og áfallshorna bestu svifhorna

Ákvarðaðir voru svifstuðlar og áfallshorn besta svifhorna með kerfisbundinni leit að hámarksgildi $(C_L/C_D)_{max}$ og samsvarandi áfallshorni. Stærðfræðilega má útskýra ferlið með jöfnunni:

$$\left(\frac{C_L}{C_D}\right)_{max} = \frac{C_L}{C_D} \left(\frac{d}{dt} \frac{C_L}{C_D}(\alpha) = 0 \right)$$

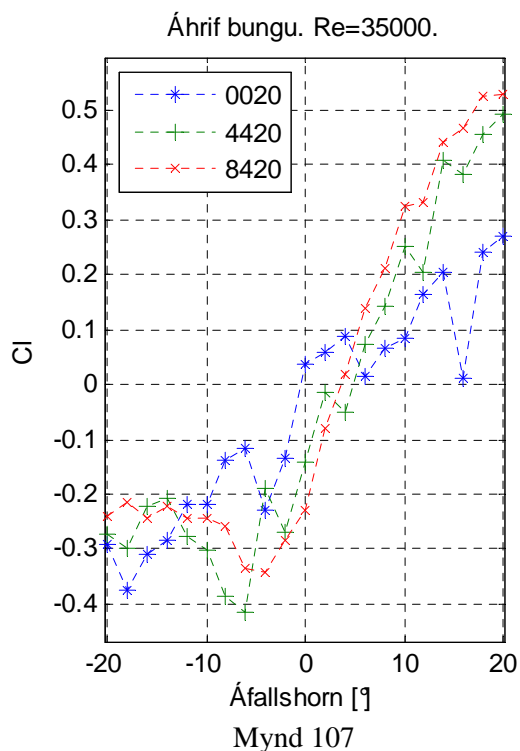
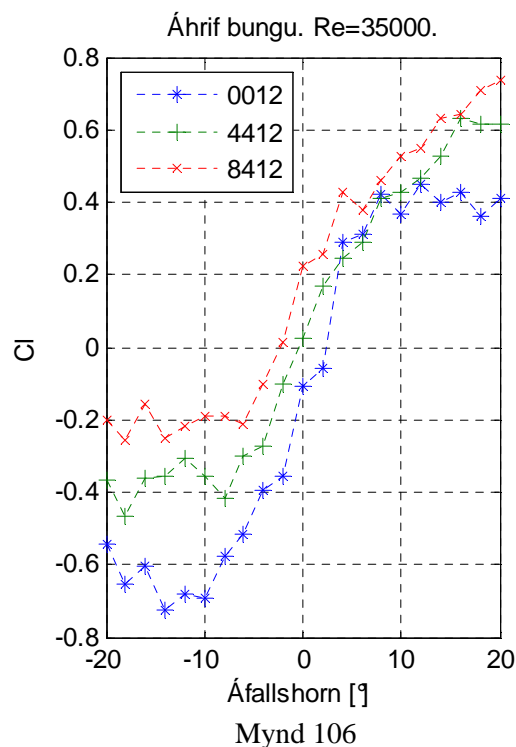
Sökum mikillar mælióvissu sem vænta má í ferlum $C_L/C_D(\alpha)$, sérlega á lægstu Reynoldstölunni (sjá mynd 103) var áfallshorn hámarksgildisins fundið og síðan tekið meðaltal af samsvarandi gildi C_L/C_D og tveggja næstliggjandi gilda og það svo látið standa fyrir svifstuðulinn $C_L/C_{D,max}$.

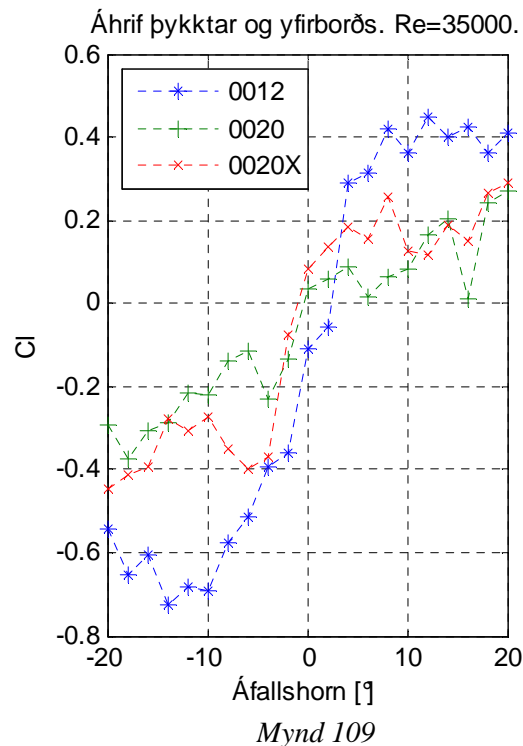
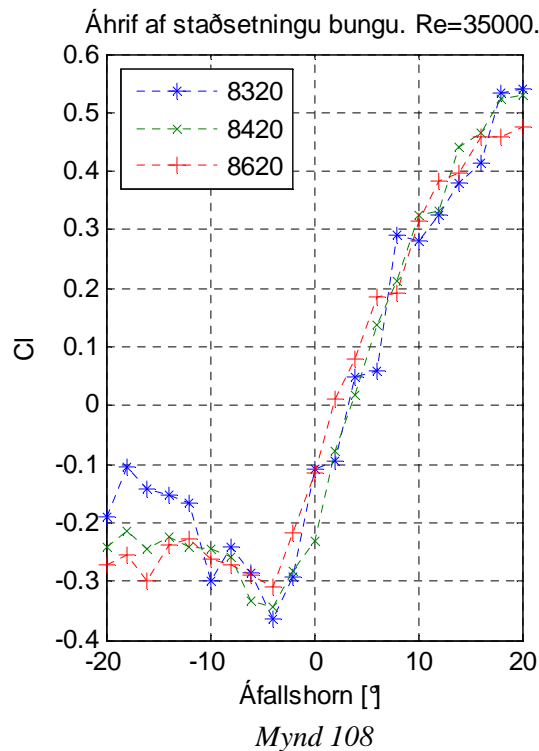
5.8.15 Lyftikraftsferill: Niðurstöður fyrir $Re = 35.000$

Tafla 17 sýnir yfirlit yfir kennitölur lyftikraftsferla fyrir Reynoldstöluna 35.000. Þynnri vængsnið (12% þykkt) ná augljóslega að halda jaðarluginu áföstu vængnum upp að hærri áfallshornum heldur en þykku vængsniðin. Samanburður á hallatölum lyftikraftsferla leiðir almennt í ljós hærri gildi fyrir þynnri vængsniðin, ef frá er talinn NACA0020X, sem túlka má sem rökstuðning fyrir fullyrðingunni hér á undan. Merki um óstöðugt, þ.e. tímaháð streymi má greinilega sjá á lyftikraftsferlum. Séu lyftikraftsferlar NACA0020 og NACA0020X skoðaðir sérstaklega (mynd 109) má greina merki um það hvernig sléttari yfirborðshúð NACA0020 vængsins hefur þau áhrif að vart greinist nokkur hluti ferilsins sem línulegur, meðan að grófari yfirborðshúðin gefur greinilegan línulegan kafla. Það má að vissu leyti skýra með því að jaðarlagið nái að festast við grófari vænginn sökum þess að ná iðustreymnu ástandi meðan að lagstreyminn aðskilnaður verði á mjög lágu áfallshorni fyrir slétta vængsniðið.

Tafla 17: Kennitölur lyftikraftsferla, $Re=35000$.

Vængur [NACA]	$C_{L,max}$	α_{crit} [°]	$\frac{dC_L}{d\alpha}$ [rad-1]	$C_{L,\alpha=0^\circ}$	$\frac{dC_L}{d\alpha}, 2D$ [rad-1 / π]	$\frac{dC_L}{d\alpha}, 2D / 2\pi$
0012	0,44	12	3,89	-0,11	1,65	0,82
4412	0,63	16	3,06	0,01	1,30	0,65
8412	0,43	4*	3,13	0,14	1,33	0,66
0020	0,09	4*	2,38	-0,04	1,01	0,50
4420	0,25	10*	2,27	-0,16	0,96	0,48
8420	0,33	10*	2,99	-0,19	1,27	0,63
8320	0,29	8*	2,89	-0,17	1,23	0,61
8620	0,19	6*	2,85	-0,11	1,21	0,61
0020X	0,18	4*	3,75	-0,01	1,59	0,80





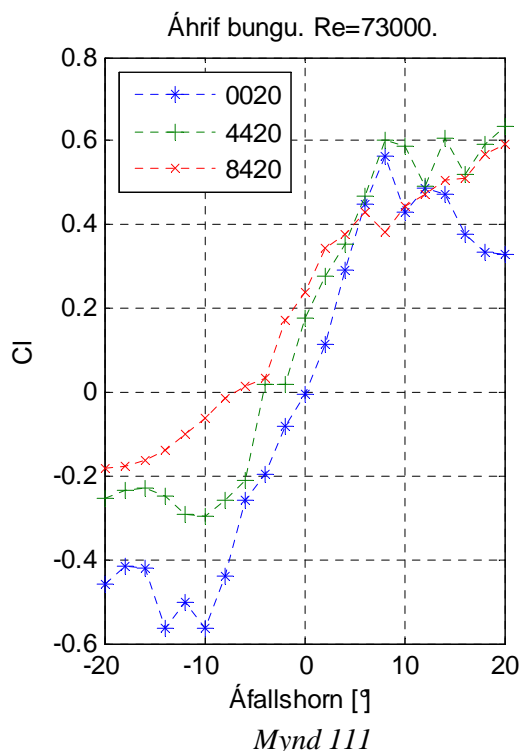
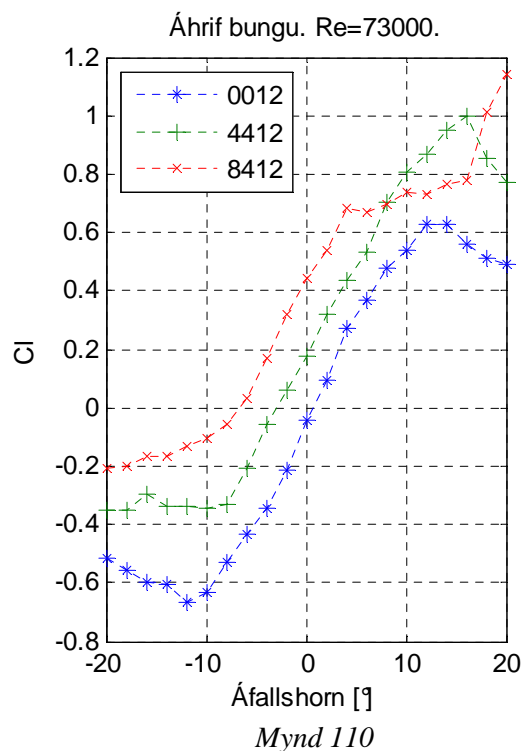
Almenn leytni (e. trend) fyrir 12% þykkt, sem lesa má út úr ferlum sem sýna áhrif bungu (mynd 106), virðist eðlileg að því leyti að aukin bunga gefur hærra gildi fyrir $C_{L,\alpha=0^\circ}$. Sé þykkara vængsniðið skoðað út frá þessu samhengi koma hins vegar í ljós þveröfug áhrif, þ.e. lækkandi gildi fyrir $C_{L,\alpha=0^\circ}$. Má ef til vill skrifa það á lagstreyminn streymisaðskilnað þannig að bungan, eða krappinn á vængsniðinu sé einfaldlega það mikil að lagstreyminn aðskilnaður verði mjög nálægt frambrún, ofan á vængnum meðan að jaðarlagið neðan á vængnum nær að vera áfast yfir krappann þar og skapa þannig neikvæðan lyftikraft. Gildin fyrir $C_{L,max}$ eru fengin með því að skoða fyrstu greinilegu merki um ofris en mörg dæmi eru um staðbundin hámarks gildi á lyftikraftsferlinum (allir ferlar nema NACA0012 og NACA4412) og því vart samanburðarhæft að stilla gildunum upp beint. Hins vegar tala ferlarnir sínu máli og oft má sjá hvernig að lyftikraftur heldur áfram að aukast upp að áfallshorninu 20° . Sem dæmi má nefna lyftikraftsferil NACA8412 (mynd 106). Ljóst er að þau áhrif hljóta að stafa af því að iðustreymið jaðarlag nái að halda sér áföstu þrátt fyrir vaxandi neikvæðan þrýstistigul. Mynd 108, sem sýnir áhrif af staðsetningu bungu gefur ekki til kynna nein sérstök merki um greinanleg áhrif utan óvissumarka. Til að draga saman umfjöllunina má segja að afar erfitt sé að fullyrða um einstök, staðbundin gildi á ferlum sökum mælióvissu og óstöðugu, þ.e. tímaháðu flæði. Ef til vill er það vænlegra til árangurs að gera tilraunir með flæðimyndbirtingaraðferðum (e. flow visualisation) samhliða kraftmælingum við þessar aðstæður til að útskýra betur hvers vegna einstaka hegðanir og fráhröf frá væntum ferlum koma fram. Slíkar tilraunir kalla hins vegar á flókinn útbúnað sem ekki var til staðar þegar tilraun þessi var framkvæmd.

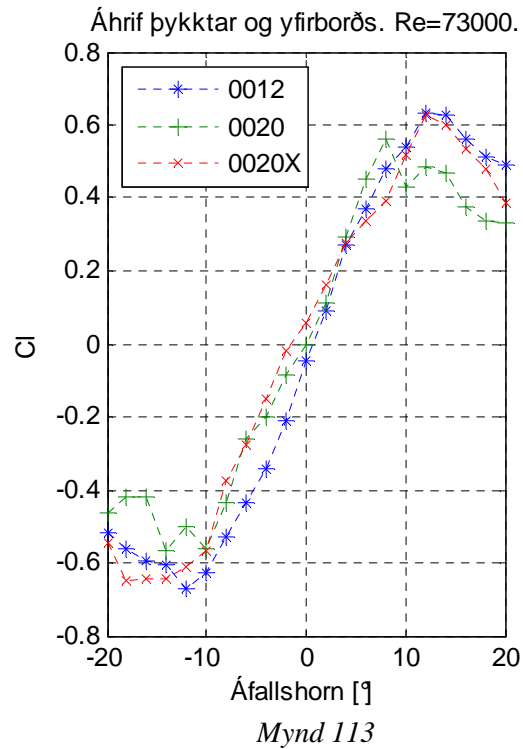
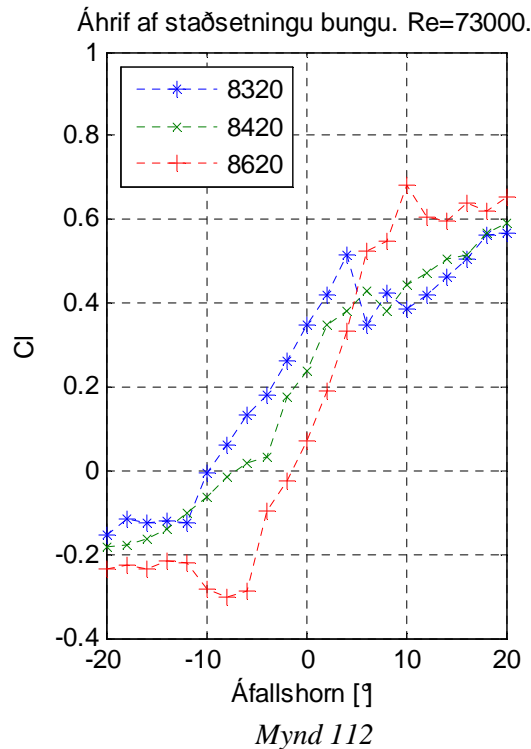
5.8.16 Lyftikraftsferill: Niðurstöður fyrir $Re = 73.000$

Þegar Reynoldstalan er komin upp í 73.000 er auðveldara um vik að gera beinan samanburð þar sem að áhrif frá tímaháðu streymi eru ekki jafn greinileg og áður. Svipuð áhrif á hallatölu lyftikraftsstuðuls koma fram og áður, þ.e. hærri gildi á þynnri vængsniðum ef undan er skilinn NACA0020X, fyrir utan að NACA8620 sýnir nú óvenju hátt gildi hallatölu miðað við aðra vængi með sömu bingu. Það sama má reyndar lesa út úr mælingum á hæstu Reynoldstölunni. Á heildina litið hafa hallatölur hækkað, þó meira fyrir þykkari vængsniðin heldur en þynnri. Áhrif þykkar á $C_{L,max}$ eru greinileg, gildin eru hærri fyrir 12% þykkt heldur en 20%. Áhrif aukinnar bingu á $C_{L,max}$ eru þau, fyrir báðar þykktirnar, að hæsta gildið er að finna í 4% bungunni (4412 og 4420). Í því samhengi er reyndar áhugavert að skoða ferilinn fyrir NACA8412, þar sem greinilegt ofris verður á áfallshorninu 4° , þar á eftir nokkuð flatur ferill að 16° þar sem að C_L tekur að aukast upp í 20° þar sem C_L tekur mun hærri gildi en í 4° ofrisinu.

Tafla 18: Kennitölur lyftikraftsferla, $Re=73000$.

Vængur [NACA]	$C_{L,max}$	α_{crit} [°]	$\frac{dC_L}{d\alpha}$ [rad ⁻¹]	$C_{L,\alpha=0^\circ}$	$\frac{dC_L}{d\alpha}, 2D$ [rad ⁻¹ / π]	$\frac{dC_L}{d\alpha}, 2D / 2\pi$
0012	0,63	12	3,81	-0,04	1,62	0,81
4412	1,00	16	3,64	0,18	1,54	0,77
8412	0,68	4*	3,22	0,41	1,37	0,68
0020	0,56	8**	3,49	0,05	1,48	0,74
4420	0,60	8*	3,03	0,16	1,29	0,64
8420	0,43	6*	2,22	0,23	0,94	0,47
8320	0,52	4*	2,37	0,34	1,00	0,50
8620	0,68	10	3,52	0,11	1,49	0,75
0020X	0,63	12	3,09	0,06	1,31	0,66





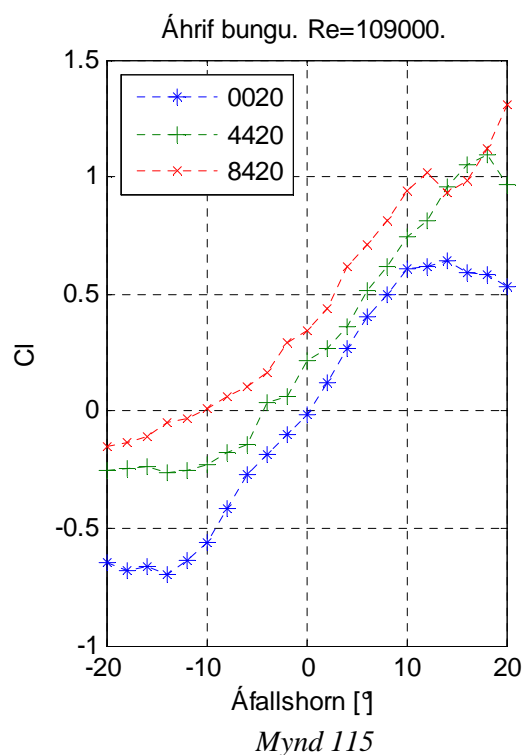
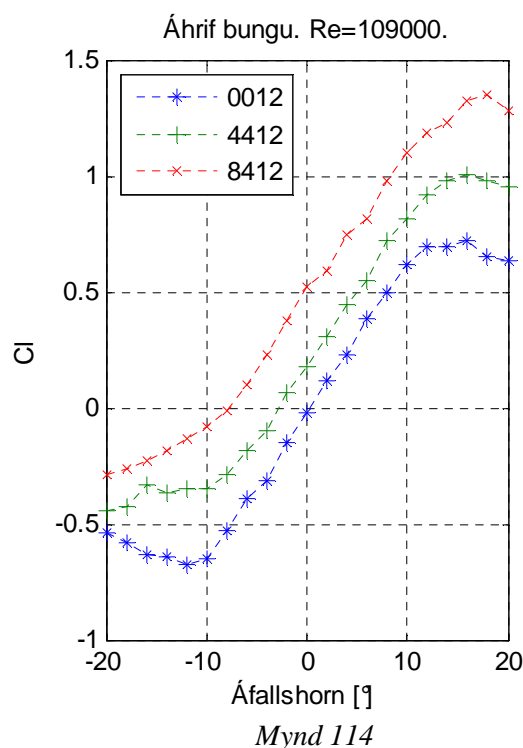
$C_{L,\alpha=0^\circ}$ sýnir nú eðlilega hegðun, þ.e. hækkandi gildi fyrir aukna bungu í stað lækkandi líkt og á lægstu Reynoldstölunni. Skýringuna á þessari breytingu má líklega finna í öðru tveggja, jaðarlagið verður fyrr iðustreymið eða í aukinni hæfni lagstreymis jaðarlags til að yfirvinna neikvæðan þrýstistigul með auknum tregðukröftum. Greina má nú greinilegan mismun á ferlum eftir staðsetningu bungu (mynd 112). Eftir því sem að staðsetningin færir aftar verður hallatalan hærri auk þess sem að bæði α_{crit} og $C_{L,max}$ hafa áberandi hæstu gildi fyrir öftustu staðsetninguna (NACA8620). Auk þess verður umbreytingin frá ofrasi yfir í línulega hluta lyftikraftsferilsins mun skarpari á því vængsniði heldur en þeim sem hafa staðsetningu framar. Athyglisvert er að sjá að sömu áhrif koma frá á hæstu Reynoldstölunni. Um gæði mælinganna má segja að betri línuleg nálgun fáiist nú fyrir ferlana heldur en á lægstu Reynoldstölunni þrátt fyrir að sumir ferlanna sýni enn töluverða ólínulega hegðun, þó innan óvissumarka. Minna er um staðbundin hámark í ferlunum en áður, þó er greinilega meira um slíkt í ferlum þykkari vængsniða. Það virðist því vera að þykkari vængirnir séu næmari fyrir myndun L.S.B., eða að þeir myndi stærri slíkar kúlur. Skýringu á því má hugsanlega finna í meiri krappa frambrúnar á þykkari vængsniðum sem kallar á neikvæðan þrýstistigul mjög nálægt frambrún á efra yfirborði miðað við jákvætt áfallshorn. Sé litið til náttúrunnar, þar sem ýmsir fuglar fljúga við streymisaðstæður ekki ólíkar þessum, kemur einmitt í ljós að vængsnið fugla er þunnt, jafnvel að því marki að þeir líkjast meira flötum plötum heldur en vængsniðum. Reyndar má almennt segja að eftir því sem að fuglar og önnur fljúgandi dýr verða minni, verði vængir þeirra þynnri og líkari flötum plötum. Í því samhengi benda höfundar lesendum sínum á að bera saman vænglögum gæsa og vænglögum húsflugna.

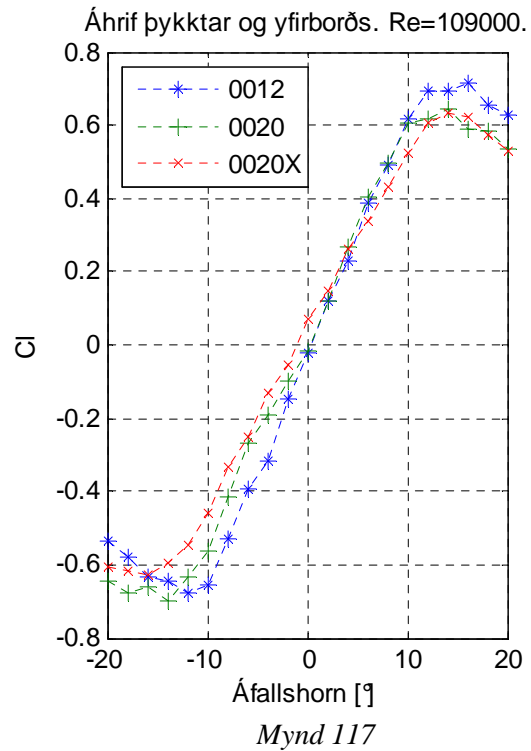
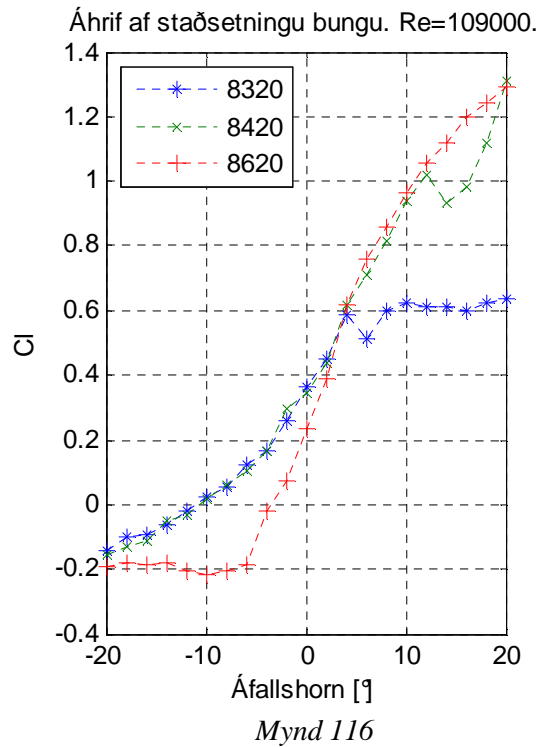
5.8.17 Lyftikraftsferill: Niðurstöður fyrir $Re = 109.000$

Viðloðun jaðarlags er greinilega til muna sterkari á hæstu Reynoldstölunni en áður. Til marks um það má nefna hærri hallatölur, hærri $C_{L,max}$ – gildi og minna um ólínulega hegðun og staðbundin hámark í lyftikraftsferlum. Ofrishorn, α_{crit} , eru nú mun jafnari og í öllum tilfellum í kringum 16° nema fyrir NACA8620 sem sýnir aftur svipaða hegðun og á Reynoldstölunni 73.000 nema að nú rúnnast ferillinn af þannig að hallatala ferilsins fer að verða háð áfallshorni eftir 10 gráðurnar, en er enn að aukast við 20° . Enginn marktækur munur mælist nú milli þykkri og þynnri vængsniða, annar en lítillega lægri hallatölur þykkari vængsniðanna og því að NACA8420 sýnir staðbundið hámark við áfallshornið 12° . Munur á hallatölum þynnri og þykkari vængsniða er þó orðinn minni en áður og fer minnkandi með aukinni Reynoldstölu (mynd 118).

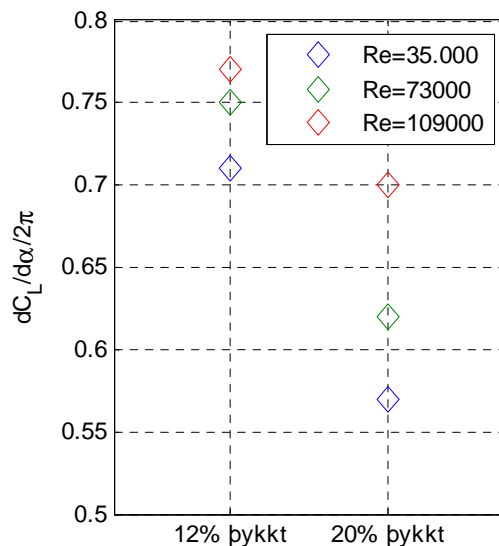
Tafla 19: Kennitölur lyftikraftsferla, $Re = 109.000$.

Vængur [NACA]	$C_{L,max}$	α_{crit} [°]	$\frac{dC_L}{d\alpha}$ [rad ⁻¹]	$C_{L,\alpha=0^\circ}$	$\frac{dC_L}{d\alpha}, 2D$ [rad ⁻¹ / π]	$\frac{dC_L}{d\alpha}, 2D / 2\pi$
0012	0,72	16	3,71	-0,02	1,58	0,79
4412	1,00	16	3,68	0,19	1,56	0,78
8412	1,35	18	3,49	0,48	1,48	0,74
0020	0,64	14	3,25	0,03	1,38	0,69
4420	1,09	18	3,13	0,18	1,33	0,67
8420	1,03	12*	3,12	0,38	1,33	0,66
8320	0,59	4*	2,95	0,37	1,25	0,63
8620	1,29	20**	3,93	0,26	1,67	0,83
0020X	0,63	14	2,77	0,05	1,18	0,59





Áhrif af staðsetningu bungu eru svipuð og fyrir $Re = 73.000$, nema hvað ferillinn fyrir NACA8420 sýnir staðbundið hámark í 12° áfallshorni og NACA8620 sýnir ólínulega hegðun fyrir ofan 10° . NACA8320 sýnir ofris við 4° áfallshorn eins og áður og sýnir sambærilega ofrishegðun og við $Re=73.000$. Sem almenna samantekt yfir leytni lyftikraftsferla er lesenda bent á mynd 118 sem sýnir breytileika hallatalna lyftikraftsferla, þ.e. fráhvarf frá fræðilegu hámarksgildi eftir þykkt vængsniða og Reynoldstölu.



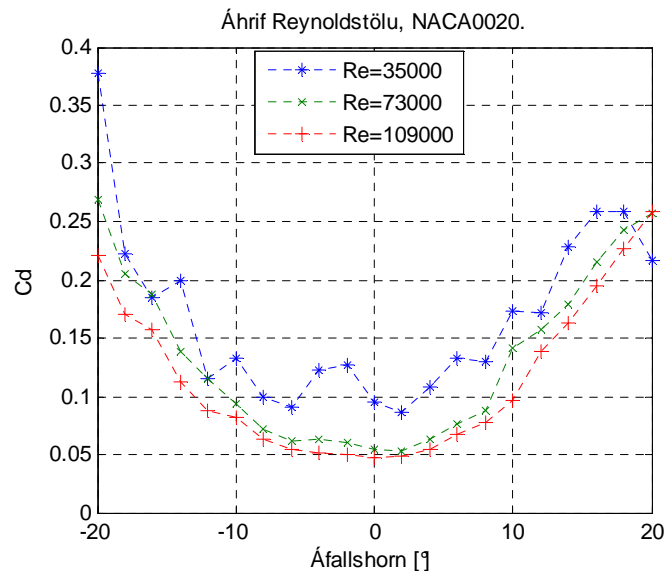
Mynd 118: Meðalhluutföll hallatölu á móti fræðilegu hámarksgildi fyrir þynnri og þykkari vængsnið sem fall af Reynoldstölu.

5.8.18 Viðnámsstuðull

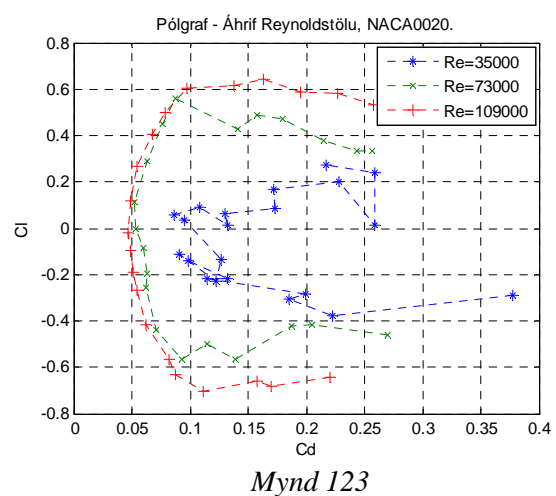
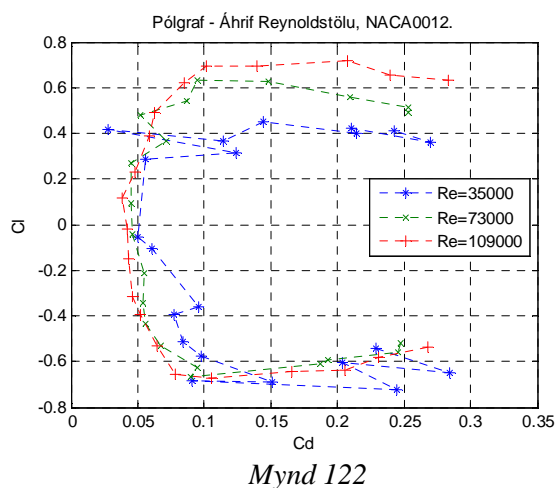
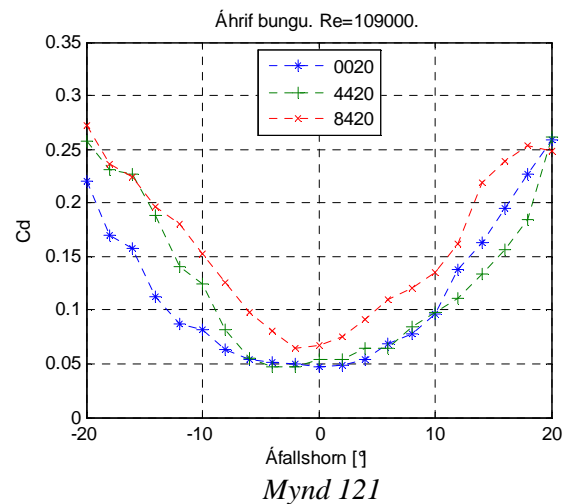
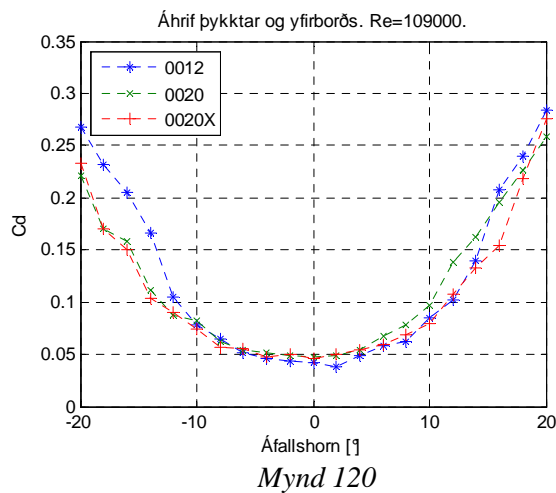
Eins og áður hefur komið fram voru viðnámsferlar voru nálgaðir samkvæmt aðferð sem kynnt var í kafla um viðnámskraft. Tafla 20 geymir niðurstöður þeirra nálgana. Andhverfa stuðulsins f er gefin upp til að auka skýrleika, en stuðullinn sjálfur er það lág tala að erfitt er að gera beinan samanburð þar á. Um andhverfuna er það að segja að eftir því sem α gildið er hærra verður fleygboginn gleiðari. Sé rýnt í tölurnar kemur í ljós að fleygboginn verður gleiðari eftir því sem α Reynoldstalan verður lægri. Með öðrum orðum, útgildi viðnámsstuðuls ($\alpha = -20^\circ, 20^\circ$) verða lægri eftir því sem α Reynoldstalan lækkar. Á sama hátt má almennt fullyrða um þann hluta viðnámsstuðuls sem er óháður lyftikraftsstuðli ($C_{D,0}$) að hann hækkar með lækku Reynoldstölu. Þessi niðurstaða kemur vel heim og saman við fræðin, þar sem að lagstreyminn aðskilnaður á lægri Reynoldstölu verður framar á vængsniðinu heldur en á hærri Reynoldstölu, sem veldur aukinni þykkt vakar fyrir aftan vængsnið. Mynd 119, sem sýnir viðnámsferla NACA0020 á öllum þremur Reynoldstölum, sýnir þessa þróun vel. Á sömu mynd má einnig greina áhrif frá tímaháðu streymi og mælióvissu sem skilar sér í mjög óreglulegum ferli fyrir lægstu Reynoldstöluna.

Tafla 20: Kennitölur viðnámsferla.

Vængur [NACA]	Re = 35000		Re = 73000		Re = 109000	
	$C_{D,0}$	$f^1 [^\circ]^2$	$C_{D,0}$	$f^1 [^\circ]^2$	$C_{D,0}$	$f^1 [^\circ]^2$
0012	0,07	1885	0,05	1844	0,04	1720
4412	0,05	1741	0,05	1912	0,05	1700
8412	0,10	2452	0,08	2000	0,07	1783
0020	0,10	2167	0,06	1881	0,05	2126
4420	0,08	2293	0,06	1848	0,05	1931
8420	0,12	2495	0,08	1846	0,07	1768
8320	0,13	2989	0,08	1878	0,07	1750
8620	0,10	2782	0,09	2067	0,07	1992
0020X	0,08	2191	0,05	2330	0,05	2232



Ekki er ýkja mikill munur á viðnámsferlum eftir yfirborði og þykkt vængsniða (mynd 120). Þó má lesa það út úr myndinni að viðnámsstuðull þynnra vængsniðsins hækki hraðar eftir ofris vængsins. Áhrif aukinnar bungu á viðnámsstuðul eru þau sömu og með lækkaði Reynoldstölu, þ.e. með aukinni bungu hliðrast ferillinn upp á við. Á myndum 122 og 123 gefur að líta svokölluð pólgröf þar sem sýndir eru lyftikraftsferlar sem fall af viðnámsferlum fyrir NACA0012 og NACA0020. Séu ferlar skoðaðir frá þessu sjónarhorni kemur glögg í ljós hvernig aukinn viðnámsstuðull og lækkaður lyftikraftsstuðull með lækkaðri Reynoldstölu hafa áhrif til þess að þjappa saman nothæfu vinnusviði vængsins þannig að eftir því sem að Reynoldstalan lækkar verður svið áfallshorna samþjappaðara í kringum 0° . Áhrifin verða ýktari fyrir þykkara vængsniðið, enda eru þykkari vængirnir næmari fyrir lagstreymnum streymisaðskilnaði eins og rakið var í kafla um lyftikraftsferla. Enginn munur greindist á viðnámsferlum eftir staðsetningu bungu.

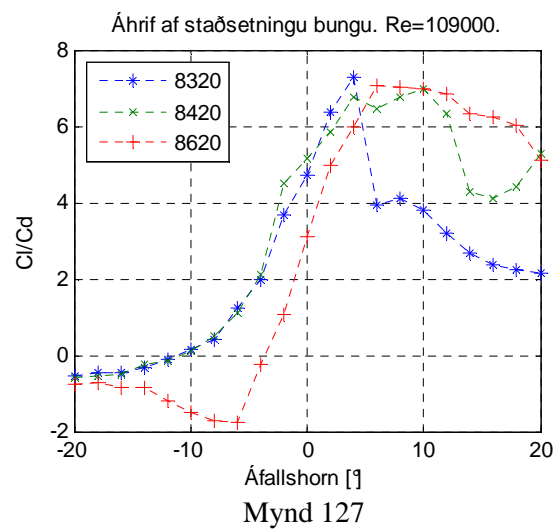
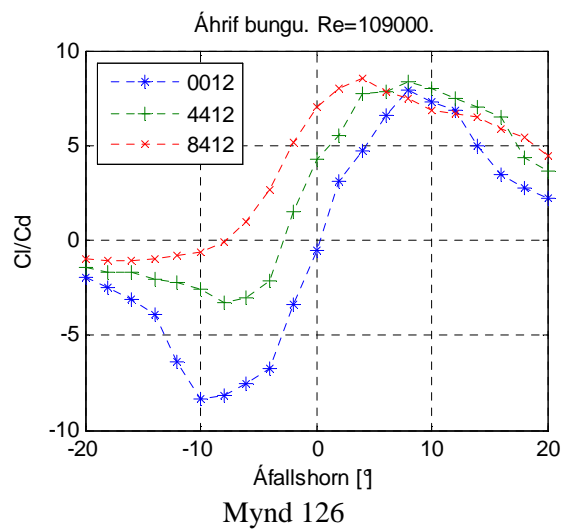
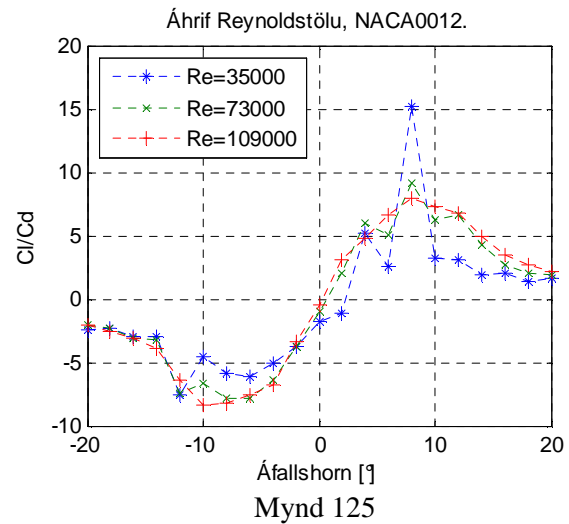
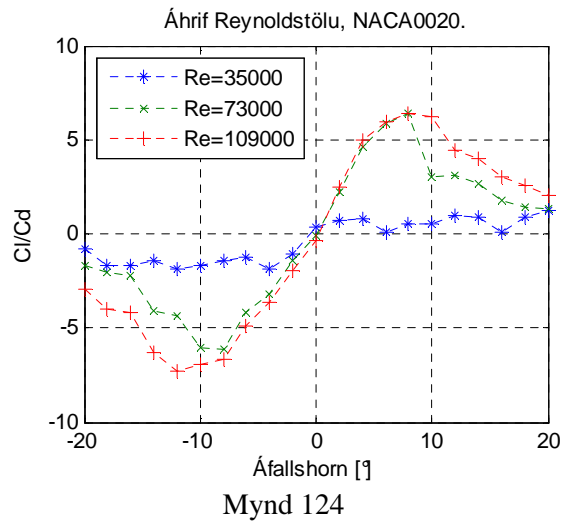


5.8.19 Svifstuðull og áfallshorn besta svifhorns

Tafla 21 geymir yfirlit yfir svifstuðla og áfallshorn besta svifhorns fyrir alla melda vængi á öllum Reynoldstölum. Fyrir lægstu Reynoldstöluna einkennist svifsstuðull af mjög lágu gildum enda fara þar saman lægstu lyftikraftsstuðlarnir og hæstu viðnámsstuðlarnir fyrir gefið áfallshorn. Þróunin eftir Reynoldstölu er að öllu leyti þannig að svifstuðlar hækka eftir því sem hún hækkar. Áfallshorn bestu svifhorna eru í flestum tilfellum í efri hluta línulega ferils lyftikraftsstuðulsins, þ.e. í kringum 8° . Þó eru þar undantekningar, en svo virðist sem að áfallshorn besta svifhorn sé að finna á lægri áfallshornum eftir því sem að bunga eykst. Sem dæmi um það er bent á mynd 126 sem sýnir áhrif bingu þynnri vængsniðanna. Auk þess að áfallshorn besta svifhorns lækkar með aukinni bingu fæst lækkandi neikvæður svifstuðull með aukinni bingu. Með aukinni þykkt vængsniða fæst mun lægri svifstuðull fyrir lægstu Reynoldstöluna, en munurinn minnkar með aukinni Reynoldstölu og er orðinn hverfandi á hæstu Reynoldstölunni (myndir 124 og 125). Athyglisvert er að sjá hvernig svifstuðull NACA0020 á lægstu Reynoldstölunni fæst á hæsta áfallshorninu, 20° . Mikil mælióvissa fylgir ferlunum á lægstu Reynoldstölunni og er bent á mynd 125 því til stuðnings, þar sem að hámarksgildi svifstuðuls er alls ekki í takt við það sem er að gerast fram að, og eftir samsvarandi áfallshorn. Er þetta ástæðan fyrir stjörnumerkingunni í töflu 21. Ástæðan fyrir mælióvissunni í þessum tiltekna punkti er sú að viðnámskraftur mældist mjög lítill þar og er raunmæligildið reyndar það lágt að það hverfur inn í stærð óvissuvalds vegna kraftmælinga í x-stefnu (tafla 16). Mynd 127 sýnir hvernig aftari staðsetning bingu “mýkir” feril svifstuðulsins eftir hámarksgildið. Auk þess gefur aftasta staðsetning áberandi lægsta gildið og skörpustu beygjuna fyrir neikvæða svifstuðla.

Tafla 21: Svifstuðlar og áfallshorn besta svifhorns.

Vængir [NACA]	Re = 35000		Re = 73000		Re = 109000	
	$C_L / C_{d,max}$	A	$C_L / C_{d,max}$	α	$C_L / C_{d,max}$	α
0012	2,85*	8	6,83	8	7,26	8
4412	3,67	8	8,27	8	8,08	8
8412	4,50	4	7,20	4	8,13	4
0020	0,74	20	5,11	8	6,20	8
4420	2,06	10	6,56	8	6,96	6
8420	1,90	10	3,55	2	6,69	10
8320	1,87	18	4,70	4	5,87	4
8620	2,52	12	3,96	6	6,70	6
0020X	1,69	8	5,98	10	6,14	10

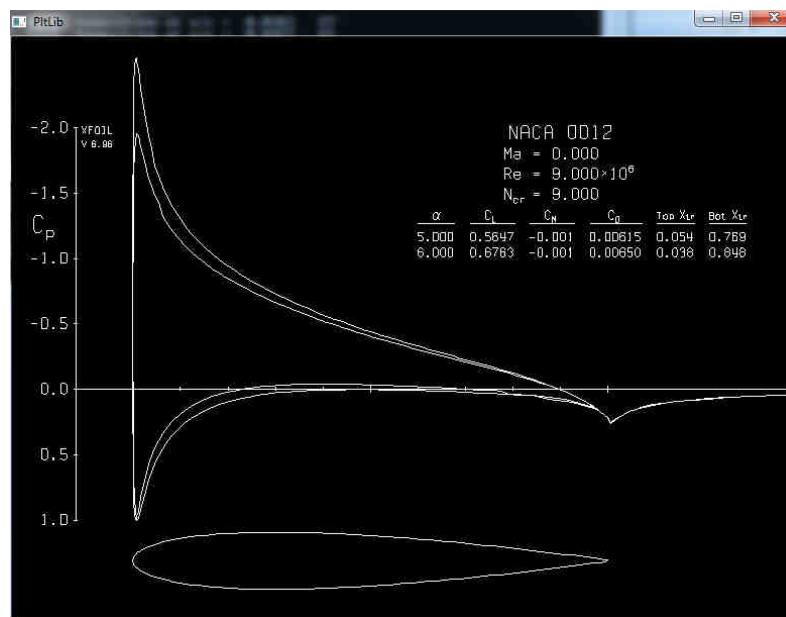


5.9 Samanburður mælinga við straumfræðilíkanið XFOIL

Ákveðið var að gera samanburð á þrívíðum mælingunum úr vindgöngunum og einföldu tölvustuddu tvívíðu straumfræðilíkani til að sjá samsvörun líkansins við raunverulegar mælingar.

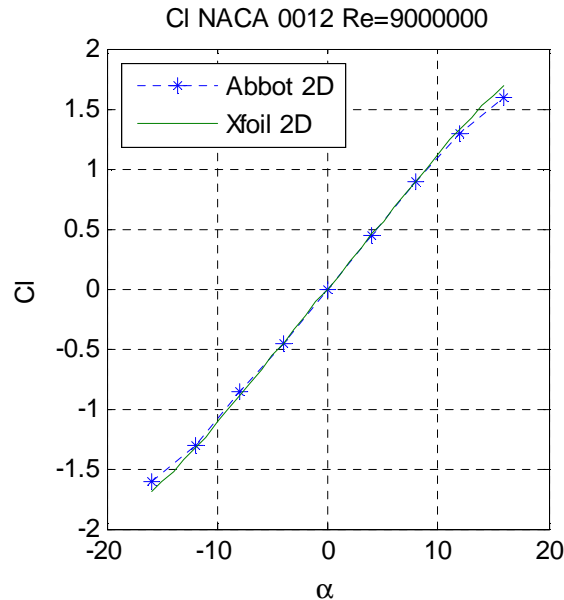
5.9.1 Xfoil

Ákveðið var að nota Xfoil sem er hnitmiðaður kóði, skrifaður af Mark Drela árið 1989 og sérstaklega er ætlaður til að gera tvívíðar greiningar á vængsniðum. Xfoil skiptir streyminu í tvo þætti, ytra og innra streymi. Ytra streymi er reiknað sem seigjulaust og reiknar forritið hraða og þrýstidreifingu með panel aðferð (e. panel method) sem skiptir vængsniðinu í marga litla fleti. Innra streymið er jaðarlag (e. boundary layer) og þar er tekið tillit til seigjuáhrifa. Við reikninga á jaðarlaginu er notast við hefðbundnar jaðarlagsaðferðir. Á mynd 128 má sjá hvernig Xfoil hefur reiknað þrýstidreifingu í kringum NACA 0012 fyrir 5° og 6° áfallshorn. Xfoil er létt í keyrslu og þar af leiðandi er lausnartíminn mjög stuttur. Xfoil 1.0 var skrifað af Mark Drela árið 1986 en síðan þá hefur forritið tekið miklum breytingum og árið 2001 lauk þróun þess með útgáfu Xfoil 6.9. Xfoil er skrifað með forritunar málinu Fortran og þar af leiðandi er notendaviðmótið á DOS formi (Drela, XFOIL Subsonic Airfoil Development System, 2008). Dæmi um eina keyrslu má sjá myndir 130 til 133. Frekari upplýsingar um Xfoil kóðann og lausnaraðferðir má nálgast í góðri grein eftir höfund forritsins (Drela, XFOIL: An Analysis and Design System for Low Reynolds Number Airfoils).

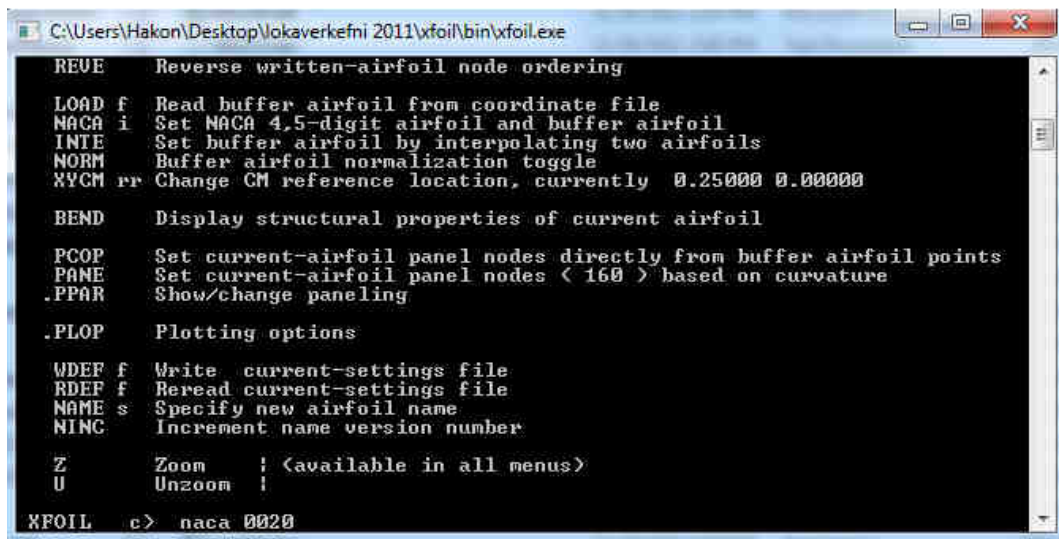


Mynd 128: Reiknuð þrýstidreifing fyrir NACA 0012

Til að sannprófa tölvulíkanið og fullvissa okkur um að við værum að keyra það rétt keyrðum við reikninga fyrir NACA0012 með α á bilinu -16 til 16 við $Re = 9 \times 10^6$ og bárum C_l stuðulinn saman við C_l stuðul úr tvívíðri mælingu í bókinni *Theory of Wing Sections* (Abbott & Von Doenhoff, 1959). Sjá má samanburðinn á mynd 129. Sjá má að gröfin falla vel saman, svo að uppsetningin ætti því að vera í lagi.



Mynd 129: Samanburður á Xfoil við Abbot og Doenhoff.



Mynd 130: Byrja á að velja vængsnið.

```

C:\Users\Hakon\Desktop\lokaverkefni 2011\xfoil\bin\xfoil.exe
Refined-area/LE panel density ratio      0.200
Top   side refined area x/c limits      1.000 1.000
Bottom side refined area x/c limits     1.000 1.000

XFOIL  c> oper

.OPERi  c> visc 109000

M = 0.0000
Re = 109000

.OPERv  c> vpar

Xtr/c   = 1.0000    top   side
Xtr/c   = 1.0000    bottom side
Ncrit   = 9.00     < 0.070 % turb. level >
Uacc    = 0.0100

Klay = 5.6000    Uxwt = 1.00
A = 6.7000      B = 0.7500    Kct = 0.01485
Ctinik= 1.8000    Ctinix= 3.3000

..UPAR  c> n

Enter critical amplification ratio  r>

```

Mynd 131: Set inn reynoldstölu og Ncrit stuðul

```

C:\Users\Hakon\Desktop\lokaverkefni 2011\xfoil\bin\xfoil.exe

A = 6.7000    B = 0.7500    Kct = 0.01485
Ctinik= 1.8000    Ctinix= 3.3000

..UPAR  c> n

Enter critical amplification ratio  r> 9

..UPAR  c>

.OPERv  c> pacc

Polar 1 newly created for accumulation
Airfoil archived with polar: NACA 0020

Enter polar save filename OR <return> for no file  s> 0020.txt

New polar save file available

Enter polar dump filename OR <return> for no file  s>

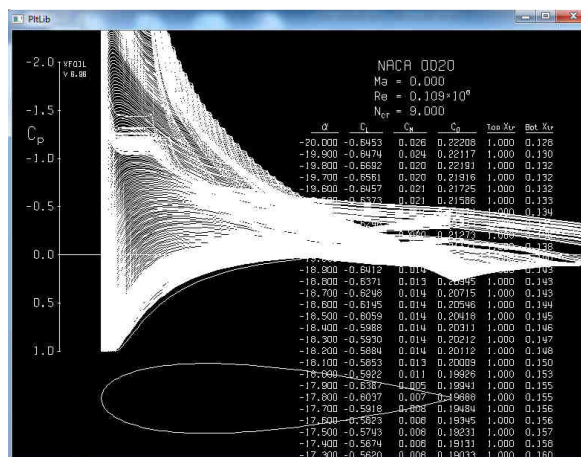
Polar dump file will NOT be written

Polar accumulation enabled

.OPERva  c> as -20 20 0.1

```

Mynd 132: Vel nafn á gögnin og keyri fyrir ákveðið bil af áfallshornum.



Mynd 133: Xfoil reiknar þrýstidreifingu fyrir öll áfallshornin.

5.9.2 Greiningin

Xfoil greiningin gekk vel og tók mjög stuttan tíma. Samanburð má sjá myndrænt á myndum 134 til 139. Á gröfunum má sjá C_l sem fall af áfallshorni fyrir NACA0012 vængsnið. Xfoil reikningarnir, sem eru í tvívídd, eru bornir saman við niðurstöður kraftmælinga fyrir sama vængsnið. Þar sem að vængurinn sem mældur er þrívíður með vænghlutfallið $AR = 6$ var einnig bætt inn á gröfin nálgun að hallatölu mælingana sem leiðrétt er miðað við tvívítt streymi. Greiningin var keyrð á Reynoldstölunum 35000, 73000, 109000. N_{crit} stuðull sem segir til um staðsetningu aðskilnaðar með aðferð e^n (e. the e^n method) (Shyy, Yongsheng, Jian, Viieru, & Liu, 2008). Þar sem umfang iðustreymis í vindgöngunum er enn frekar hátt voru N_{crit} stuðlarnir frekar lágir samanborið við það sem gefið er upp sem viðmið frá höfundum Xfoil. Tafla 22 sýnir reiknuð gildi og tafla 23 sýnir yfirlit yfir umrædd viðmiðunargildi. Reikna má stuðulinn N_{crit} með eftirfarandi jöfnu:

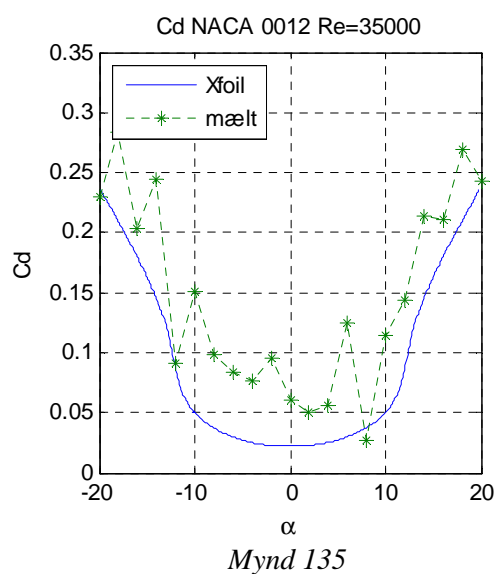
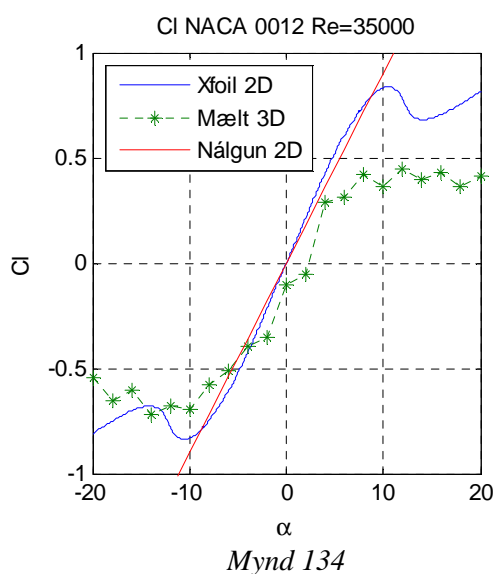
$$N_{crit} = -8,43 - 2,4 \ln(Ti) ; 0,0007 \leq Ti \leq 0,0298$$

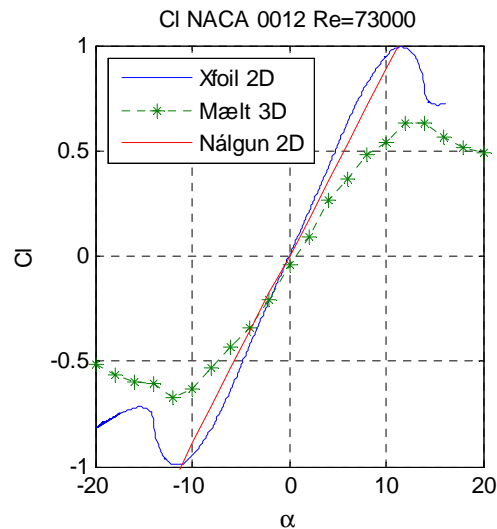
Tafla 22: Reiknuð N_{crit} gildi.

Re	35000	73000	109000
Ti	2,35%	2,48%	1,64%
Ncrit	0,57	0,44	1,44

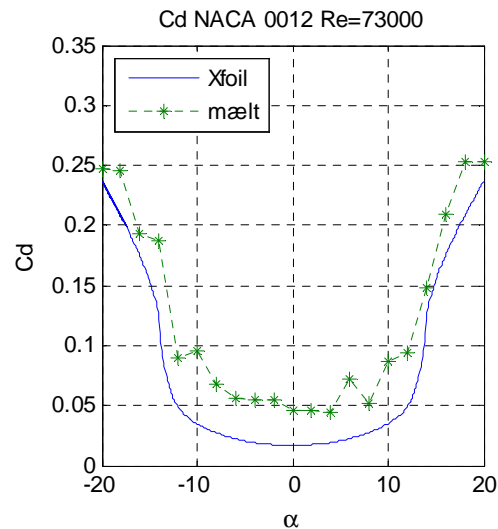
Tafla 23: Viðmiðunargildi N_{crit} .

Kringumstæður	Ncrit	
Sviffluga	12-14	
Motor drifinn svifdreki	11-13	
Hágæða vindgöng	10-12	
Meðal vindgöng	9	\leq staðlað (e^9 aðferð)
Slæm vindgöng	4-8	

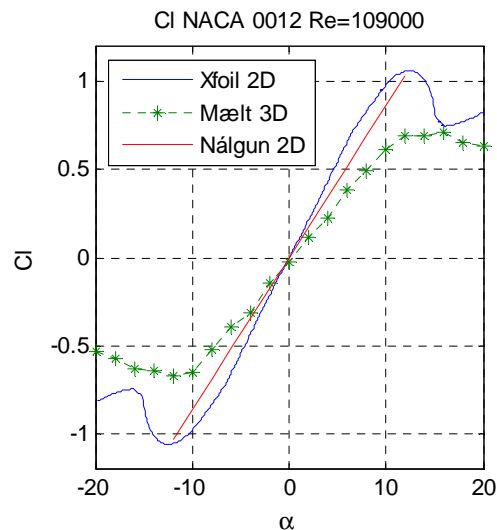




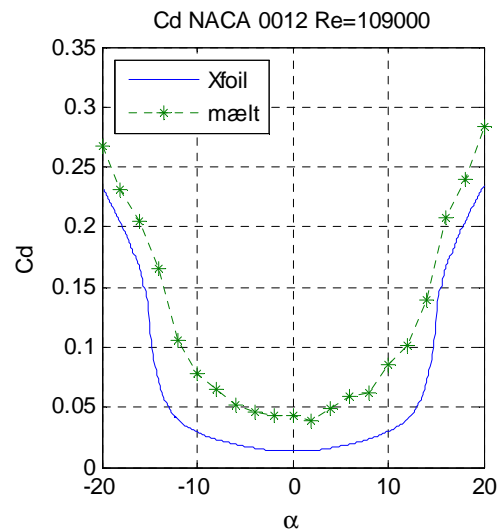
Mynd 136



Mynd 137



Mynd 138



Mynd 139

5.9.3 Samanburður og túlkun

Sé rýnt í gröfin, má sjá að tvívíða líkanið gefur alltaf hærri C_l og lægra C_d heldur en mælingarnar. Þetta kemur ekki á óvart og þó að ekki sé hægt að segja með vissu hvar munurinn liggur nákvæmlega þá er hægt að benda á nokkra hugsanlega orsakavalda. Í raunmælingunni hefur vængurinn vænghlutfallið $AR = 6$ á meðan tvívíða greiningin reiknar með $AR = \infty$ og því er ekkert lyftikraftsviðnám í greiningunni líkt og í mælingunni. Lyftikraftsviðnám hefur, eins og við höfum áður séð, þau áhrif að það bæði lækkar C_l og eykur C_d . Þó sjáum við að þegar búið er að laga mælingarnar að tvívíðu streymi falla mæligögnin nokkuð vel að Xfoil hermunninni. Yfirborðsáferð vængjana hefur einhvern hrjúfleika á meðan greiningin reiknar með alveg sléttu yfirborði. Þessi þáttur gæti skilað sér í lægra C_d í hermunninni heldur en í raunmælingunni. Eðlilegt er að ofrishegðun sé ekki eins milli hermunar og raunmælingar þar sem að aðstæður eftir streymisaðskilnað eru flóknar og líkanið nær ekki að herma það nákvæmlega.

5.10 Kraftmælingar á blakandi vængjum

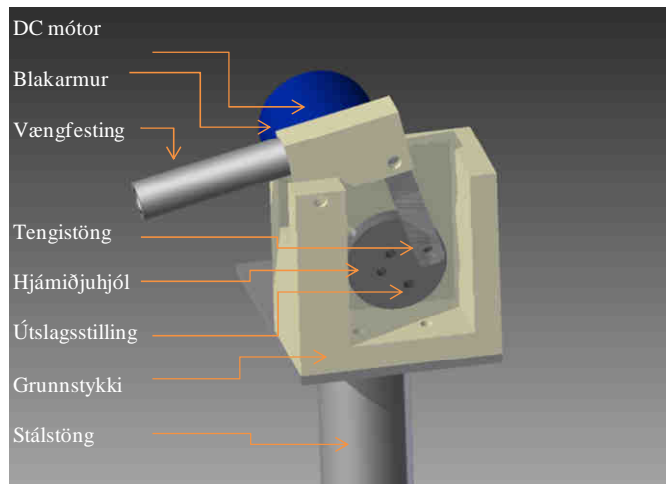
Tilgangur þessarar tilraunar var þríþættur, að prófa blakara sem smíðaður var og sýna fram á að slíkar tilraunir væru raunhæfar með þeim búnaði sem smíðaður hafði verið, gera tilraun til að kanna áhrif mismunandi vænglögunar á kraftamyndun blakandi vængs og ákvarða skynsamlega aðferð til að setja fram niðurstöður. Framkvæmdar voru mælingar í samræmi við lýsingu hér neðar, en sökum tímaannmarka gafst ekki nægilegur tími til að kryfja það gríðalega magn mæligagna sem fékkst til mergjar. Teljum við að ítarleg skoðun og framsetning gagna með tilliti til hina ýmsu breyta sem til skoðunar voru séu jafnvel efni í annað verkefni. Þó má finna í niðurstöðukafla hér neðar rit sem sýna niðurstöður, sem þó afmarkast við aðeins hluta þeirra vængja sem útbúnir voru og tvær breytur er varða vænglögun. Auk þess eru alls ekki öll gögn er varða þróun krafta með tilliti til breytilegs útslags og blaktíðnar hagnýtt. Þannig eru í raun aðeins um brotabrot af þeim upplýsingum sem vinna má úr gögnunum sett fram hér neðar. Gröf sem sýna niðurstöður annara vængja en þeirra sem teknir eru til skoðunar hér má finna í viðauka E.

5.10.1 Rökstuðningur

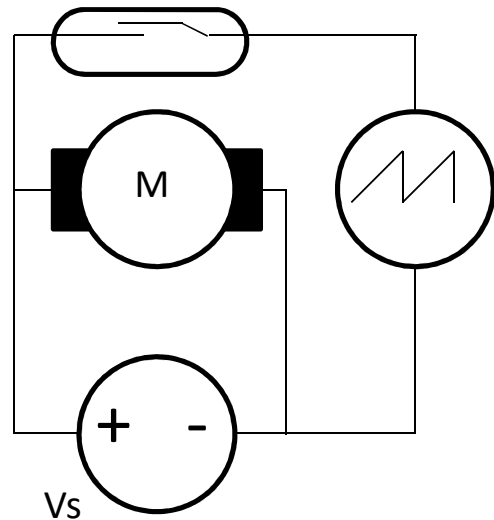
Eins og áður hefur komið fram er einfalt að álykta að mikilvægasta hreyfing í blaki fugla sé blakhreyfingin sjálf, út frá stærð aflvélar þeirrar hreyfingu, brjóstvöðvans. Því var ákveðið að ráðast í smíði tækis sem gæti hermt slíka hreyfingu, með þeim formverkjum þó að ekki væri hægt að búast við því að slík hreyfing ein og sér myndi duga til þess að mynda þá krafta sem nauðsynlegir væru til að viðhalda lyfti-og kný kröftum raunverulegs vélfugls. Töldum við þó að mælingar við þær aðstæður væri skynsamlegur byrjunarreitur og rýni í niðurstöður gætu verið hjálplegar til að ákveða næstu skref í þróun vélbúnaðar fyrir vængsláttarhreyfingu.

5.10.2 Lýsing á búnaði

Við kraftmælingar á blakandi vængsniðum var notast við sama grunnbúnað (kraftvog, stálgrind og kassa) og notast var við þegar kraftmælingar á föstum vængsniðum voru framkvæmdar. Ný stálstöng með meira þvermál og efnisþykkt var smíðuð, til þess að koma í veg fyrir áhrif titrings af völdum tregðukrafta. Vindhlífín var talin óþörf vegna hverfandi viðnámskrafts frá streyminu, þar sem að stöngin stóð í utanverðu skerlagi loftsreymisins. Á topp stangarinnar var svo fest tæki sem að við köllum blakara (mynd 142). Blakarinn er samsettur úr grunnstykki, 24V DC motor með niðurgírun sem snýr hjámiðjuhjólí, tengistöng sem að hægt er að festa fyrir fjögur mismunandi útslög og tengist blakarmi í hinn endann (mynd 143). Til að blakhreyfingin yrði sem þýðust voru lengdirnar A og B stilltar þannig að hornstaða $C(t)$ yrði sem næst því að vera hrein sínussveifla auk þess að gefa jafnt útslag upp og niður fyrir núllstöðu. Mynd 140 sýnir blakarann með skýringum. Til að geta mælt blaktíðnina nákvæmlega notuðum við segulrofa sem festur var á grunnstykkið og festum segul á hjámiðjuhjólíð þannig að rásin sem tengd var við rofann lokaðist einu sinni á hring, búnaðinn má sjá á mynd 144. Rásin var tengd við sveiflusjá (e. oscilloscope) sem gerði okkur kleift að lesa blaktíðni fyrir hvert tilfelli. Til að drífa mótórin var notast við spennugjafa með föstum spennustillingum. Notast var við spennugildin 10 V, 15 V og 20 V. Mynd 141 sýnir rásarteikningu af kerfinu. Hnitakerfi var skilgreint eins og í mælingu á föstum vængsniðum (sjá kafla 5.8).



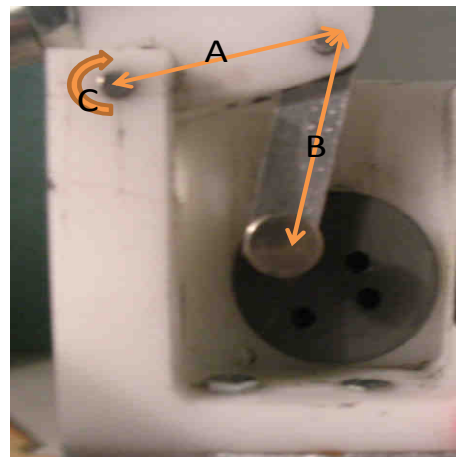
Mynd 140: Blakari – skýringarmynd



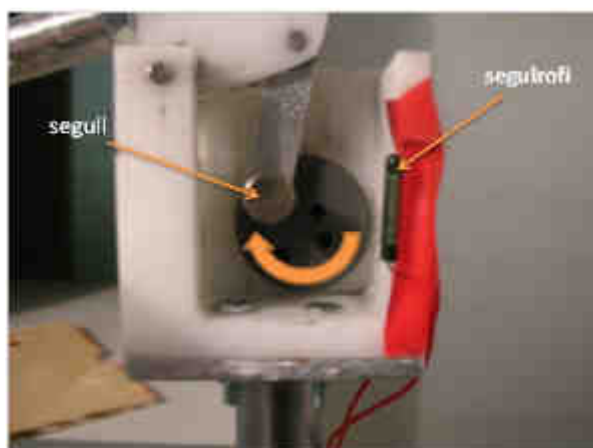
Mynd 141: Rásarteikning af blakara



Mynd 142: Blakari með áföstum væng.



Mynd 143: Hreyfilýsing blakara.



Mynd 144: Segull og segulrofi til tíðnimælinga.



Mynd 145: Spennugjafi(t.v.) og sveiflusjá (t.h.)

5.10.3 Fyrirkomulag mælinga

Þrátt fyrir að vængur með lækkanði bungu frá rót að enda henti líklega best þar sem að hann ætti að uppfylla skilyrði um myndun lyfti-og knýkrafta var ákveðið að byrja á því að gera kraftmælingar á einsleitum vængsniðum og kanna sérstaklega áhrif breyta eins og bungu, staðsetningu bungu, uppmjókkunar (e. taper), vinding og fram-og aftursveigju. Allir vængir höfðu 15% þykkt, vænghafið 50 cm og vænglínulengdina 12,5 cm sem gefur vænghlutfallið $AR = 4$. Tafla 24 sýnir yfirlit yfir vængsnið sem könnuð voru. Í viðbót við þá vængi sem taldir eru upp voru útbúnir vængir með $\pm 5^\circ$ vinding sem ekki voru prófaðir í vindgöngunum. Uppmjókkun vængja er gefin upp sem hlutfall af vænglínulengd vængrótar og vængenda. Meðalvænglína þeirra var stillt af sem 125 mm til að halda sömu Reynoldstölu og aðrir vængir höfðu. Allar mælingar voru framkvæmdar þannig að væng var stillt upp með vænglínu samsíða streymisstefnu. Gerðar voru mælingar í logni og við tíðnibreytitið 30 Hz sem jafngildir meðalstreymishraðanum 16,52 m/s. Reynoldstala við þau skilyrði reiknast sem $Re = 136.000$. Þar sem blakarinn er opið slaufukerfi (e. open loop system) var raunblaktíðni mæld fyrir hverja mælingu, en í ljós kom að oft á tíðum mældist rauntíðnin talsvert lægri þegar kveikt var á vindgöngum heldur en í logni. Einnig var merkjanlegur munur á blaktíðni eftir stærð bungu á vængsniðum, þannig að þeir vængir sem höfðu meiri bungu náðu lægri blaktíðni heldur en þeir sem höfðu minni bungu. Tafla 25 sýnir samanburð á mældri meðalblaktíðni fyrir mismunandi stillingar spennugjafa og vindganga.

Tafla 24: Listi yfir mæld vængsnið í tilraun með blakandi vængjum.

Vindingur:	0015-20°	0015-10°	0015	0015 + 10°	0015+20°
			3315		
			9315		
	Staðsetning bungu:	(15)115	(15)315	(15)515	(15)715
	Uppmjókkun:	0015 50%	0015 66%	0015 83%	
	Fram-og aftursveigja:	0015 +0,5C	0015 – 0,5C		

Tafla 25: Mældar meðalblaktíðnir.

Tíðnibreytisstilling:	Rauntíðni – $V_s = 10$ V	Rauntíðni – $V_s = 15$ V	Rauntíðni – $V_s = 20$ V
0 Hz	0,967 Hz	1,471 Hz	2,010 Hz
30 Hz	0,925 Hz	1,414 Hz	1,894 Hz

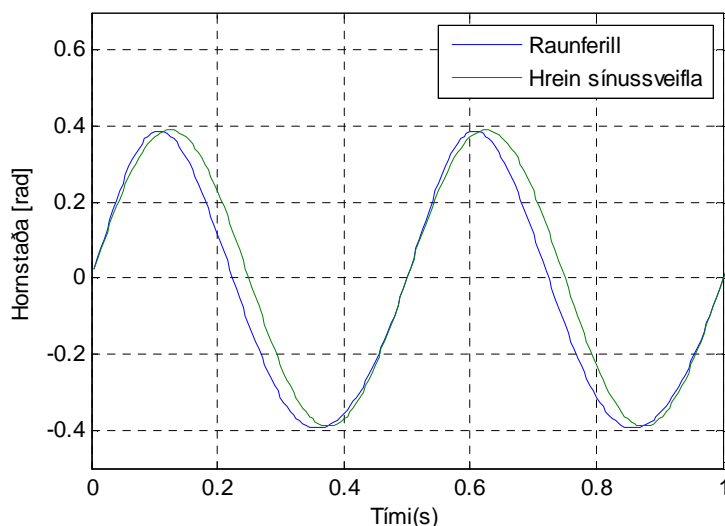
Tafla 26: Kennitölur mælinga á blakandi vængjum.

Blaktíðni	T (mæld fyrir hverja keyrslu)
Söfnunartíðni	1000*T Hz
Meðaltalsstilling	10 gildi/mæligildi
Raunsöfnunartíðni	100*T Hz
Söfnunargildi	1000 mæligildi
Söfnunartími	10*T ⁻¹ sek

Söfnunartíðni var stillt þannig að 100 mæligildi myndu mælast í hverri sveiflu. Var það gert með því að stilla raunsöfnunartíðni fyrir hverja keyrslu sem 100T [Hz], þar sem T er mælt gildi blaktíðni. Tafla 26 geymir yfirlit yfir aðrar kennitölur mælinga.

5.10.4 Hreyfilýsing

Eins og fram kemur í kafla um lýsingu mælibúnaðar var sveifla blakara stillt af þannig að hún nálgadist sem best hreinni sínussveiflu. Sökum þess hvernig tengistöngin stýttist í lóðréttu stefnu tvisvar á hverjum hring brenglast sveiflan þó örlítið, sem veldur smávægilegu fráhrarfi frá hreinu sínussveiflunni. Notast var við hreyfigreiningu (e. dynamic simulation) sem er innbyggð í Autodesk Inventor til að kortleggja lögun sveiflunnar um snúningslið blakarmsins nákvæmlega. Mynd 146 sýnir niðurstöðu þeirrar greiningar, í samhengi við hreina sínussveiflu af sömu tíðni og með sama útslag. Miðað er við mestu tíðni (~2 Hz) og mesta útslag (~±0,39 rad). Við sjáum að fráhrarf ferilsins frá hreinu sínussveiflunni er ekki ýkja mikið og út frá praktísku sjónarhorni vel raunhæft að miða við að sveiflurnar séu eins.



Mynd 146: Hornstaða blakara sem fall af tíma.

5.10.5 Gagnaúrvinnsla og jöfnur

Kafli um niðurstöður er að öllu leyti unninn upp úr mæligögnum sem fengin voru út úr mælingu með tíðnibreytistillingu vindganganna stillta á 30 Hz. Áður en hafist var handa við að greina mæligögn voru gögnin síuð með hlaupandi meðaltali 21 næstliggjandi punkta. Þannig fengust ferlar sem endurspeglar betur mælingar heldur en raungögn þar sem að mikið var um hátíðnisveiflur með stórum útslögum sem að hugsanlega má skýra með hátíðnititringi frá mælibúnaði. Lagt var mat á áhrif blakhreyfingarinnar á krafta í x, y og z stefnur með því að finna hæsta og lægsta gildi kraftgildavigursins eftir síun samkvæmt:

$$U_{F_i} = \max(F_{X,j}) - \min(F_{X,j})$$

Þar sem $i \in [x,y,z]$ og $j \in [1,2,\dots,1000]$. Þá var meðalgildi mælds krafts í z-stefnu fundið skv:

$$F_{Zmeðal} = \frac{1}{1000} \sum_{i=1}^{1000} F_{Z,i}$$

Gögnin voru loks stöðluð með því að deila hreyfiprýstingi og ofanvarpsflatarmáli upp í $U_{F,i}$ og $F_{Zmeðal}$ samkvæmt:

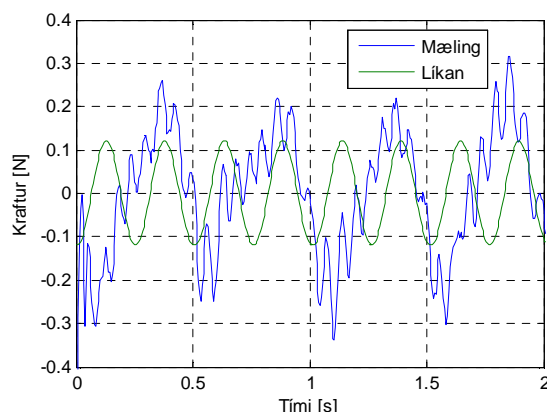
$$C_{\Delta F_i} = \frac{2 \cdot U_{F_i}}{\rho \cdot S \cdot v^2}$$

og

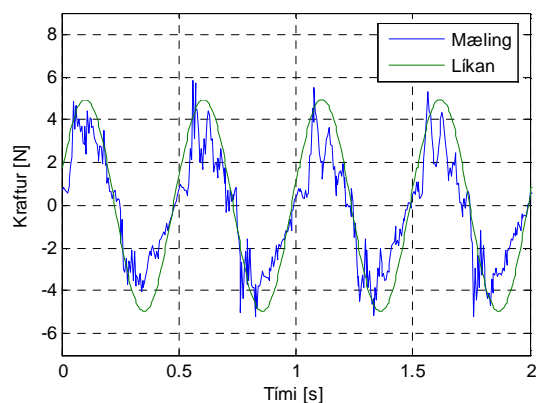
$$C_{F_m} = \frac{2 \cdot U_{F_{Zmeðal}}}{\rho \cdot S \cdot v^2}$$

þar sem ρ táknar eðlismassa lofts við 21°C [1,204 kg/m³], S táknar ofanvarpsflatarmál [0,0625 m²] og v táknar streymishraða [16,52 m/s].

5.10.6 Samanburður mældra kraftferla við vélfuglalíkan



Mynd 147: Mæld gildi vs líkan, kraftur í lárétta stefnu.

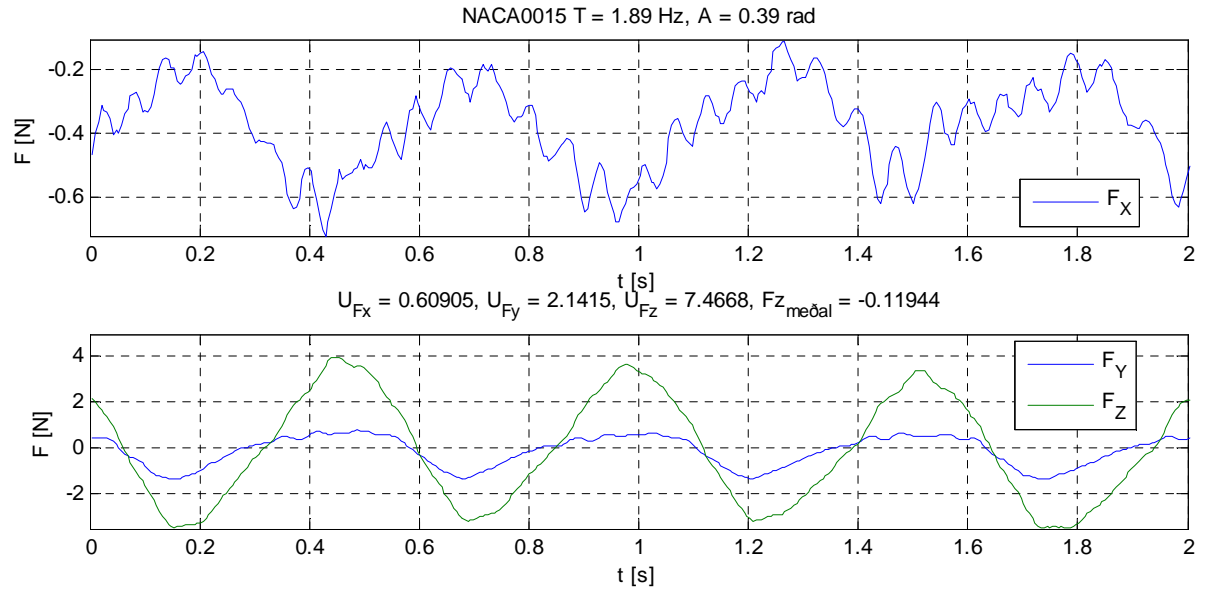


Mynd 148: Mæld gildi vs líkan, kraftur í lóðrétta stefnu.

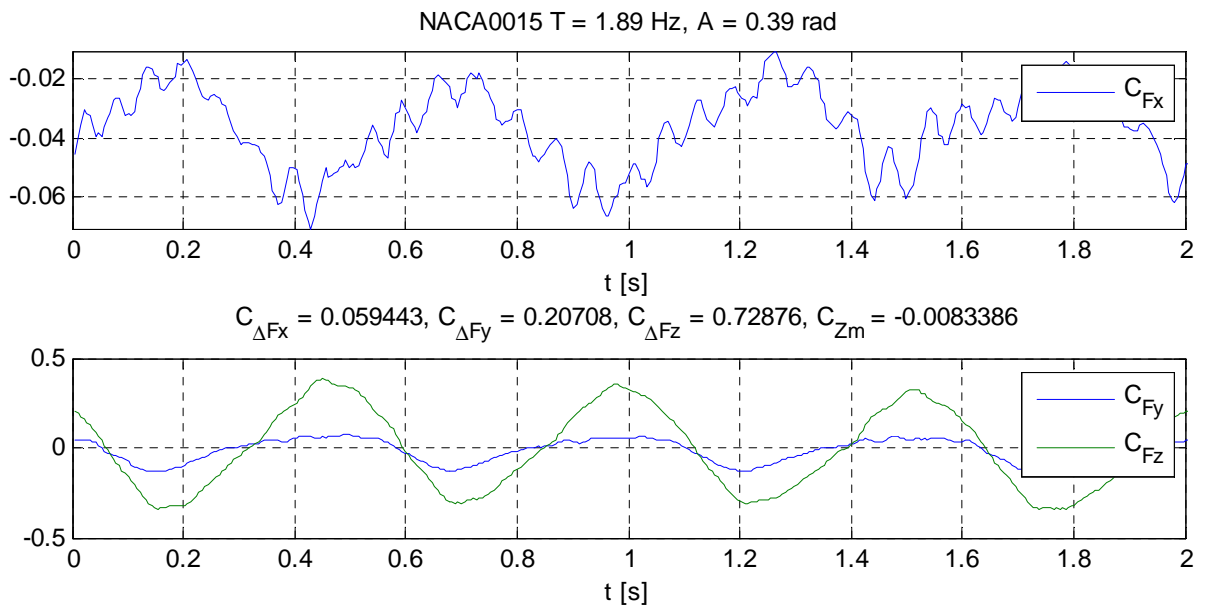
Sett var upp líkan af mæliaðstæðum í samræmi við skilgreiningar í kafla 5.5 um reiknilíkan fyrir vélfugl, þar sem að fjöðrunarhreyfingunni var sleppt. Notast var við kennistærðir NACA0012 á Reynoldstölunni 109.000 til að reikna kraftagildi miðað við áfallshorn, blaktíðnina 2 Hz og útslagið 0,39 radíana. Þá var reiknað með að vængurinn væri einsleitur, þ.e. innri og ytri vængur af sömu gerð auk þess sem að innri vængur var látinn snúast í stað þess að standa kyrr eins og í líkaninu sem lýst var. Til að reikna þátt tregðukrafts í lóðrétta kraftinum var samanburðarvængurinn, NACA0015, vigtaður og mældist þyngd hans 85 grömm. Notast var við niðurstöður kraftareikninga í lárétta og lóðrétta stefnu til samanburðar við raunmæligögn NACA0015. Mynd 147 sýnir samanburðinn fyrir lárétta hluta kraftsins, þar sem búið er að taka hlaupandi meðaltal 21 næstliggjandi punkta til að lýsa mæligögnum. Var það talið nauðsynlegt til að skýra gögnin betur, þar sem að hlutfallslega mikið suð einkennir mæligögnin. Þá var meðalgildi mæligagnanna, sem og líkansins, dregið frá hverju staki til að hliðra gögnunum þannig að þau sveifluðust um núllpunkt. Mynd 148 sýnir samsvarandi samanburð fyrir kraft í lóðrétta stefnu. Í því tilfelli var raunmæligögnum stillt upp án síunar og hliðrunar. Greinilegt er að lóðrétti samanburðurinn kemur vel út, þ.e. líkanið virðist endurspegla raunmælingar nokkuð vel, en grundvallarmunur er í samanburði krafta í lárétta stefnu þar sem að toppar virðast aðeins standast á í annað hvert skipti, meðan að 180° fasamunur er á hinum toppunum. Raungildi krafta virðast þó endurspegla raunmælingarnar ágætlega, a.m.k. eftir síun gagna.

5.10.7 Hlaupandi meðaltal af raungildum

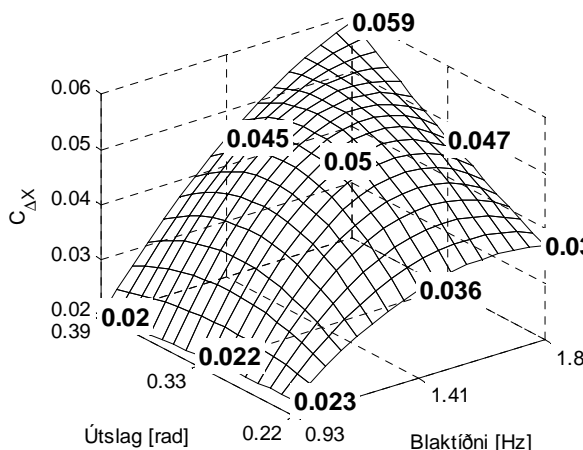
Séu kraftferlar fyrir x og z stefnur bornir saman (mynd 149) kemur í ljós að ekki koma fram þau áhrif sem búist var við, þ.e. að það fáið tveir toppar í F_x , fyrir hvern einn topp í F_z . Þvert á móti er tíðnin sú sama. Ósvarað er þó spurningunni um það hvers vegna það koma nákvæmlega 10 litlar sveiflur fram í F_x á hverja stærri sveiflu. Þegar allt er tekið saman virðist mæling lárétta kraftsins engan veginn í samræmi við væntingar og því verðugt efni til frekari rannsókna. Fyrir F_z eru niðurstöður meira í samræmi við væntingar, krafturinn sveiflast með $\pm 4\text{N}$ útslagi um núllið, enda um samhverfan væng að ræða. Nettó lóðréttur kraftur sem fengist út úr einni sveiflu yrði því enginn. Með aukinni bingu kemur í ljós hliðrun á lóðréttum meðalkrafti eins og sjá má á mynd 155. Eins og fram kom í kafla um úrvinnslu gagna voru gögnin stöðluð á svipaðan hátt og gert var í skýrslu um kraftmælingar á föstum vængsniðum. Mynd 150 sýnir sömu mæligögn, nú á staðalformi. Fleiri myndir sem sýna hrá gögn, síuð með hlaupandi meðaltali má finna fyrir önnur vængsnið, blaktíðni og útslög í viðauka E.



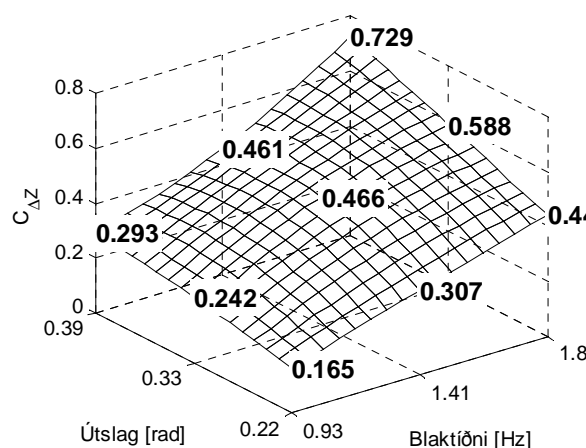
Mynd 149: Síað kraftmerki NACA0015.



Mynd 150: Síað kraftmerki NACA0015 eftir stöðlun.



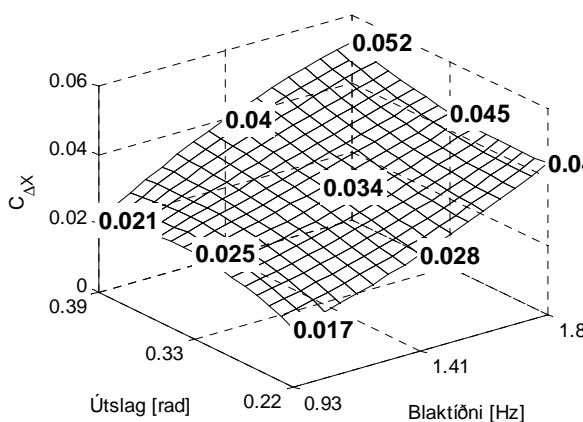
Mynd 151: Lárétt kraftútslag sem fall af blaktíðni og útslagi (NACA0015).



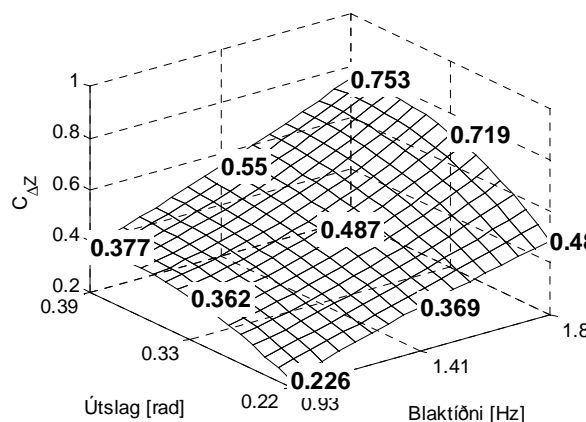
Mynd 152: Lóðrétt kraftútslag sem fall af blaktíðni og útslagi (NACA0015).

5.10.8 Breyting í láréttum og lóðréttu kraftútslagi með blaktíðni og blakútslagi

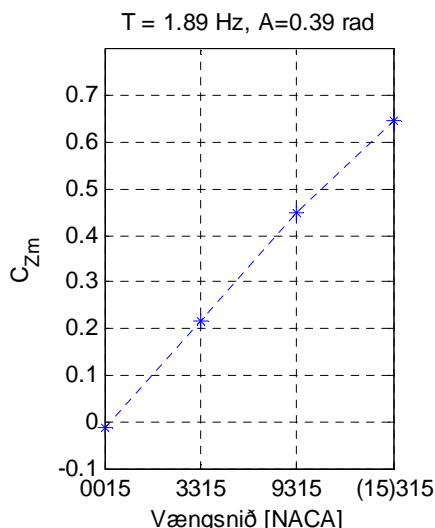
Mynd 151 sýnir hvernig stuðull láréts kraftútslags breytist sem fall af blaktíðni og útslagi og mynd 152 sýnir lóðréttu kraftútslag á sama hátt. Gögnin eru framsett þannig að á milli mæligilda er yfirborð sem fundið er með með teningsbrúun (e. cubic spline interpolation). Við sjáum að hæstu stuðlana er í báðum tilfellum að finna þegar bæði blaktíðni og útslag eru í hámarki, sem er í samræmi við væntar niðurstöður. Fyrir lárétta kraftstuðulinn ($C_{\Delta x}$) er athyglisvert að fyrir lægsta og miðútslag lækkar stuðullinn eða stendur nokkurn veginn í stað frá miðtíðninni upp að hæstu tíðni, öfugt við þá þróun sem að fyrirfram hefði mátt búast við. Einnig sjáum við að aukið útslag hefur lítil sem engin áhrif á stuðulinn á lægstu blaktíðninni. Teljum við að þessar niðurstöður séu verðugt efni í frekari rannsóknir. Sé lóðrétti kraftstuðullinn skoðaður kemur í ljós að breyting á honum með tilliti til blaktíðni og útslags er meira í samræmi við væntingar, stuðullinn eykst nokkuð jafnt með aukinni tíðni og útslagi. Fyrir fast gildi annarar hvorrar breytunnar kemur í ljós að breyting með aukinni tíðni er þó meiri heldur en breytingin með auknu útslagi. Sem samanburð er bent á myndir 153 og 154 sem sýna sömu framsetningu á sömu gögnum fyrir NACA9315, sem hefur 9% bingu. Hegðunin þar er nokkuð meira veginn í samræmi við væntingar, en aftur koma fram sömu áhrif af breytingunni, meiri breyting með aukinni tíðni heldur en með auknu útslagi sé hinu gildinu haldið föstu.



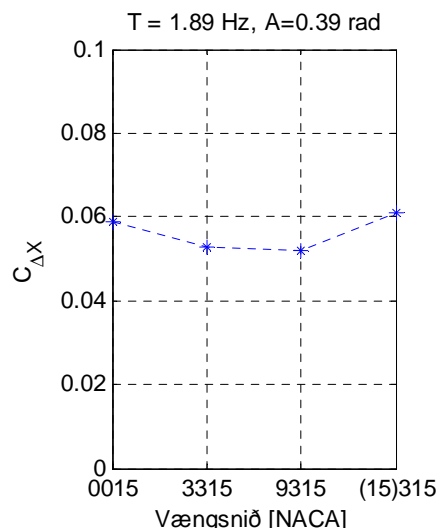
Mynd 153: Lárétt kraftútslag sem fall af blaktíðni og útslagi (NACA9315).



Mynd 154: Lóðrétt kraftútslag sem fall af blaktíðni og útslagi (NACA9315).

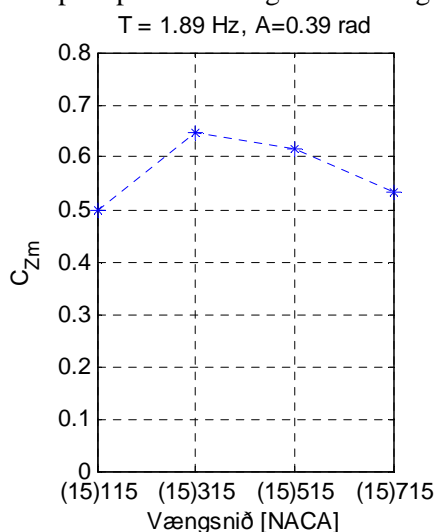


Mynd 155: Breyting í lóðréttum meðalkrafti sem fall af vængbunguhlutfalli.

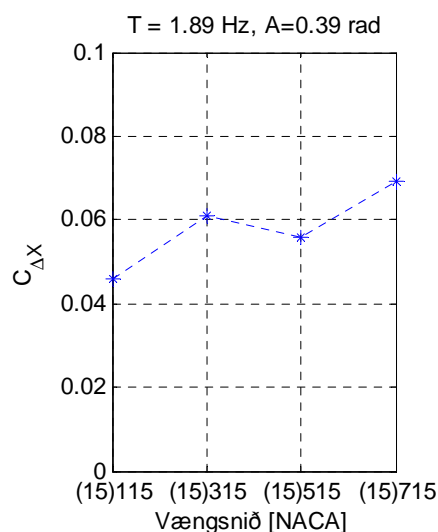


Mynd 156: Breyting í láréttu kraftútslagi sem fall af vængbunguhlutfalli.

Sé meðalgildi lóðréttu kraftsins staðlað og skoðað sérstaklega hvernig það breytist með aukinni vængbungu (mynd 155) kemur í ljós nokkuð jöfn aukning með auknu bunguhlutfalli innan þess sviðs sem kannað var, þ.e. frá 0% upp í 15% bungu. Mesta aukningin sem fall af aukningu í bunguhlutfalli er að finna næst samhverfa vængnum að vængnum með 3% bunguhlutfallinu, en jöfn aukning eftir það að 15% bunguhlutfallinu. Þessi niðurstaða kemur nokkuð vel heim og saman við niðurstöðu mælinga á svipuðum (þó ekki alveg sömu) vængsniðum í kraftmælingum á kyrrstæðum vængjum. Af því má draga þá ályktun að blakhreyfing hafi ekki áhrif á það hvernig fast bunguhlutfall myndar lyftikraft sé meðaltal tekið yfir heila sveiflu. Sé stuðull láréttu kraftútslagsins skoðað út frá þessu tilliti kemur ekki í ljós nein greinileg breyting með aukinni vængbungu (mynd 156). Fróðlegt væri að skoða þessar sömu breytingar með breytilegri blaktíðni og útslagi, en myndirnar hér að ofan sýna aðeins áhrifin á hámarksblaktíðni og hámarksútslagi. Séu áhrif á sömu breytur skoðuð með tilliti til mismunandi staðsetningar hámarksbungu á vænglínu kemur ekki í ljós nein sérstök, afgerandi leytni. Þó mætti halda því fram að mestu lóðréttu kraftútslagin sé að finna þegar bungan er staðsett nálægt miðri vænglínu án þess þó að slík hegðun skeri sig áberandi mikið úr.



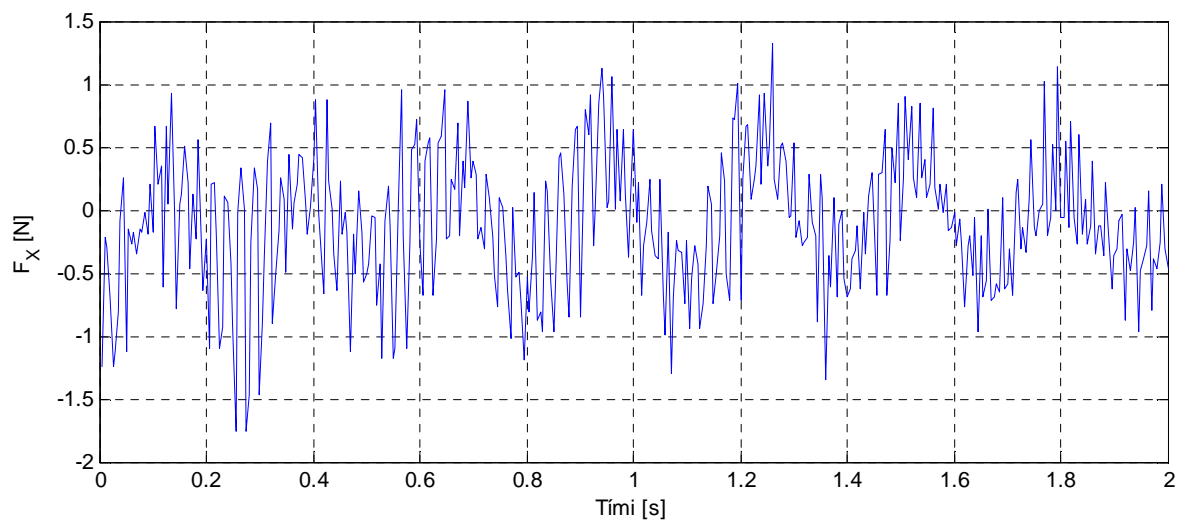
Mynd 157: Breyting í lóðréttum meðalkrafti sem fall af staðsetningu hámarsbungu.



Mynd 158: Breyting í láréttum meðalkrafti sem fall af staðsetningu hámarsbungu.

5.10.9 Kraftferill í lárétta stefnu fyrir NACA0015

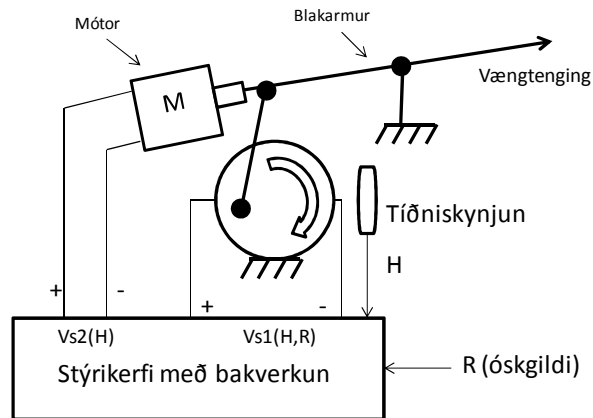
Eins og áður sagði koma niðurstöður kraftmælingar í lárétta stefnu nokkuð á óvart sé miðað við það sem búast mátti við áður en mælingin var framkvæmd. Mynd 159 sýnir fyrstu 2 sekúndur lárétrar kraftmælingar NACA0015 við tíðnibreytitíðnina 30 Hz, mestu blaktíðni og hæsta útslag. Þrátt fyrir ítarlega leit að orsökum hefur okkur ekki enn tekist að skýra þessi afbrigðilegheit. Í fyrsta lagi koma ekki fram toppar á tvöfaldri blaktíðninni eins og búist var við heldur koma þeir fram á einfaldri blaktíðni, í 180° fasajafnvægi við lóðrétta kraftinn. Jafnframt því koma fram stórar sveiflur á hærri tíðni, en sé rýnt vel í sést að sú tíðni er nákvæmlega tífalt hærri en lágtíðnin. Nokkrir ferlar voru skoðaðir og kom í ljós að þetta átti við á þeim öllum, óháð blaktíðni, útslagi og vænglögum. Teljum við það afar athyglisvert og þarfnast nánari skoðana og mælinga. Hér setjum við því punktinn við umfjöllun um kraftmælingar á blakandi vængjum en vonum jafnframt að birting þessara gagna og spurningarnar sem þau kunna að vekja verði til þess að búnaður sá sem sérhannaður hefur verið til þessara mælinga verði nýttur í því skyni að reyna að svara þeim spurningum.



Mynd 159: Hrá mæligögn lárétrar kraftmælingar NACA0015.

5.10.10 Um blakarann

Þrátt fyrir tiltölulega einfalda ásjúnd blakarans býður hann upp á mælingar við ótal mismunandi skilyrði. Eins og áður sagði er mögulegt að velja milli fjögurra útslaga og blaktíðnin takmarkast aðeins af spennugjafa sem notaður er til að knýja hann, þó má innspenna DC-mótorsins ekki fara upp fyrir 24V. Þá er með einföldum hætti mögulegt að skipta út vængjum og breyta horni milli vænglínu og streymis átt (sem í tilfalli blakandi vængs er ekki alveg það sama og áfallshorn, sjá kafla 5.4). Mögulega væri hægt að endurbæta tækið með því að útbúa bakverkunarkerfi (e. feedback system) til að festa blaktíðnina við ákveðið gildi, óháð vindhraða og vænglögum. Með enn meiri endurbótum mætti útbúa blakarm með litlum mótör sem að sneri þverás vængsins um ákveðið (stillanlegt) horn gildi sem, með bakverkun frá tíðniskynjun, myndi ákvarða hornhraða hans. Þannig væri hægt að herma tvær af þeim fjórum grunnhreyfingum blakandi vængja í náttúrunni sem lýst var í kafla 5, það er blakhreyfingu og fjöðrun. Mynd 160 sýnir teikningu af þessari hugmynd að endurbótum.



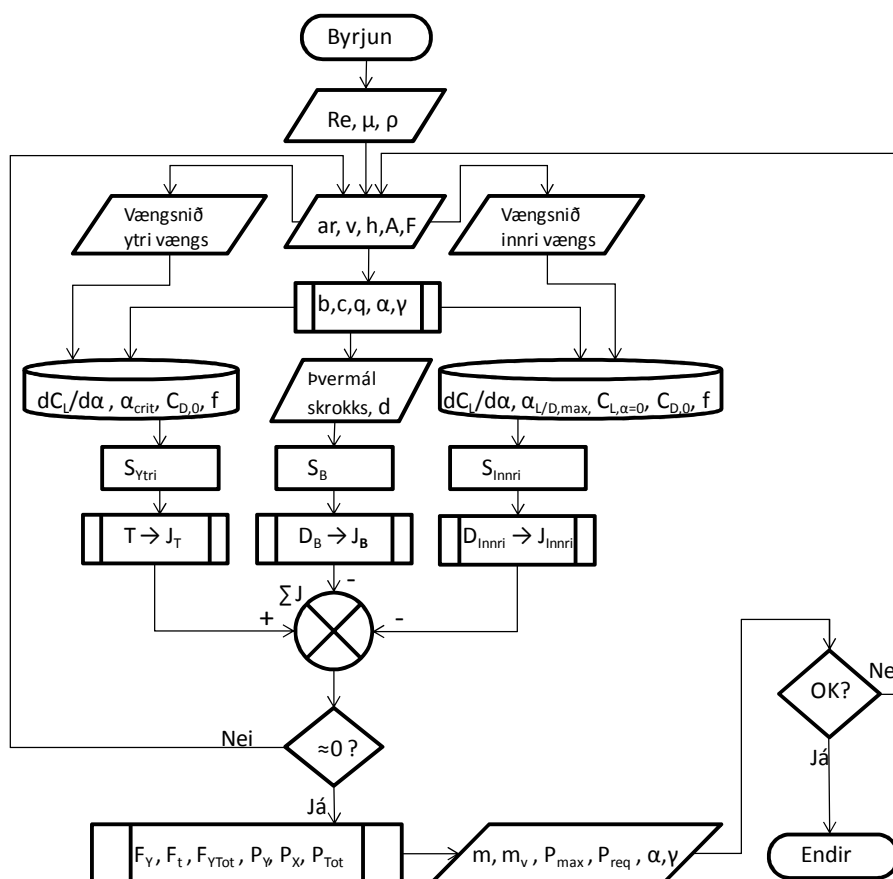
Mynd 160: Hugmynd fyrir endurbættan blakara með aukinni hreyfifetu.

5.11 Grunnhönnun vélfugls

Þessi lokakafli skýrslunnar fjallar um það hvernig hagnýta má sér vélfuglalíkanið sem skilgreint var í kafla 5.5 til þess að ákvarða helstu grunnstærðir slíks flygilds, massa, vænghaf, þvermál skrokks, aflþörf o.s.frv. Einnig verður notast við niðurstöðutöflur úr kafla 5.8 um kraftmælingar á kyrrstæðum vængsniðum til þess að velja vængsnið og skilgreina kraftferla. Hönnunarferlið byggir að öllu leyti á stöðugu flugi, á jafnri hæð og á jöfnum hraða. Greining á öðrum fösum flugs vélfugla, flugtaki, landingu, sérstökum hreyfingum eins og veltu, beygjum og svo framvegis krefst sérstakrar viðleitni sem er utan verksviðs þessa verkefnis. Þar að auki er á engan hátt farið út í þarfagreiningu fyrir hug-og vélbúnað sem nauðsynlegt er að þróa fyrir verkefni sem þetta. Þó hefur frá upphafi verið miðað við að vélfugl sem þessi ætti að verða sjálfráður og með óháð aflkerfi fyrir sitt hvorn vænginn, þótt að það hafi í sjálfu sér enga þýðingu fyrir grunnhönnun sem þessa þar sem hreyfilýsingin byggist á því að stöðug skilyrði ríki. Hér á eftir verður farið í gegnum einfalt hönnunarferli sem byggist á hermiforriti sem skrifað var í Matlab og er lýst hér neðar. Finna má kóðann í viðauka B2.

5.11.1 Virkni hermiforríts

Hönnunarferlið hefst með því að velja streymisskilyrði, þ.e. Reynoldstölu, sem ætti við miðað við ætlað notkunarvið vélfuglsins. Þannig getum við valið upplýsingar úr viðeigandi gögnum til notkunar í útreikningum. Út frá ætlaðri flughæð (H) og áætluðu hitastigi (T) í þeirri flughæð veljum við hönnunarseigjugildi og hönnunareðlismassa. Þá höfum við skilgreint þær umhverfisbreytur sem verða nauðsynlega að haldast fastar í gegnum allt ferlið. Því næst er komið að vali vænghlutfalls annars vængsins (ar), hönnunarflughraða (v), áætlaðs massahlutfalls vængja (h) sem hlutfall af hönnunarmassa sem er ein af úttaksbreytum (e. output parameter) forrísins, blakútslagi (A) og blaktíðni (F). Samhliða því vali fer fram val á vængsniðum innri og ytri vængs og viðeigandi upplýsingar um lyftikrafts-og viðnámsferla þeirra vængsniða sóttar í viðeigandi töflur. Þá er einungis eftir að ákvarða þvermál skrokksins (d). Forritið hefur nú allar upplýsingar til að reikna út vænglínulengd (c), vængbreidd annars vængsins (b), hreyfiþrýsting (q), og sem fall af tíma yfir eina vængsláttarlotu, áfallshorn (α) og fjöðrunarhorn (γ). Út frá stærðarupplýsingum reiknast flatarmál hvers hluta fyrir sig (S_{Ytri} , S_{Innri} , S_B) sem, ásamt hreyfiþrýstingi, vængsniðaupplýsingum og hornaútreikningum gerir forritinu kleyft að reikna út lárétta kný-og viðnámskrafta sem fall af tíma yfir eina vængsláttarlotu. Þær upplýsingar eru svo túlkaðar yfir í atlag frá hverjum hluta fyrir sig, þar næst eru atlögin lögð saman og að lokum birtist tala sem segir til um atlagsjafnvægið. Sú tala á að vera sem næst núlli, annars heldur skilyrðið um stöðugt flug ekki og endurskilgreina þarf eina eða fleiri innlagsbreytu (e. input parameter). Þannig endurtekur ferlið sig handvirkt þar til að notandi hefur náð jafnvægi. Með bestunaraðferðum má þó sjá fyrir sér að mögulegt væri að endurbæta forritið þannig að það nái jafnvæginu sjálfkrafa með tilliti til þess að einhverjum innlagsbreytum sé haldið föstum en forritinu leyft að breyta öðrum að vild. Þegar jafnvægi hefur náðst getum við haldið áfram og forritið reiknar krafta í lóðrétta stefnu (loftaflskrafta og tregðukrafta), aflþörf fyrir hreyfingu í lárétta og lóðrétta átt og birtir loks upplýsingar um hönnunarmassa, massa vængja, hámarks og meðal aflþörf auk þess sem að áfalls og fjöðrunarhorn eru birt sem fall af tíma yfir eina vængsláttarlotu. Ef að massa-eða aflkröfufutakmörkum er ekki náð þarf að hefja ferlið upp á nýtt með tilheyrandi endurskilgreiningum á innlagsbreytum. Virkni forrísins er einnig lýst á flæðiriti sem sjá má á mynd 161



Mynd 161: Flæðirit hermiforríts.

5.11.2 Dæmi um hönnunartilfelli vélfugls

Eins og áður var greint frá var notast við hermiforrítið og niðurstöður tilraunar um kraftmælingar á kyrrstæðum vængjum til að reikna út helstu kennitölur vélfugls sem ræður yfir tveimur grunnhreyfingum. Ekki verður farið í gegnum hverja einstaka ítrun fyrir sig, heldur verða einungis lokaniðurstöður birtar og gerð grein fyrir vali á innlagsbreytum.

5.11.3 Innlagsbreytur

Ákveðið var að notast við Reynoldstöluna 109.000 til ákvörðunar streymisskilyrða, þar sem að niðurstöður við þau skilyrði reyndust heppilegust af þeim þrem tilfellum sem athuguð voru. Miðað var við að fuglinn skyldi fljúga við sjávarmálsskilyrði með útihitann 20°C. Hönnunarflughraði var valinn 10 m/s. Þar sem að sú tilraun sem við framkvæmdum var einungis miðuð við eitt vænghlutfall ($AR = 6$) var ákveðið að því skyldi haldið föstu þar sem þekkt er að kraftferlar vængja breytast með breytilegu vænghlutfalli. Vænghlutfall annars vængsins var því valið sem helmingur þeirrar tölu. Vængsniðið sem valið var á innri væng var miðað við þann væng sem að gaf hæsta svifstuðul í áður nefndri tilraun, NACA8412. Á ytri væng varð NACA0012 fyrir valinu, þar sem að það er það vængsnið sem hefur hæsta hallatölugildi og ofrishorn, auk þess sem að eitt af skilyrðum fyrir líkaninu er að vængsnið ytri vængs sé samhverft. Upphaflega var lagt upp með að hafa blaktíðnina og blakútslagið hóflegt, til að lágmarka tregðukrafta, en þar sem að ferlið er bundið fyrir allar aðrar inntaksbreytur, var gildi þeirra breyta hækkað þar til að atlagsjafnvægi var náð. Endaði blakútslagið í $\pm 40^\circ$ og blaktíðnin 2,5 Hz.

Tafla 27: Umhverfisbreytur

Reynoldstala	109.000
Kvikseigja	$1,52 \times 10^{-5} \text{ [m}^2\text{/s]}$
Eðlismassi	$1,204 \text{ [kg/m}^3\text{]}$

Tafla 28: Innlagsbreytur innri vængs.

Vængsnið	NACA8412
$dC_L/d\alpha$	$3,49 \text{ [rad}^{-1}\text{]}$
$C_{L,\alpha=0^\circ}$	$0,48 \text{ [rad}^{-1}\text{]}$
$\alpha_{L/D,\max}$	$5,8 \text{ [}^\circ\text{]}$
$C_{D,0}$	$0,07$
f^1	$1783 \text{ [rad}^2\text{]}$

Tafla 29: Innlagsbreytur ytri vængs

Vængsnið	NACA0012
$dC_L/d\alpha$	$3,71 \text{ [rad}^{-1}\text{]}$
α_{crit}	$16 \text{ [}^\circ\text{]}$
$C_{D,0}$	$0,04$
f^1	$1720 \text{ [rad}^2\text{]}$

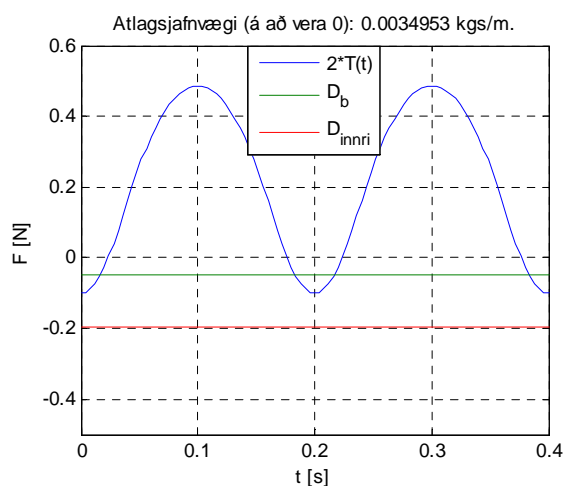
Tafla 30: Aðrar innlagsbreytur.

Massahlutfall vængja (h)	$0,2$
Blaktíðni	$2,5 \text{ [Hz]}$
Blakútslag	$\pm 40 \text{ [}^\circ\text{]}$
Hönnunarflughraði	10 [m/s]
Þvermál skrokks	$0,1 \text{ [m]}$
Vænghlutfall (ar)	3

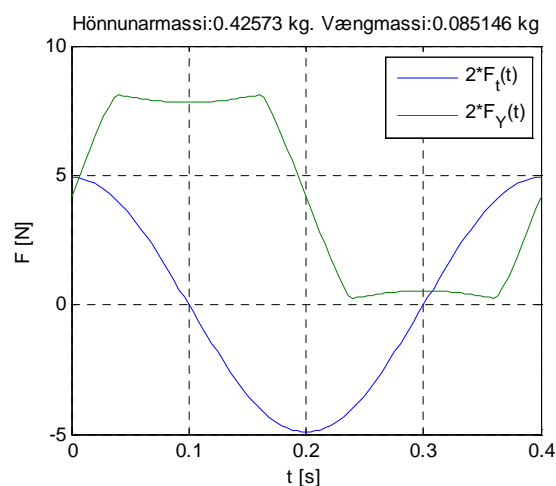
Hlutfall vængmassa var áætlað sem 20%, með endurskoðun í huga eftir því hvort að raungildi, sem reiknast eftir útreikning hönnunarmassa, yrði raunhæf tala. Loks var þvermál skrokks áætlað sem 100 mm. Tölur 27 – 30 sýna yfirlit yfir allar innlagsbreytur.

5.11.4 Úttaksbreytur

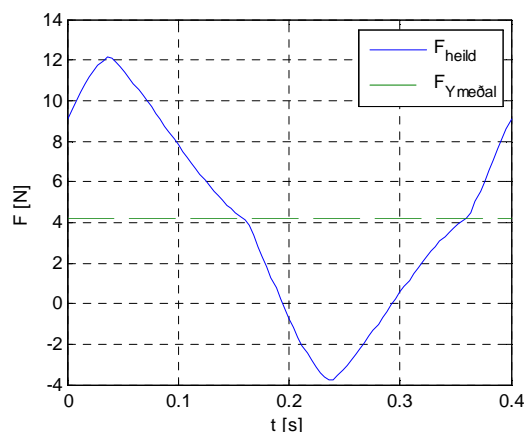
Út frá umhverfisbreytum og hönnunarflughraða reiknaðist vænglínulengdin 165 mm. Miðað við vænghlutfallið 3 (fyrir annan vænginn) reiknast vænghaf annars vængsins 495 mm. Eftir að atlagsjafnvægi var náð reiknaðist hönnunarmassi 426 grömm, þar af vængmassi 85 grömm. Myndir 162 og 163 sýna útreiknaða krafta, þáttaða niður eftir því hvaðan þeir verka, í lárétta og lóðrétta stefnu. Heildarkraft í lóðrétta stefnu, þ.e. loftaflskraft að viðbættum tregðukrafti má sjá á mynd 164 sem fall af tíma yfir eina vængsláttarlotu. Útreiknuð meðalafþörf reyndist vera 14,6 W og hámarksafþörf 30,0 W. Vinna fuglsins yfir eina vængsláttarlotu reiknaðist 5,8 J. Mynd 165 sýnir þróun í afþörf yfir eina vængsláttarlotu, í heildina sem og skipt niður eftir stefnu.



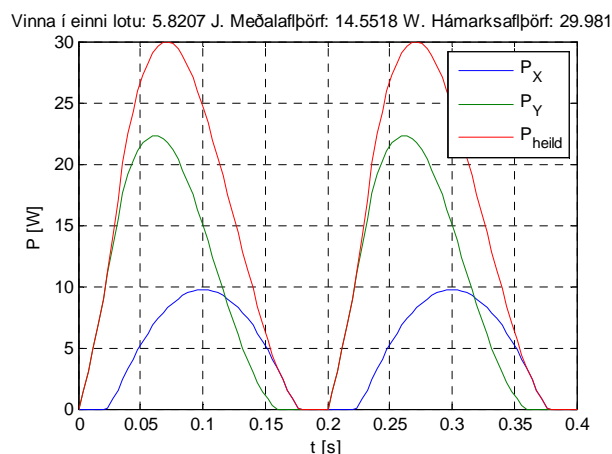
Mynd 162: Láréttir kraftar og atlagsjafnvægi.



Mynd 163: Lóðréttir kraftar, hönnunarmassi og massi vængja.



Mynd 164: Heildar- og meðalkraftur í lóðrétta stefnu sem fall af tíma yfir eina vængsláttarlotu.

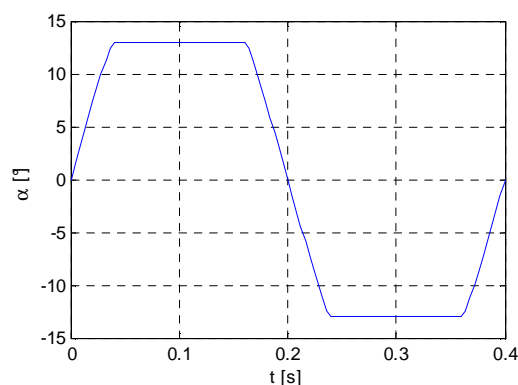


Mynd 165: Aflþörf í lárétta og lóðrétta stefnu ásamt heildaraflþörf sem fall af tíma yfir eina vængsláttarlotu.

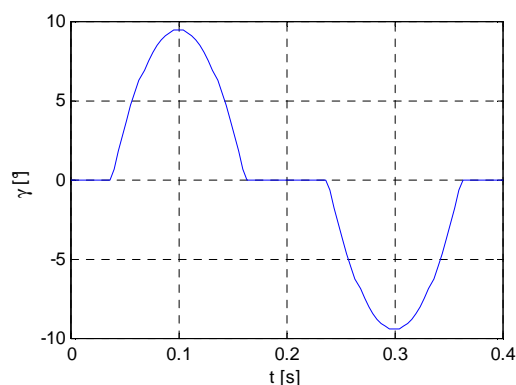
Áfallshorn sem fall af tíma má sjá á mynd 166. Greinilega má sjá hvernig fjöðrunarhreyfingin er hugsuð, þegar horn áfallsvindhraða hefur náð skilgreindu gildi (í þessu tilfelli 13° , $\alpha_{crit} - 3^\circ$), tekur fuglinn að beita fjöðrunarhreyfingunni til að viðhalda því horni eins lengi og mögulegt er í hverri vængsláttarsveiflu. Mynd 167 sýnir fjöðrunarhorn sem fall af tíma yfir eina vængsláttarlotu. Eins og sjá má kallar samspil blaktíðnar og blakútslags á um 9° breytingu á hornstöðu á aðeins um 0,05 sekúndum. Ljóst er að til þess að uppfylla þá kröfu þyrftu stýri- og aflkerfi fuglsins að vera mjög hraðvirk og öflug miðað við þyngd.

5.11.5 Túlkun niðurstaða

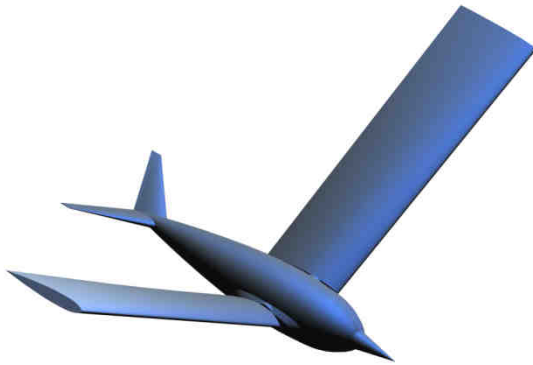
Með hjálp Autodesk Inventor var út frá niðurstöðum hermunarinnar teiknuð samsetningarmynd sem sýnir hvernig slíkur fugl gæti mögulega litið út í raunveruleikanum. Myndir 168 til 171 sýna staðlaðar ISO-varpanir af teikningunni með grunnmálsetningum. Ef við hugsum okkur að taka ætti næsta skref og fara út í fullhönnun vélfugls út frá niðurstöðum hermunarinnar duga þær til þess að draga ýmsar mikilvægar ályktanir varðandi hinar ýmsu hliðar hönnunarferlisins. Þannig má sem dæmi benda á að í hverri vængsláttarsveiflu upplifir fuglinn, vegna lóðréttra krafta, allt að þrefalt þrefaldan þyngdarkraft sem þarf að gera ráð fyrir í burðarþolsútreikningum. Niðurstöður vængmassaáætlunarinnar skorda okkur við það að halda massa vængjanna samanlagt í 85 grömmum. Autodesk Inventor gefur yfirborðsflatarmál eins vængs upp sem $0,173 \text{ m}^2$ og rúmmál hans sem $1113,3 \text{ cm}^3$. Ef við miðum við að vængurinn sé smíðaður með frauðplastskeranum fæst fyrir meðalþétt frauðplast, sem hefur eðlisþyngdina 20 kg/m^3 að þyngd þess verður um 22 grömm.



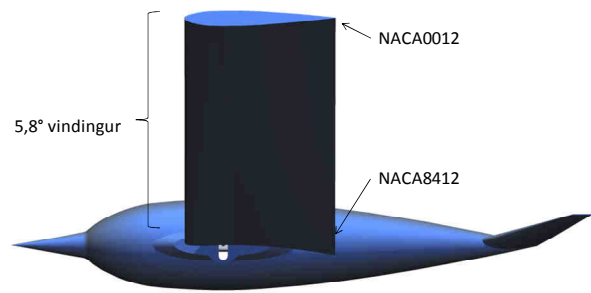
Mynd 166: Áfallshorn sem fall af tíma yfir eina vængsláttarlotu.



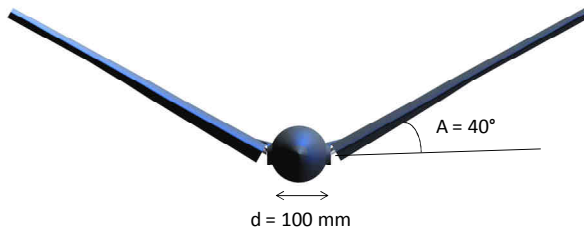
Mynd 167: Fjöðrunarhorn sem fall af tíma yfir eina vængsláttarhreyfingu.



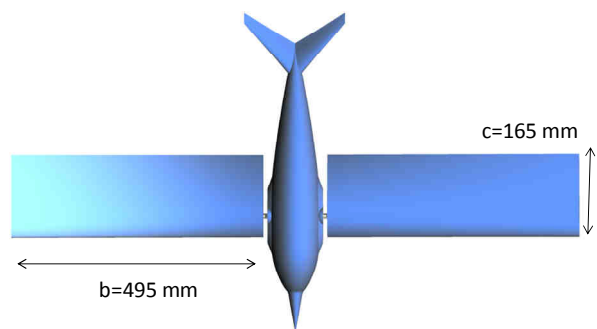
Mynd 168



Mynd 169



Mynd 170

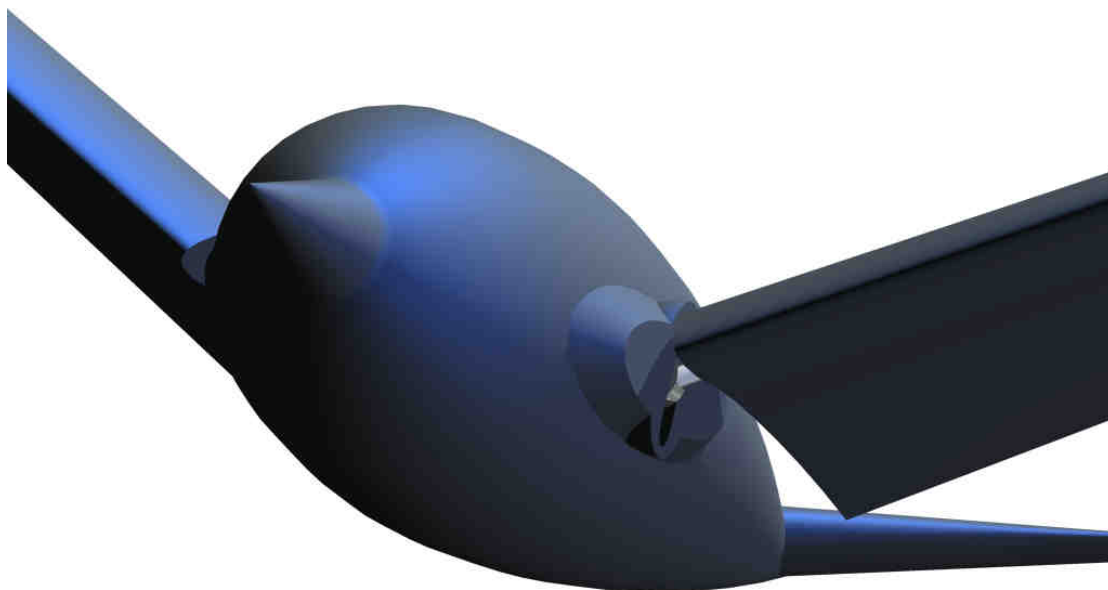


Mynd 171

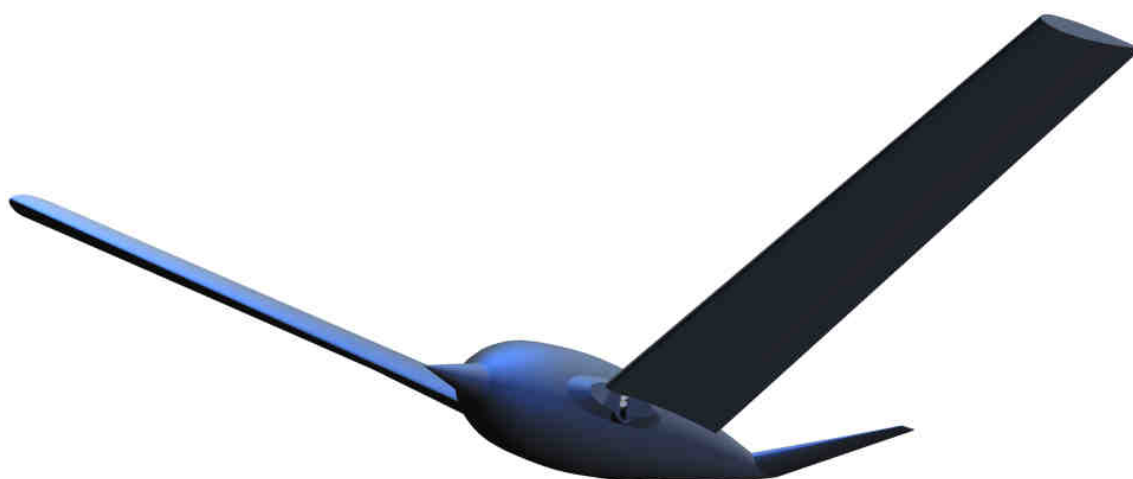
Algeng aðferð til að stífa af vængi og gefa slétta yfirborðsáferð í flugmódelismíði er að nota hitasamdráttar (e. heat shrinkable) plastfilmu. Sé miðað við eðlisþyngd plastfilmugerðarinnar Econocote, sem er uppgefin sem $0,07 \text{ kg/m}^2$ og algeng er til notkunar á vængjum flugmódelar sem hafa lágt vængálag (e. wing loading) fæst að þyngd filmunnar verður um 12 grömm (Anderson, 2009). Heildarþyngd vængsins er þá orðin 34 grömm og því um 9 grömm eftir sem nýta má til að útbúa vængfestinguna við búkinn. Skrokkur, aflkerfi og stýrikerfi þyrftu að komast fyrir í rými sem er 2234 cm^3 að rúmmáli og samanlögð þyngd mætti ekki fara yfir 340 grömm að þyngd. Þar vegur þyngd rafhlöðunnar væntanlega þyngst. Venjuleg 1,8 Amperstunda 7,4 V Li-Po rafhlaða, af þeirri gerð sem oft er notuð í fjarstýrð farartæki í þessum stærðarflokki, vegur um 105 grömm. Út frá orkupéttleikanum getum við áætlað flugþol vélfuglsins í mínútum (E):

$$E = \frac{1,8 [A \text{ klst}] \cdot 7,4 [V] \cdot 60 [\text{mín/klst}]}{5,82 [J/T] \cdot 2,5 [T/s]} = 55 \text{ mínútur}$$

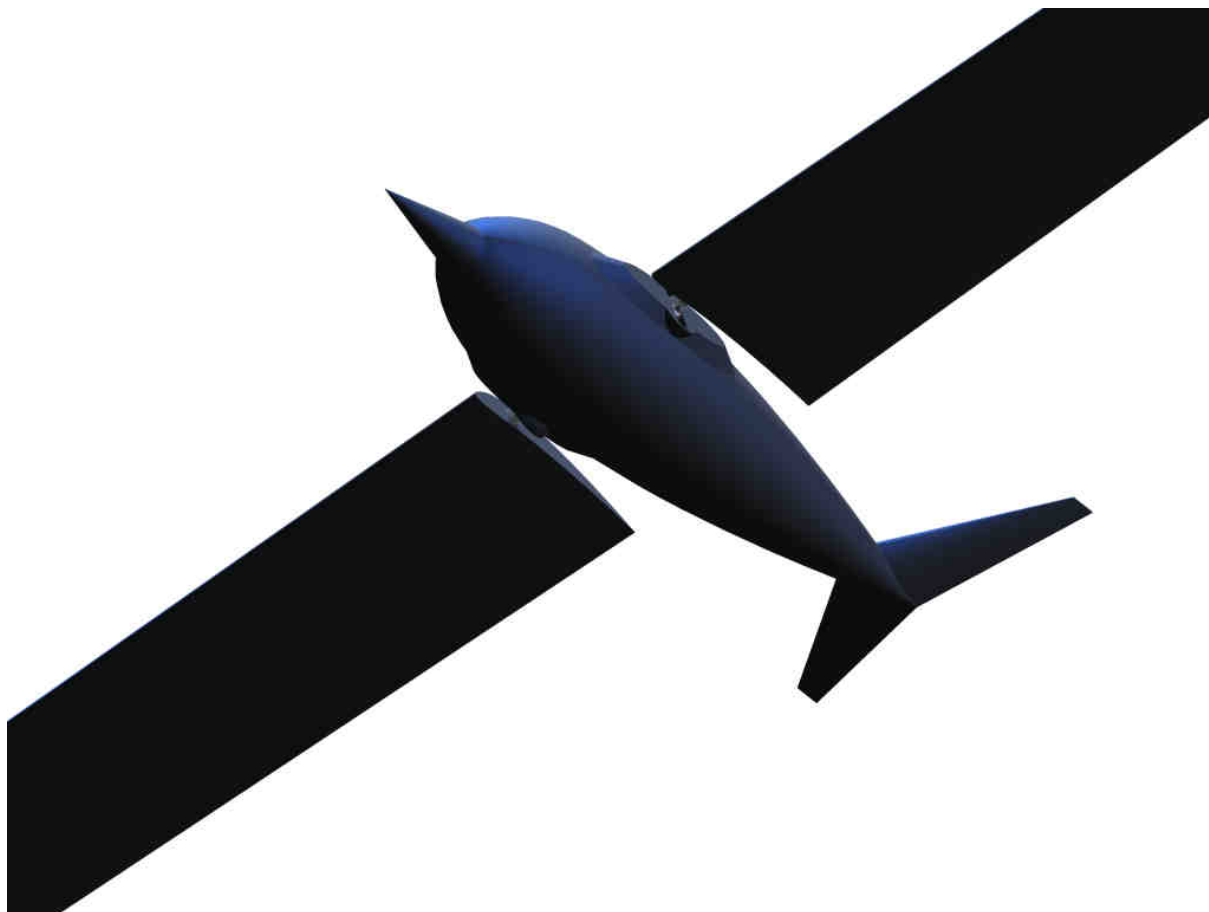
Hér er um algert hámarksgildi að ræða þar sem að ekki er gert ráð fyrir orkutöpum í aflkerfi og liðamótum. Hámarksorkuþörf aflkerfis hvors vængs reiknast 15 W. Þannig þyrfti hvort aflkerfi fyrir sig að geta dregið augnabílsstraum allt að 2,03 A án þess að yfirhitna. Við sjáum einnig að eftir að rafhlöðunni hefur verið komið fyrir eru einungis 235 grömm eftir til að smíða skrokk, festingar, skynjara, stýrikerfi auk mótorar og raflagna. Hönnun einstakra kerfa fuglsins með tilliti til hámarks leyfilegrar þyngdar einstakra hluta verður því afar verðugt og spennandi verkefni þegar þar að kemur.



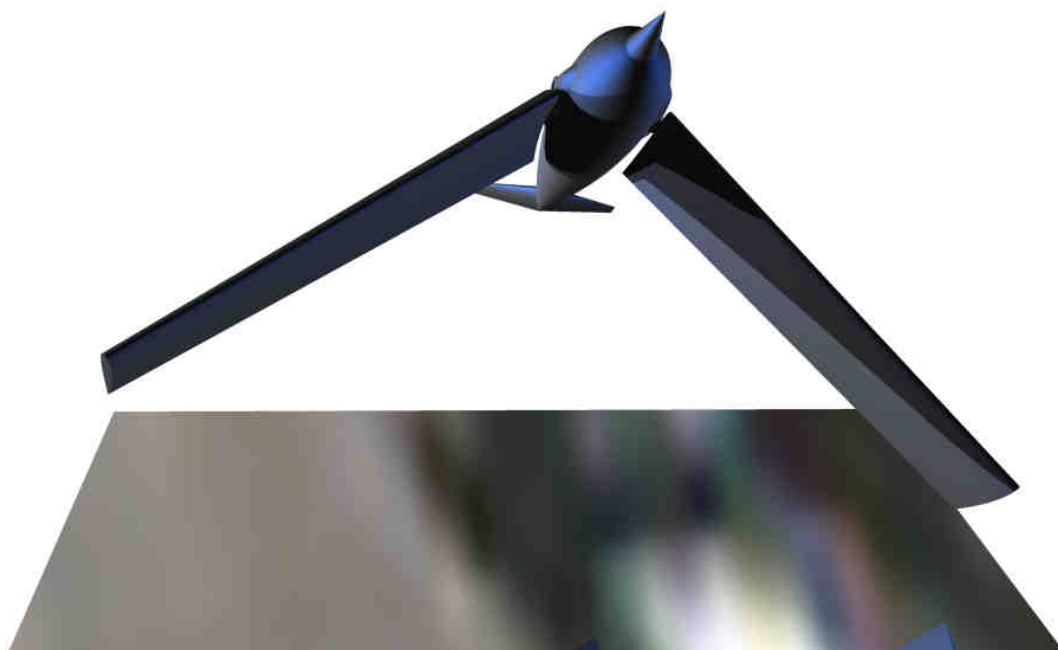
Mynd 172: Nærmynd af vélfugli á flugi.



Mynd 173: Vélfugl á flugi.



Mynd 174: Vélfugl í svifham rennir sér í lágflugi yfir myndatökumann.



Mynd 175: Vélfugl í flugtaki.

6 Samantekt helstu niðurstaða

Þróuð var aðferð til að útbúa vængi með hjálp frauðplastska og fullklára á tveimur sólarhringum. Til verksins var notast við sérstakt forrit sem útbúið var í Matlab. Forritið skilgreinir vængi út frá innlagsbreytum og skilar frá sér G - kóðaskrá. Skránni má svo á einfaldan hátt opna í ReplicatorG sem túlkar hana yfir í hreyfingar viðeigandi mótoru á frauðplastska. Þá var notast við sérstakt tveggja þátta epoxy plastefni sem víxlverkar ekki við frauðplastið til að yfirborðshúða vængina og steypa inn í þá festingar. Alls voru smíðaðir 28 vængir með þessari aðferð, 10 sem ætlaðir eru til mælinga á kyrrstæðum vængjum og 18 sem ætlaðir eru til mælinga á blakandi vængjum. Allir vængirnir liggja nú til reiðu fyrir frekari mælingar í vindgangarými Háskólans í Reykjavík.

Reynt var að koma heimasmiðaðri kraftvog í gagnið án árangurs. Talsverðum tíma var varið til þess að bilanagreina vogina, meðal annars með því að taka hana í sundur og mæla viðnámsgildi hvers togviðnáms fyrir sig. Í þeirri greiningu kom ekkert óeðlilegt í ljós, en þegar að vogin var sett saman og reynd aftur sýndi hún ítrekað mikla skekkju á þann veg að hún vanmetur þá þyngd sem á hana er sett. Þá er mæliupplausn hennar of gróf, en til þess að lagfæra það þarf helst að tengja hana við fullkomnari 16 bita gagnasafnara í stað þess sem hún er tengd við nú, sem er 12 bita. Til þess að koma voginni í gagnið hefði þurft að nota talsvert meiri tíma en þar sem að lítilega biluð kraftvog af gerðinni Delta IP68 fékkst að láni frá Teledyne Gavia Ehf var ákveðið að tímanum væri betur varið með því að notast við hana. Eftir smá lagfæringar fékkst hún til að virka rétt og notast var við hana í þeim tilraunum sem framkvæmdar voru.

Framlag höfunda til vindganganna fólst í því að mæla nákvæmlega meðalstreymishraða og vindflökt í 9 x 9 punkta hnitaneti, staðsettu í mælisniði sem er í vegalengdinni 60 cm frá inntaki í mæliklefa og framkvæma aðgerðir til leiðréttingar streymisgæða. Mælingarnar voru gerðar með CTA – vindhraðamæli, á tíðnibreytitíðnunum 10, 20 og 30 Hz. Þá voru fínmöskva stál-og koparnet fengin hjá Poulsen Ehf og þróuð aðferð til þess að nota mætti þau sem inntaksnet í því skyni að draga úr vindflökti í mælisniðinu. Kostnaður við þessa aðferð reiknaðist um 23% af kostnaði við að flytja inn og setja upp net sem eru sérhönnuð til notkunar í vindgöngum. Fyrst var sett upp eitt net og mælt. Kom þá í ljós umtalsverður bati á gæðum streymis en meðalumfang iðustreymis í nothæfa mælisniðinu lækkaði við það úr 8,85% niður í 5,57%. Var því ákveðið að setja upp tvö net til viðbótar. Við það lækkaði meðalumfangið enn meira eða niður í 2,62% miðað við tíðnibreytitíðnina 20 Hz. Lægst mældist meðalumfang iðustreymis 2,30% þegar tíðnibreytitíðnin var stillt sem 30 Hz. Notast var við færanleg vindgöng til að meta áhrif afstöðu inntaks stærri vindganganna við vegg vindgangarýmisins. Kom þá í ljós að verri niðurstaða, þ.e. meira umfang iðustreymis, mældist þegar inntaksflötur myndaði 30° horn við vegginn heldur en þegar inntaksflötur var samsíða vegg, með báðar hliðar inntaksins í sömu fjarlægð og sú hlið sem nær veggnum stóð þegar að göngunum var stillt upp undir horni.

Hannaður og smíðaður var búnaður til þess að framkvæma kraftmælingar á föstum og blakandi vængjum. Voru kraftmælingar á kyrrstæðum vængjum framkvæmdar miðað við þrjú mismunandi streymisástöndum, þar sem Reynoldstölurnar voru 35.000, 73.000 og 109.000. Niðurstöður mælinganna voru staðlaðar og settar fram í samræmi við hefðbundnar aðferðir loftaflsfræðinnar. Í ljós kom að með lækkandi Reynoldstölu minnkar hæfni vængjanna til myndunar lyftikrafts auk þess sem að ólínuleg hegðun kom frekar fram á lægri Reynoldstölum. Var það talið merki um áhrif frá tímaháðu streymi auk þess sem að mælióvissa varð meiri á eftir því sem að Reynoldstala lækkaði. Þá var nálguð hallatala þynnri vængsniða að jafnaði nær fræðilegu hámarksgildi en þykkari þó að munurinn hafi lækkað umtalsvert með aukinni Reynoldstölu.

Kraftmælingar á blakandi vængjum voru framkvæmdar á 16 mismunandi vængjum. Smíðað var sérstakt tæki sem sá um að blaka vængnum samkvæmt því sem næst hreinni sínussveiflu. Láréttir, lóðréttir og þverstæðir kraftar frá öllum vængsniðum voru mældir sem fall af tíma yfir 10 blaksveiflur

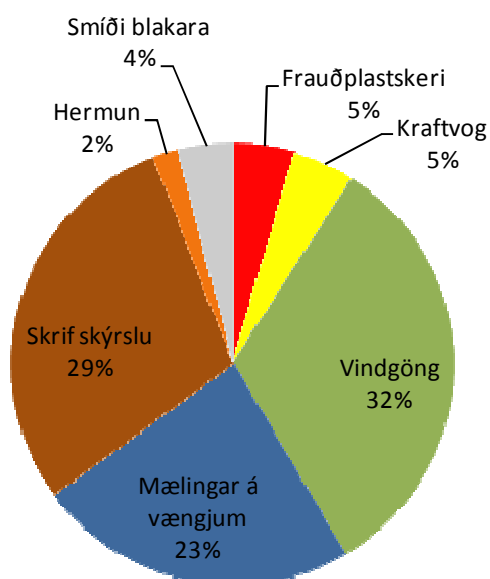
á þremur mismunandi blaktíðnum og þremur mismunandi blakútslögum. Þá voru allar mælingar gerðar fyrir flugtaksaðstæður (slökkt á vindgöngum) og á tíðnibreytitíðninni 30 Hz. Samsvarar sá vindhraði Reynoldstölunni 136.000. Í heildina voru því framkvæmdar mælingar við 288 mismunandi aðstæður. Ekki gafst nægilega mikill tími til að kryfja það gríðarlega gagnamagn sem safnaðist til mergjar en settar voru fram niðurstöður fyrir lítinn hluta gagnanna. Sveiflur í láréttum krafti skiptust aðallega niður á tvær tíðnir, þá sömu og blaktíðnina en einnig voru greinilegar sveiflur á tífaldri blaktíðninni, óháð því hver sú tíðni var hverju sinni. Var það í ósamræmi við væntar niðurstöður en sýnt var fram á það í kaflanum á undan að búast mætti við að sveiflur í láréttum krafti yrðu á tvöfaldri blaktíðninni. Aðrar merkilegar niðurstöður voru þær helstar að staðlaður meðalkraftur í lóðrétta stefnu ósamhverfra vængsniða, þ.e. þeirra vængja sem höfðu skilgreinda vængbungu, hélst sambærilegur við lyftikraftsstuðul kyrrstæðra vængja með skilgreinda vængbungu á engu áfallshorni. Sá meðalkraftstuðull jókst greinilega með aukinni vængbungu. Fyrir NACA0015, sem skoðaður var sérstaklega með tilliti til breytinga í lárétu og lóðrétu kraftútslagi með breytilegri blaktíðni og útslagi kom í ljós fyrir lárétta kraftstuðulinn að hann jókst með aukinni tíðni og útslagi að tíðni 2 en lækkaði með frá tíðni 2 til tíðni 3 fyrir útslag 1 og 2. Fyrir NACA(15)315 sem einnig var skoðaður komu þessi áhrif ekki fram, heldur jókst hann nokkuð jafnt fyrir bæði tíðni og útslag. Fyrir lóðrétta kraftstuðulinn kom í ljós eðlileg hegðun, þ.e. aukning fyrir bæði aukið útslag og aukna tíðni.

Út frá grunnhugtökum í straum-og loftaflsfræði var sett fram einfaldað reiknilíkan af vélfugli sem svo var borið saman við niðurstöður blakvængja tilraunarinnar. Reiknað var með niðurstöðum fyrir NACA0012 úr tilraun á kyrrstæðum vængjum til útreikninga láréttra og lóðréttra krafta fyrir reiknilíkanið og var það borið saman við niðurstöður fyrir NACA0015 úr blaktilrauninni á sömu blaktíðni. Í reiknilíkaninu var reiknað með raunmassa NACA0015 vængsins til ákvörðunar tregðukrafta. Í ljós kom góð samsvörun, lóðrétti krafturinn nálgadist mæligögn vel en lárétti krafturinn sýndi þá afbrigðilegu hegðun sem sagt var frá hér að ofan, þ.e. útslagið kom fram á sömu tíðni og blaktíðnin en ekki á tvöfaldri þeirri tíðni eins og búist var við. Kraftútslögín voru þó vel samanburðarhæf, það er kraftgildin voru á mjög sambærilegri stærðargráðu. Á grundvelli reiknilíkansins var svo sett fram eitt hönnunartilfelli, þar sem valdar voru streymisaðstæðurnar $Re = 109.000$ og vænghlutfalli var haldið því sama og í tilraun á kyrrstæðum vængsniðum, $AR = 6$. Fyrir hönnunarflughraðann 10 m/s við þessi skilyrði kom í ljós að líkanið áætlaði helstu stærðir fuglsins þannig að vænghaf hvors vængs skyldi verða 495 mm, skrokkþvermálið 100 mm, hönnunarmassi 426 grömm, þar af massi vængja samtals 85 grömm. Í túlkun niðurstaðanna var sýnt fram á að raunhæft gæti verið að smíða vængi af þessari stærð án þess að fara yfir leyfilega þyngd, með Li-Po rafhlöðu sem algeng er til nota í smá fjarstýrð farartæki væri fræðilega hægt að ná að hámarki 55 mínútna flugþoli og að heildarþyngd skrokks, festinga, stýri-og aflkerfis mætti að hámarki verða 203 grömm að þyngd. Inn í þeirri tölu var búið að draga þyngd rafhlöðu frá. Þá þyrfti aflkerfið að þola augnabliksstraum allt að 2,03 A og heildarsamsetningin þyrfti að þola allt að þreföldum þyngdarkrafti í hverri vængsláttarsveiflu vegna sveiflna í lóðréttum krafti. Jafnframt voru niðurstöðurnar notaðar til að teikna upp hugsanlegt útlit fuglsins í Autodesk Inventor.

6.1 Umræða og túlkun

Við vinnslu þessa verkefnis var skipting vinnutíma á vinnuliði skráð gróflega jafnóðum. Í heildina töldust vinnudagar 154 eða 77 vinnudagar á mann. Lengd vinnudaga var ekki skráð sérstaklega en þeir voru mjög mislangir, allt frá stuttum 6 tíma vinnudögum í upphafi verkefnis upp í langar, 16 tíma samfelldar setur við skrif í lokin. Þá er ekki tekið tillit til fjarveru einstaka daga, en ekki var mikið um slíkt þó að slys sem gerði annan höfunda óvinnufæran í nokkra daga hafi tekið sinn toll. Mynd 176 sýnir skiptinguna á myndriti. Undir vinnuliðnum vindgöng fellur öll vinna við hönnun og smíði inntaksneta og mælibúnaðar sem og vinna við mælingarnar sjálfar. Undir liðnum mælingar á vængjum fellur öll vinna tengd tilraununum, þar með talið hönnun, smíði og útfærsla mælibúnaðar auk útskurðar og yfirborðshúðunar sjálfra vængjanna. Hönnun og smíði blakarans er þó tilgreind sérstaklega, þar sem að áberandi mikill tími fór í hann.

Varðandi markmiðasetningu náðist að uppfylla flest þau markmið sem sett voru fram í upphafi með misjöfnum árangri þó. Þótt að dregið hafi umtalsvert úr umfangi iðustreymis í vindgöngunum er ennþá langt í land þar til að göngin verða orðin sambærileg við vindgöng sem að notuð eru til rannsókna víða erlendis. Til þess að vindgöng teljist starfhæf til þróunarrannsókna á farartækjum þarf umfang iðustreymis helst að vera innan við 1%. Fyrir rannsóknir á jaðarlögum og staðsetningu á skiptipunktum jaðarlaga þarf umfang iðustreymis að vera mun lægra eða ekki hærra en 0,05% (Barlow, Rae, & Pope, 1999). Miðað við þau 2,3 – 3,6 % sem að nú mælast í vindgöngunum er ljóst að grípa þarf til frekari aðgerða til að tempra vindflöktið. Þá voru það nokkur vonbrigði að ekki skyldi takast að gera heimasmiðuðu kraftvogina starfhæfa en þó nokkru þúðri var eytt til þess, eins og sjá má á myndritinu. Hvað varðar tilraunirnar sem framkvæmdar voru verður að viðurkennast að niðurstöður úr tilrauninni með blakandi vængi sýndu ekki alveg þá leytni sem vonast var til, sérstaklega hvað varðar kraftferla í lárétta stefnu sem fall af tíma. Einnig gafst einfaldlega ekki nægjanlegur tími til að yfirfara og greina öll gögn sem söfnuðust úr tilrauninni, en eflaust má með frekari skoðun hagnýta niðurstöðurnar enn betur en gert er í þessari skýrslu. Sé litið heildstætt yfir allt það sem að áorkaðist með verkefninu hlýtur afraksturinn að teljast nokkuð góður árangur, sérstaklega í ljósi þess að við upphaf verkefnisins var aðstaðan alveg ónotuð og engar aðferðir höfðu verið þróaðar til þess að framkvæma tilraunir líkar þeim sem framkvæmdar voru.



Mynd 176: Skipting vinnudaga á helstu vinnuliði.

6.2 Næstu skref.

Það er ljóst að spennandi tímar eru framundan á rannsóknarstofu fyrir ómönnuð farartæki. Með þeim búnaði sem búið er að smíða, setja upp og láta reyna á í verkefni þessu er mögulegt að framkvæma æ hnitmiðaðri og flóknari tilraunir samhliða framþróun og betur skilgreindum vandamálum sem varða hönnun vélfugls en gert var hér. Með því að bæta flæði vindganga enn frekar en gert var í þessu verkefni má jafnvel sjá fyrir sér að Háskólinn í Reykjavík geti boðið upp á rannsóknir og straum-og loftaflsfræðum sem eru vel sambærilegar við það sem gerist annars staðar. Hér á eftir fer upptalning á þeim verkefnum sem að höfundar telja brýnast að ganga í í framhaldi af þeirri vinnu sem lýst var í skýrslu þessari;

6.2.1 Vindgöng.

- Setja upp flæðiþeini, bæta við a.m.k. einu inntaksneti til viðbótar og athuga áhrif ofrisræmu á umfang iðustreymis.
- Koma fyrir fólkskum vegg fyrir framan inntak og samsíða því og kanna áhrif þess á umfang iðustreymis.
- Staðsetja þrýstinema við enda hvers hluta til þess að mögulegt sé að kanna þrýstítapstuðla og setja upp kennilínu fyrir göngin. Þá myndi slíkur nemi, staðsettur fyrir aftan inntaksnet geta gefið hugmynd um hvenær þörf er á að þrifa netin, en ryk og annað sem mögulega safnast fyrir í þeim veldur auknu þrýstifalli yfir þau.
- Setja upp færanlegan mælistand inn í mæliklefa sem að keyrður er áfram í x,y og z stefnur af rafmótorum samkvæmt forritanlegum skipunum frá notanda. Þannig væri til dæmis hægt að framkvæma vindhraðamælingar með CTA – mæli án þess að hafa mann inn í mæliklefanum sem að sér um að færa til mælistandinn milli mælinga.

6.2.2 Frauðplastskeri.

- Útbúa forrit svipað því og gert var í þessu verkefni þar sem mögulegt er að skilgreina önnur en NACA fjögurra stafa vængsnið. Þær tilraunir sem gerðar voru gefa tilefni til þess að kanna þynnri vængsnið en þau sem könnuð voru hér.

6.2.3 Kraftvog.

- Halda áfram með þróun heimasíðuðu vogarinnar. Jafnvel má sjá fyrir sér einfaldari vog sem mældi eingöngu krafta í lárétta og lóðrétta stefnu, en slík vog hefði til að mynda dugað til að framkvæma tilraunina sem gerð var á kyrrstæðum vængjum.

6.2.4 Frágangur vængja.

- Próa aðferð til að útbúa vængi sem eru fjaðrandi, en með þekktum fjaðurstuðli. Þannig mætti t.d. skera út vængi með ákveðna lögun og hluta þá niður og útbúa vængrif sem að væru síðan tengd saman með misþykkum plastræmum fyrir vængbita og finna svo sveigjanlegt efni til að strengja yfir vænginn til að fá yfirborðslögunina.

6.2.5 Blakari

- Auka hreyfigetu blakarans með því að gera honum kleyft að snúast sjálfvirk um þverás sinn, þ.e. bæta inn í hann fjöðrunarhreyfingunni eins og lýst var í kafla 5.10.10.

6.2.6 Vélfugl

- Halda áfram að þróa reiknilíkön fyrir kraftamyndun vængja með einni eða fleiri grunnhreyfingum. Sjá má fyrir sér líkön sem að sleppa þeim nálgunum sem gerðar voru á því einfaldaða líkani sem að sett var fram hér með heildunaraðferðum, þar sem hvert aðstæður á hverju vængsniði fyrir sig eru reiknaðar.
- Gera tilraunir við fleiri streymisaðstæður og mismunandi vænghlutföll og skapa þannig heilstæðan gagnagrunn sem nýta má í líkanagerð fyrir vélfugla.
- Framkvæma heilstæða þarfagreiningu á íhlutum sem nauðsynlegir eru í afl- og stýrikerfi vélfugls. Gera tilraun til bestunar slíks búnaðar með tilliti til þyngdar.

Eflaust má lengi halda áfram telja upp hugmyndir að verkefnum sem ráðast má í og tengjast þessum viðfangsefnum. Hvað hægt er að framkvæma er í raun einungis bundið við ímyndunarafl hvers og eins. Eitt er þó alveg ljóst, við eigum ennþá mikla vinnu framundan þar til markmiðið um alsjálfráðan vélfugl með mikla hreyfifærni verður að veruleika.

7 Heimildaskrá

- Abbott, I., & Von Doenhoff, A. (1959). *Theory of Wing Sections*. New York: Dover Publications.
- All About circuits. (2011, nóvember 19). Retrieved from http://www.allaboutcircuits.com/vol_1/chpt_9/7.html
- Anderson, R. (2009, Ágúst). *Covering materials*. Retrieved Desember 4, 2011, from Loudon Country Aeromodelers Association: http://www.lcaa.org/covering_material_properties.pdf
- ATI Industrial Automation. (2011, október 14). Retrieved from http://www.atia.com/products/ft/ft_models.aspx?id=Delta%20IP65/IP68
- Azuma, A. (2006). *The Biokinetics of Flying and Swimming*. Reston, Virginia: American Institute of Aeronautics and Astronautics.
- Barlow, J., Rae, W., & Pope, A. (1999). *Low Speed Wind Tunnel Testing*. New York: John Wiley & Sons.
- Bradshaw, P. (1996). The Understanding and Prediction of Turbulent Flow. *Engineering Foundation Conference on Turbulent Heat Transfer*. San Diego.
- Charmichael, B. (1982). *Low Reynolds Number Airfoil Survey*. Hampton, Virginia: National Aeronautics and Space Administration.
- Doebelin, E. (2004). *Measurement Systems, 5th edition*. New York: McGraw Hill.
- Drela, M. (2008, April 7). *XFOIL Subsonic Airfoil Development System*. Retrieved Desember 1, 2011, from Massachusetts Institute of Technology: http://web.mit.edu/drela/Public/web/xfoil/xfoil_doc.txt
- Drela, M. *XFOIL: An Analysis and Design System for Low Reynolds Number Airfoils*. Cambridge, Massachusetts: MIT Department of Aeronautics and Astronautics.
- Groth, J., & Johanson, A. (1988). *Turbulence reduction by screens*. Stockholm: Royal Institute of Technology.
- Houghton, E., & Carpenter, P. (2003). *Aerodynamics for Engineering Students*. Oxford: Elsevier Science.
- Incropera, F., DeWitt, D., Bergman, T., & Lavine, A. (2007). *Introduction to Heat Transfer*. Hoboken, NJ: John Wiley and Sons.
- Jacobs, E. N., Ward, K. E., & Pinkerton, R. M. (1933). *The Characteristics of 78 Related Airfoil Sections from Tests in the Variable-Density Wind Tunnel*. Washington: Langley Memorial Aeronautical Laboratory.
- Leifur Þór Leifsson. (2011, Ágúst). Retrieved Desember 6, 2011, from Rannsóknarstofa fyrir ómönnuð farartæki: <http://luv.ru.is>
- Logan, E. (1993). *Turbomachinery*. New York: Marcel Dekker.

Manshadi, D. (2009). *A New Approach for Turbulence Reduction in a Subsonic Wind Tunnel*. Tehran: Sharif University of Technology.

Manshadi, D., Tamadonfar, P., Soltani, M. R., Ghorbanian, K., & Masdari, M. (2008). Power Spectrum and FFT-Based Signal Analysis in Turbulence Measurements. *World Academy of Science, Engineering and Technology* 40 , 275-279.

Mueller, T. J. (2001). *Fixed and Flapping Wing Aerodynamics for Micro Air Vehicle Applications*. Reston, Virginia: American Institute of Aeronautics and Astronautics.

Pennycuick, C. (2008). *Modelling the Flying Bird*. London: Elsevier.

Prandtl, L. (1933). Attaining a steady stream in wind tunnels. Washington: National Advisory Committee for Aeronautics.

Rayner, J. (2001). Thrust and Drag in Flying Birds: Applications to Birdlike Micro Air Vehicles. In T. J. Mueller, *Fixed and Flapping Wing Aerodynamics for Micro Air Vehicle Applications* (pp. 217-230). Reston, Virginia: American Institute of Aeronautics and Astronautics.

Shevell, R. S. (1989). *Fundamentals of Flight*. New Jersey: Prentice-Hall Inc.

Shyy, W., Yongsheng, L., Jian, T., Viieru, D., & Liu, H. (2008). *Aerodynamics of Low Reynolds Number Flyers*. New York: Cambridge University Press.

Soltani, M., Ghorbanian, K., & Manshadi, M. (2010). *Applications of Screens and Trips in Enhancement of Flow Characteristics in Subsonic Wind Tunnels*. Tehran: Sharif University of Technology.

Spedding, G., & McArthur, J. (2010). Span Efficiencies of Wings at Low Reynolds Numbers. *Journal of Aircraft* 47 , 120-128.

Tervning, N. (1991). *Aerodynamics for airline pilots*. Copenhagen: Munksgaard/Rosinante/SAS flight academy.

Torres, G., & Mueller, T. (2001). Aerodynamic Characteristics of Low Aspect Ratio Wings at Low Reynolds Numbers. In T. J. Mueller, *Fixed and Flapping Wing Aerodynamics for Micro Air Vehicle Applications* (pp. 115-141). Reston, Virginia: American Institution of Aeronautics and Astronautics.

White, F. M. (1992). *Viscous Fluid Flow, 2nd ed.* New York: McGraw-Hill.

Young, H., & Freedman, R. (2008). *University Physics*. San Fransisco: Pearson Education.

8 Viðaukar

8.1 Viðaukaskrá:

Viðauki A: Smíðateikningar

Viðauki B1: Matlab kóði fyrir frauðplastschera

Viðauki B2: Matlab kóði fyrir reiknilíkan vélfugls

Viðauki C: Fleiri gröf fyrir óvissumörk kraftmælinga á kyrrstæðum vængjum

Viðauki D: Fleiri gröf fyrir kraftmælingar á kyrrstæðum vængjum.

Viðauki E: Fleiri gröf fyrir kraftmælingar á blakandi vængjum

Viðauki F: Fleiri gröf fyrir vindflöchtsmerki í tíma og tíðnirúmi

Viðauki G:Leiðbeiningar til keyrslu vængsniðahermiforrítsins XFOIL

Viðauki H: Viðbót við ReplicatorGfyrir frauðplastschera.

Viðauki A: Smíðateikningar

Viðauki B1: Matlab kóði fyrir frauðplastschera

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%
% Tveggja NACAmpptt prófíla-reiknir sem táknbreytir ferlum yfir
%
% í G-kóða fyrir frauðplastskera sem staðsettur er í vindgangarými
%
% Háskólans í Reykjavík.
%
%
%
% Innlagsbreytur: m, p, t, c, b, TEo, TEv, inc, n, filename
%
% Hver innlagsbreyta fyrir sig er útskýrð þar sem hún kemur fyrir í
%
% kóðanum
%
%
%
% Úttaksbreyta: G-kóði sem skrifaður er í skránnu 'filename.gcode'
%
%
%
% Höfundur: Kristján Orri Magnússon, Háskólinn í Reykjavík, Hausti 2011
%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%

```

```
clear all
```

```

% Nafn úttaksskráar. Endingin skal vera .gcode.
filename=['C:\Users\Notandi\Desktop\NACA0015test.gcode']
%One digit max camber as % of chord, m2 er prófíllinn sem að A-B plan
%frauðplastskerans teiknar og m er fyrir X-Y planið.
m=0
m2=0
%One digit describing the distance of maximum camber from the airfoil
%leading edge in tens of percents of the chord. p->X-Y plan, p2->A-B plan
p=0
p2=0
%Two digits describing maximum thickness of the airfoil as percent of the
%chord. t-> X-Y plan, t2-> A-B plan
t=15
t2=15
%chord length (mm). c ->X-Y plan c2->A-B plan
c=130
c2=130
% Span length(mm). Vænghaf vængs sem skera á út.
b=500
%T/E horizontal offset (mm). Lárétt hliðrun trailing edge milli prófíla í
%XY og AB vængsniðum.
TEo=10
%T/E vertical offset (mm). Lóðrétt hliðrun trailing edge milli prófíla í
%XY og AB vængsniðum.
TEv=30
%Incline(rad). Vindingur, horn milli vænglína sitt hvors prófíls.
inc=20*pi/180
%number of points (80 is minimum for L/E precision)
n=80

```

```

%Total span (mm). Hornrétt vegalengd milli XY og AB plana, fasti.
tsp=935
%Scale up for shorter than tsp wings
inc=inc*tsp/b;
c2=c-(c-c2)*tsp/b;
TEo=TEo*tsp/b;
TEv=TEv*tsp/b;
%scaling for machine units
c=c*8.889;
c2=c2*8.889;
TEo=TEo*8.889;
TEv=TEv*8.889;
%dx þarf að ganga upp í c til að loka prófílnum
dx=c/n;
dx2=c2/n;
%Scaling for equations
m=m/100;
m2=m2/100;
p=p/10;
p2=p2/10;
t=t/100;
t2=t2/100;
x=0:dx:c; %Lárétt staðsetning miðað við vænglínu í XY plani
x2=0:dx2:c2;%Lóðrétt staðsetning miðað við vænglínu í XY plani
%symmetrical airfoil generator
yt=(t*c/0.2).*(0.2969.*(x./c).^0.5-0.1281.*(x./c)-
0.3516.*(x./c).^2+0.2843.*(x./c).^3-0.1015.*(x./c).^4);
yt2=(t2*c2/0.2).*(0.2969.*(x2./c2).^0.5-0.1281.*(x2./c2)-
0.3516.*(x2./c2).^2+0.2843.*(x2./c2).^3-0.1015.*(x2./c2).^4);
%camber line 1 (XY plan)
for i=1:length(x)
if x(i)<p*c
yc(i)=m.*(x(i)./p^2).*(2*p-x(i)./c)
else
yc(i)=m.*(c-x(i))./(1-p)^2.*(1+x(i)./c-2*p);
end
end
th(1)=1;
for i=2:length(x)
th(i)=atan((yc(i)-yc(i-1))/dx); %Snertilhorn camber line (XY)
end
%camber line 2 (AB plan)
for i=1:length(x2)
if x2(i)<p2*c2
yc2(i)=m2.*(x2(i)./p2^2).*(2*p2-x2(i)./c2);
else
yc2(i)=m2.*(c2-x2(i))./(1-p2)^2.*(1+x2(i)./c2-2*p2);
end
end
th2(1)=1;
for i=2:length(x2)
th2(i)=atan((yc2(i)-yc2(i-1))/dx); %Snertilhorn camber line (AB)
end
%points for profile 1 (XY)
xu=x-yt.*sin(th); % X upper
xl=x+yt.*sin(th); % X lower
yu=yc+yt.*cos(th); % Y upper
yl=yc-yt.*cos(th); % Y lower
xu=fliplr(xu); %Snúið við til að fá samfella hreyfingu yfir prófílinn
yu=fliplr(yu);

```

```

%points for profile 2 (AB)
xu2=x2-yt2.*sin(th2)+100000; %A upper (án vindinga)
xl2=x2+yt2.*sin(th2)+100000; %A lower (án vindinga)
yu2=yc2+yt2.*cos(th2); %B upper
yl2=yc2-yt2.*cos(th2); %B lower
fu=atan(yu2./xu2); %Vænglínu AB prófíls snúið um hornið inc
fl=atan(yl2./xl2);
yu2=xu2.*sin(fu+inc)-100000*sin(inc);
yl2=xl2.*sin(fl+inc)-100000*sin(inc);
xu2=xu2.*cos(fu+inc)-100000*cos(inc);
xl2=xl2.*cos(fl+inc)-100000*cos(inc);
yu2=yu2-yu2(end)+TEv; %Hliðrun A upper í lárétta stefnu
yl2=yl2-yl2(end)+TEv; %Hliðrun A lower í lárétta stefnu
xu2=xu2+c-xu2(end)-TEo; %Hliðrun B upper í lóðrétta stefnu
xl2=xl2+c-xl2(end)-TEo; %Hliðrun B lower í lóðrétta stefnu
xu2=fliplr(xu2); %Snúið við til að fá samfella hreyfingu yfir prófílinn
yu2=fliplr(yu2);

%Wing plotted in 3D for visualization
z11=zeros(length(xu))
z12=zeros(length(xl))
z21=zeros(length(xu2))
z22=zeros(length(xl2))
z21=z21+tsp*8.889
z22=z22+tsp*8.889
figure(1)
hold on
plot3(xu,yu,z11,'r',xl,yl,z12,'r')
plot3(xu2,yu2,z21,'r',xl2,yl2,z22,'r')
for i=1:10:length(xu)
    plot3([xu(i) xu2(i)],[yu(i) yu2(i)],[z11(i) z21(i)])
    plot3([xl(i) xl2(i)],[yl(i) yl2(i)],[z11(i) z21(i)])
end
axis equal
%grid on
hold off

% GCODE táknbreytir -> breytir línuvígum í færslulínur G-kóða.
% Fyrst er vígum breytt úr staðsetningarvígum yfir í færsvígur
for i=1:n
    xx(i)=xu(i+1)-xu(i);
    yy(i)=yu(i+1)-yu(i);

    xx(i+length(x))=xl(i+1)-xl(i);
    yy(i+length(x))=yl(i+1)-yl(i);
end

for i=1:n
    aa(i)=xu2(i+1)-xu2(i);
    bb(i)=-1*(yu2(i+1)-yu2(i));

    aa(i+length(x2))=xl2(i+1)-xl2(i);
    bb(i+length(x2))=-1*(yl2(i+1)-yl2(i));
end

%Svo er skráin opnuð
fid=fopen(filename,'wt');
%Og g-kóðinn skrifaður í hana

```

```
fprintf(fid,['G1 A' num2str(-TEo) ' B' num2str(-TEv) ' F3500\n'])
%Hliðrun
for i=1: 2*n+1
    fprintf(fid,['G1 X' num2str(xx(i)) ' Y' num2str(yy(i)) ' F4000\n']);
    fprintf(fid,['G1 A' num2str(aa(i)) ' B' num2str(bb(i)) ' F4000\n']);
end
```


Viðauki B2: Matlab kóði fyrir reiknilíkan vélfugls.

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Líkan af vélfugli sem nýtir blak-og fjöðrunarhreyfingar
% Höfundur: Kristján Orrí Magnússon, Háskólinn í Reykjavík, Hausti 2011
%
%
%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
clear all

%Streymisskilyrði
v=10 %Hönnunarahraði
ro=1.204 %Eðlismassi lofta við hönnunarskilyrði
vi=1.52*10^-5 %Kvikseigja lofta við hönnunarskilyrði
Re=109000 %Hönnunar Reynoldstala

q=0.5*ro*v^2 %Heyfiþrýsingur (dynamic pressure)
c=vi*Re/v %Vænglínulengd

%Vængur
AR=3.033 %Vænghlutfall annars vængsins
b=AR*c %Breidd annars vængsins
A=40*pi/180 %Hámarksblakútslag
f=2.5 %Blaktíðni [Hz]

%Innri vængur (NACA8412)

%alpha fyrir max L/D
a_max=5.8
%lift
CLinnri=0.48 %stuðull við a=0°
dCLDAinnri=3.49*pi/180
%drag
cd0innri=0.07
finnri=1/1783
Sinnri=b/2*b/AR
Dinnri=cd0innri*q*Sinnri+finnri*a_max^2

%Ytri vængur (NACA0012)
%lift
dCLdaytri=3.71*pi/180 %per radian - per gráða
a_best=13 %gráður - best til að búa til stóran L vektor
%drag
cd0ytri=0.04
fytri=1/1720
Sytri=Sinnri

%Skrokkur
d=0.1 %Þvermál skrokks
Sb=pi*d^2/4 %Þverskurðarflatarmál skrokks
Db=q*Sb*0.1 %Viðnámskraftur frá skrokki
h=0.2 %Hlutfall massa vængja af hönnunarmassa

%tímavektor
x=0:1/f/100:1/f;
a=atan((A*f*2*pi*sin(2*pi*f.*x)*0.75*b)./v).*180./pi %Áfallshorn ytri
vængs sem fall af tíma í gegnum eina blaksveiflu
g=atan((A*f*2*pi*sin(2*pi*f.*x)*0.75*b)./v).*180./pi-
a_best*sign(sin(2*pi*f.*x)) %Fjöðrunarhorn sem fall af tíma í gegnum eina
blaksveiflu

```

```

for i=1:length(x)
    if abs(a(i))>a_best
        a(i)=(a(i)/abs(a(i)))*a_best
    end
    if sin(2*pi*f*x(i))*g(i)<=0
        g(i)=0
    end
end

%lárétt kraftamál
T = q*Sytri*(dCLdaytri.*abs(a).*sin(abs(g+a)*pi/180)-
(cd0ytri+fytri.*a.^2).*cos(abs(g+a)*pi/180)) %Fx

%Atlög
Jt=sum((1/f/100).*(2*T) %Summa af Tdt - 2 fyrir tvo vængi
JDb=1/f*Db %Yfir eina lotu
JDinnri=2*1/f*Dinnri %Yfir eina lotu - 2 fyrir tvo vængi
JTotal=Jt-JDb-JDinnri %Summa atлага: Á að vera jafnt og 0 fyrir flug á
stöðugum hraða í stöðugri hæð

%Lóðrétt kraftamál
%
% Sveiflur í lóðréttum krafti (ytri) - Stöðugur
lóðr(innri)
Fy = q*(Sytri*(dCLdaytri.*a.*cosd(g+a)-
(cd0ytri+fytri.*a.^2).*sind(g+a))+Sinnri*(CLinnri+dCLDAinnri*a_max) )
m=mean(2.*Fy)/9.81
mv=h/2*m %massi eins vængs

%Tregðukraftur
Ft=(8/3)*A*b*f^2*mv*pi^2*cos(2*f*pi.*x)

%Heildar lóðrétturkraftur
Ftot=2.*Fy+2.*Ft

%Aflþörf
Py=A.*f.*2.*pi.*sin(2.*pi.*f.*x).*0.75.*b.*(q.*Sytri.*(dCLdaytri.*a.*cosd
(g+a)-(cd0ytri+fytri.*a.^2).*sind(g+a))+Ft)
Px=v.*T
for i=1:length(x);
    if Py(i)<0;
        Py(i)=0;
    end
    if Px(i)<0;
        Px(i)=0;
    end
end
Ptot=Px+Py;

Work=sum(Ptot.*(1/f/100));
Pmean=Work/(1/f);

figure(1)
plot(x,T,x,-ones(length(x),1).*Db,x,-ones(length(x),1).*Dinnri)
axis([0 1/f -0.5 0.6])
grid on
xlabel('t [s]')
ylabel('F [N]')
legend('2*T(t)', 'D_b', 'D_{innri}')
title(['Atlagsjafnvægi (á að vera 0): ' num2str(JTotal) ' kgs/m.'])

```

```

figure(2)
plot(x,a)
xlim([0 1/f])
grid on
xlabel('t [s]')
ylabel('\alpha [°]')

figure(3)
plot(x,g)
xlim([0 1/f])
grid on
xlabel('t [s]')
ylabel('\gamma [°]')

figure(4)
plot(x,2.*Fy,x,ones(length(x),1).*mean(Fy),'--')
xlim([0 1/f])
grid on
xlabel('t [s]')
ylabel('F [N]')
title(['Hönnunarmassi:' num2str(m) ' kg'])
legend('2*F_Y(t)', 'F_{Ymeðal}')

figure(5)
plot(x,2.*Ft,x,2.*Fy) %x,ones(length(x),1).*mean(Fy),'--')
xlim([0 1/f])
grid on
xlabel('t [s]')
ylabel('F [N]')
title(['Hönnunarmassi:' num2str(m) ' kg. Vængmassi:' num2str(h*m) ' kg'])
legend('2*F_t(t)', '2*F_Y(t)')

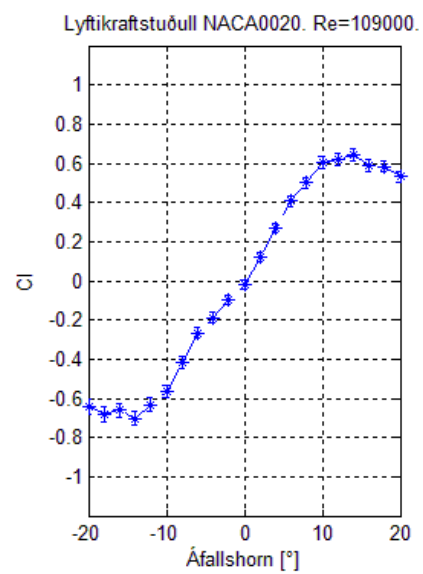
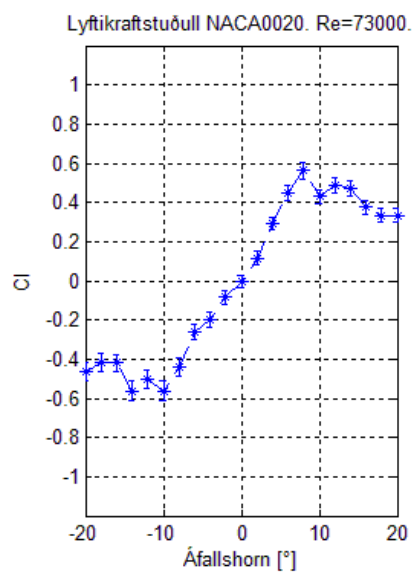
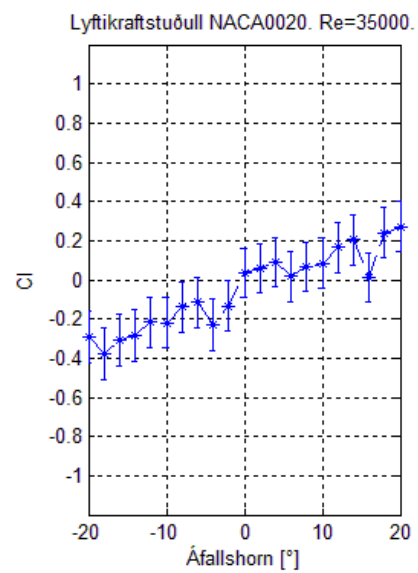
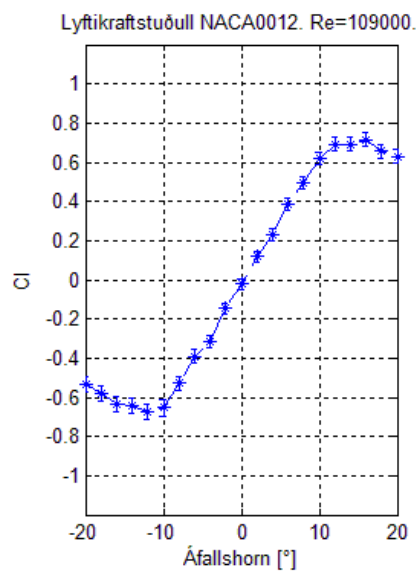
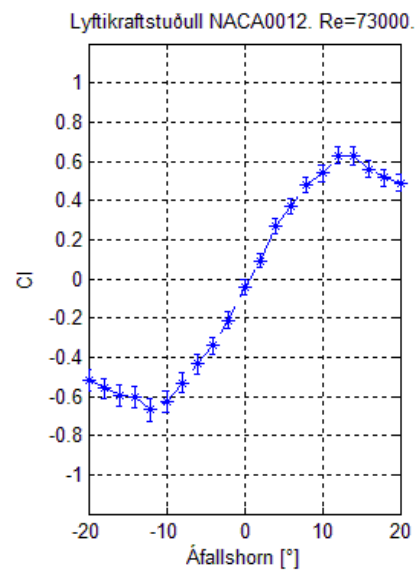
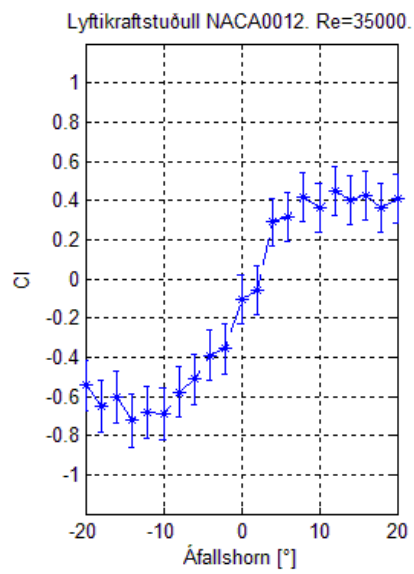
figure(6)
plot(x,Ftot,x,ones(length(x),1).*mean(2*Fy),'--')
xlim([0 1/f])
grid on
xlabel('t [s]')
ylabel('F [N]')
legend('F_{heild}', 'F_{Ymeðal}')

figure(7)
plot(x,2.*Px,x,2.*Py,x,2.*Ptot)
xlim([0 1/f])
grid on
xlabel('t [s]')
ylabel('P [W]')
legend('P_X', 'P_Y', 'P_{heild}')
title(['Vinna í einni lotu:' num2str(2*Work) ' J. Meðalafþörf:'
num2str(2*Pmean) ' W. Hámarksafþörf:' num2str(max(2*Ptot)) ' W.'])

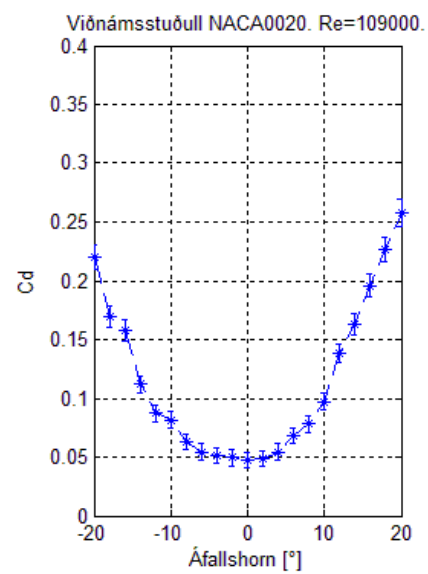
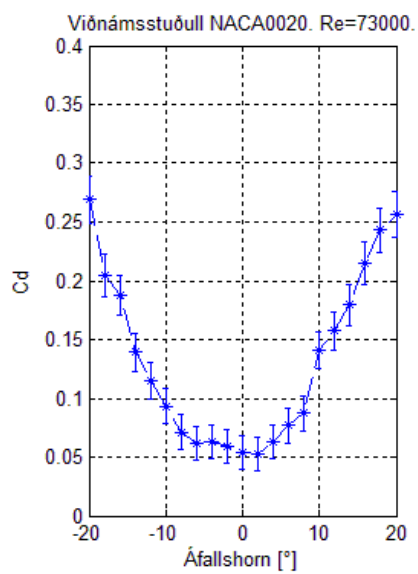
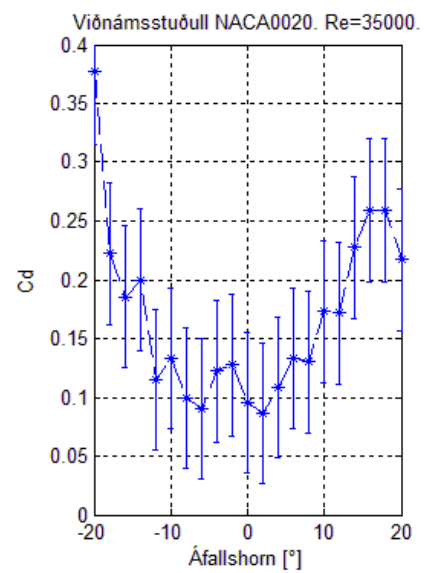
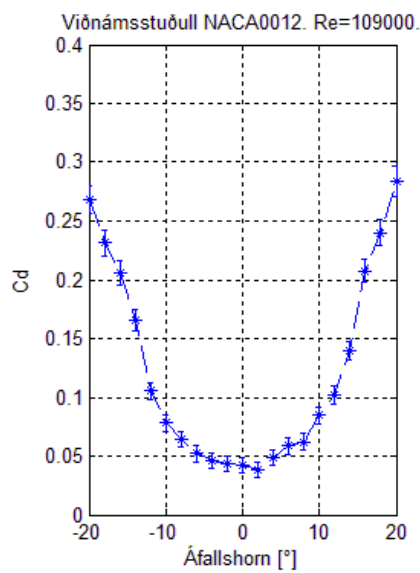
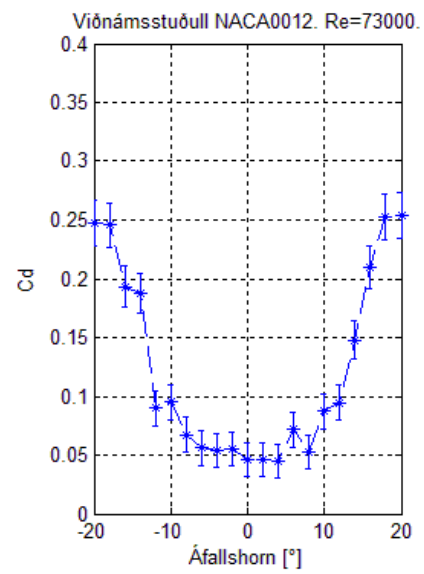
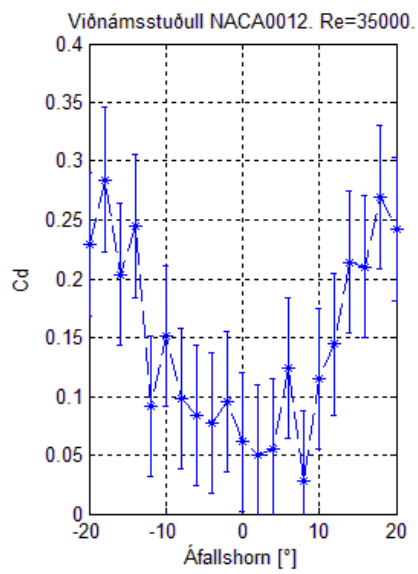
```

Viðauki C: Fleiri gröf fyrir óvissumörk
kraftmælinga á kyrrstæðum vængjum.

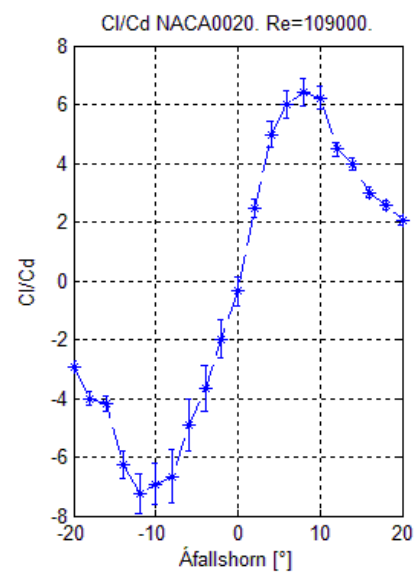
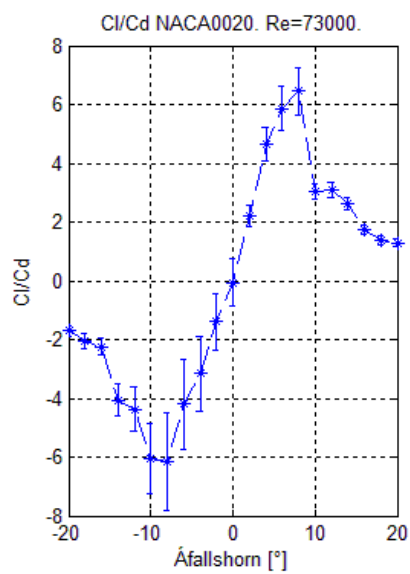
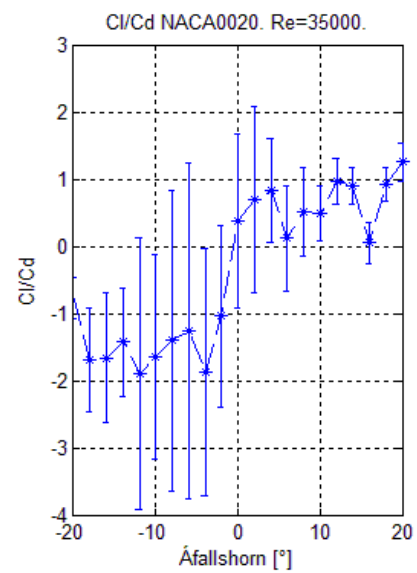
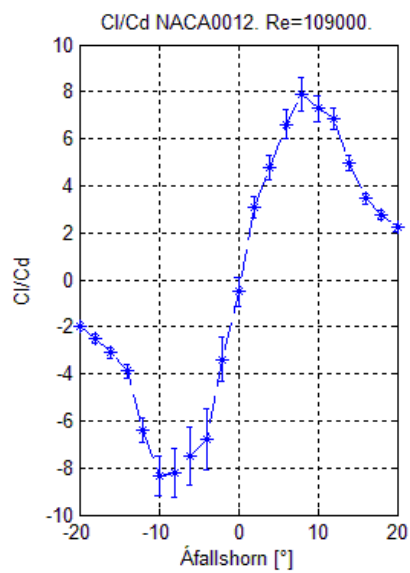
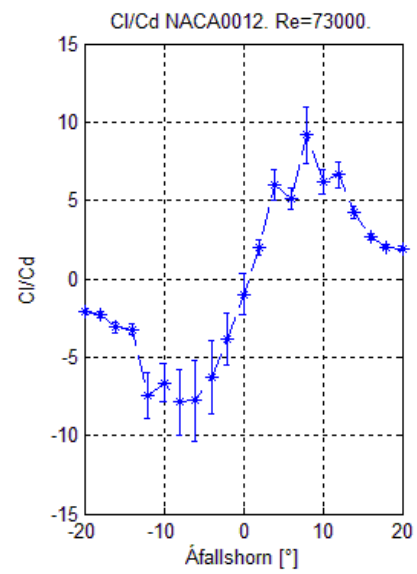
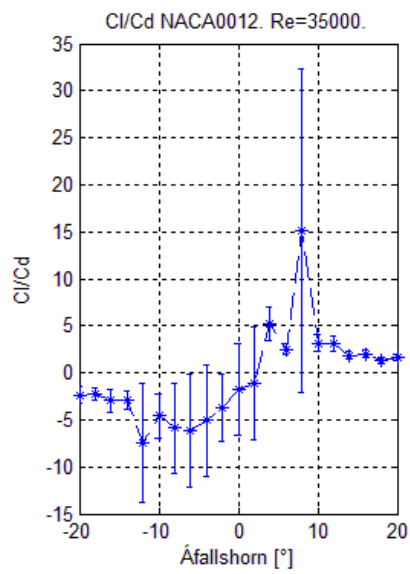
Cl fyrir NACA 0012 og 0020 með óvissumörkum



Cd fyrir NACA 0012 og 0020 með óvissumörkum

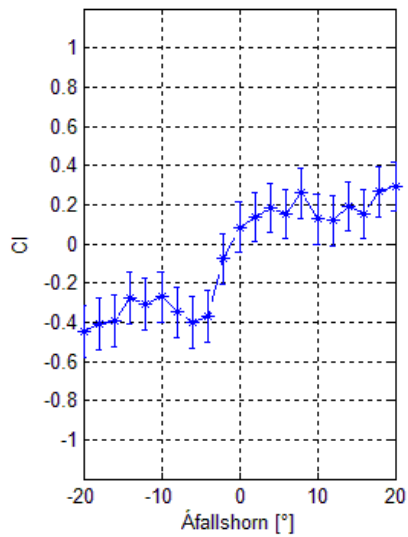


Cl/Cd fyrir NACA 0012 og 0020 með óvissumörkum

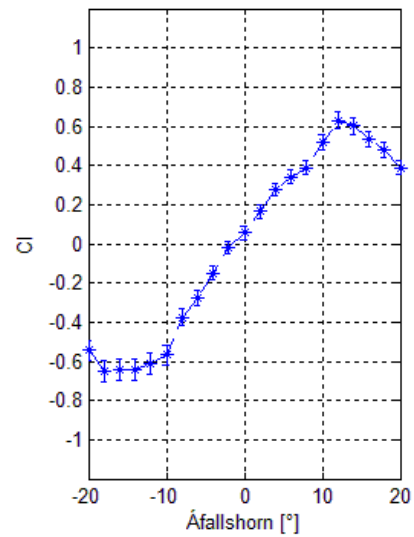


CL og Cd fyrir NACA 0020 án plasthúðar með óvissumörkum

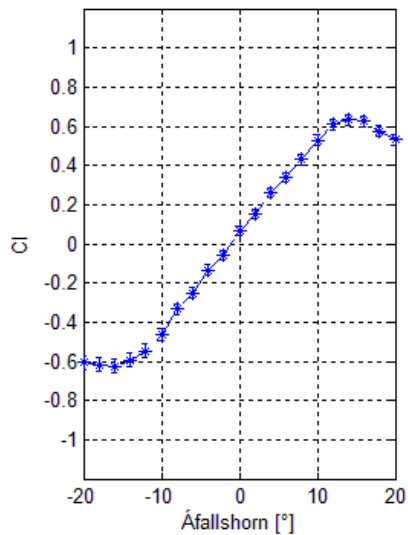
Lyftikraftstuðull NACA0020 án plasthúðar. $Re=35$



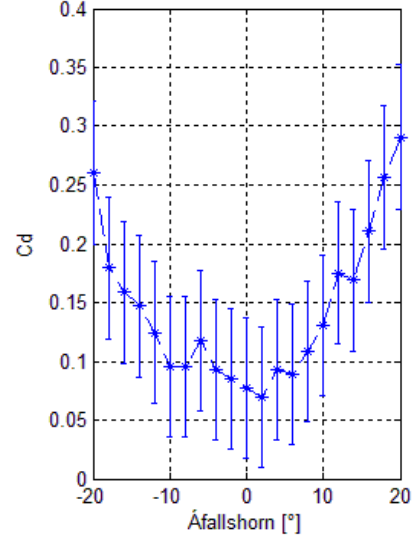
Lyftikraftstuðull NACA0020 án plasthúðar. $Re=73$



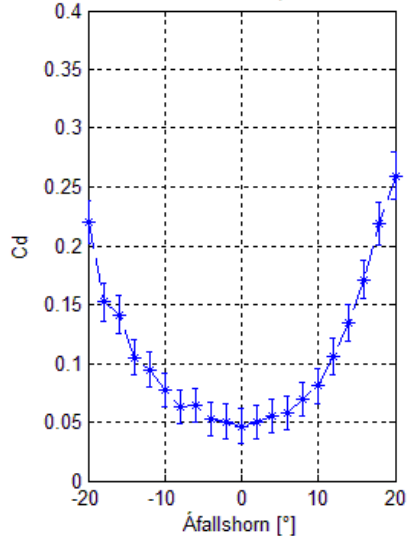
Lyftikraftstuðull NACA0020 án plasthúðar. $Re=109$



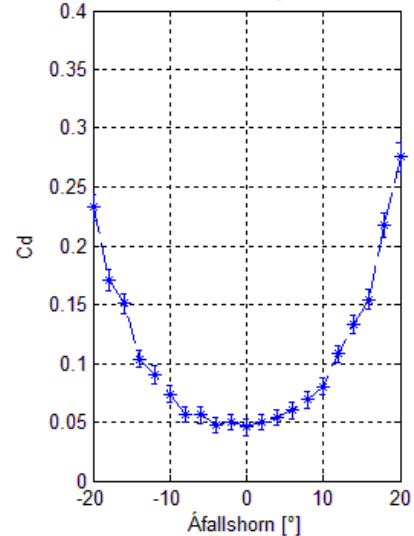
Viðnámsstuðull NACA0020 án plasthúðar. $Re=35$



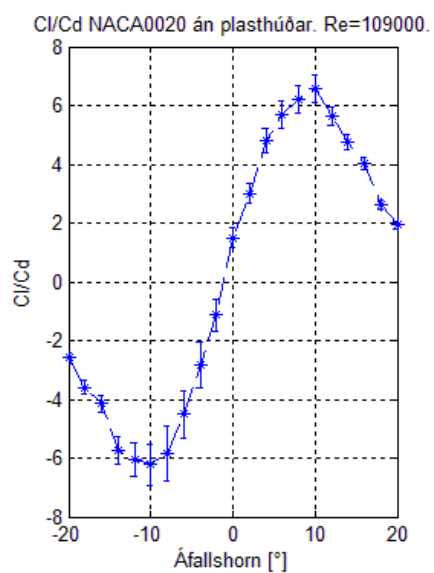
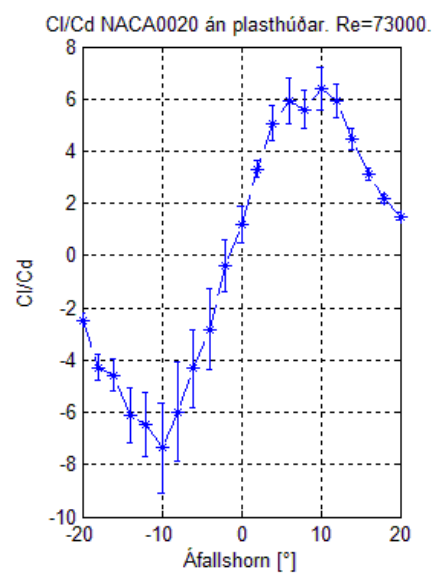
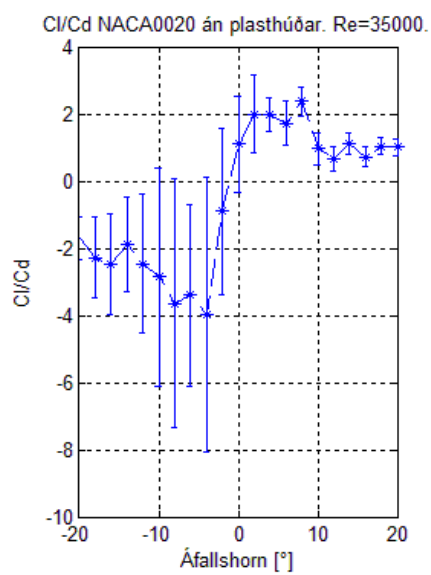
Viðnámsstuðull NACA0020 án plasthúðar. $Re=73$



Viðnámsstuðull NACA0020 án plasthúðar. $Re=109$

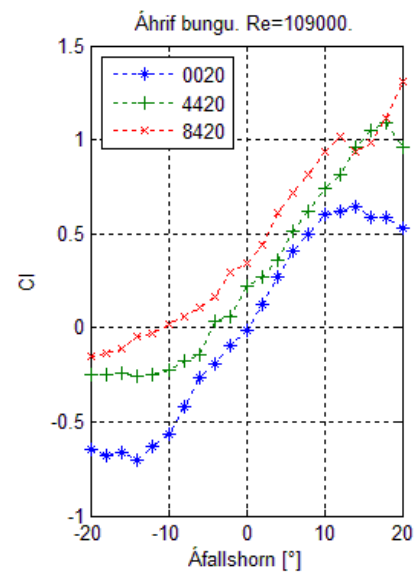
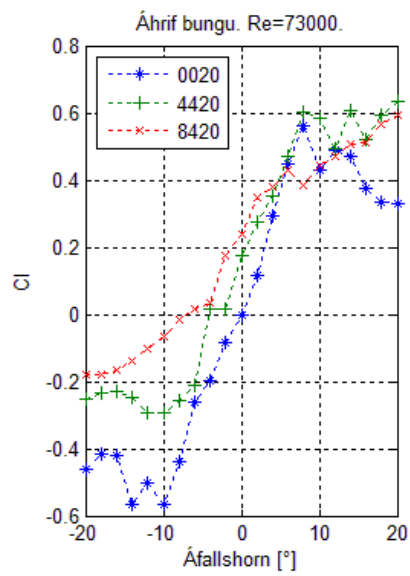
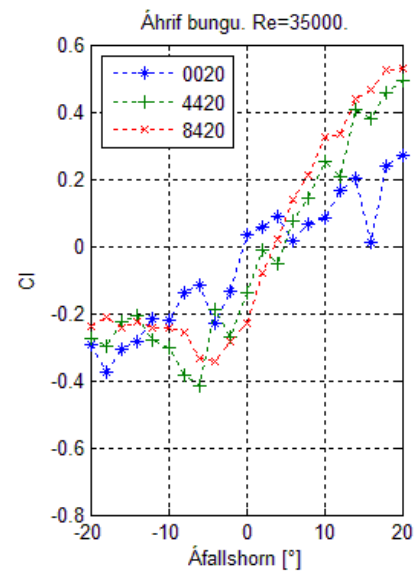
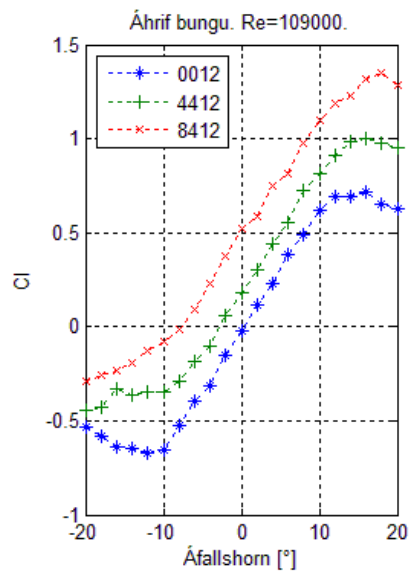
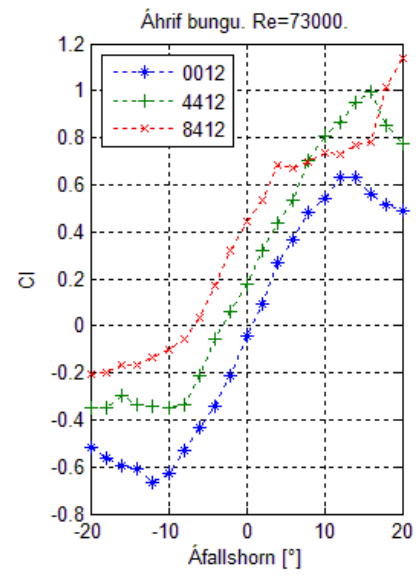
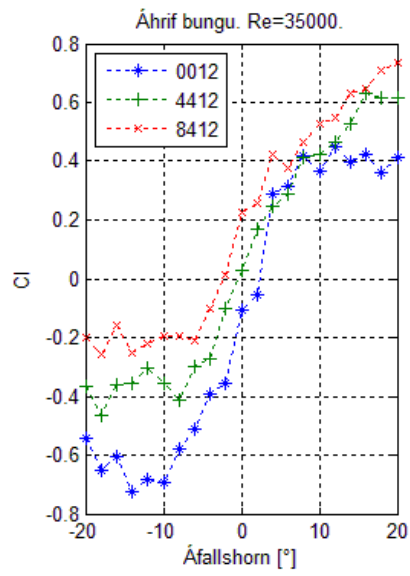


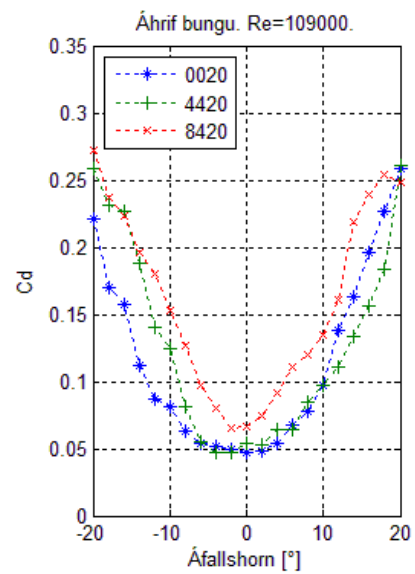
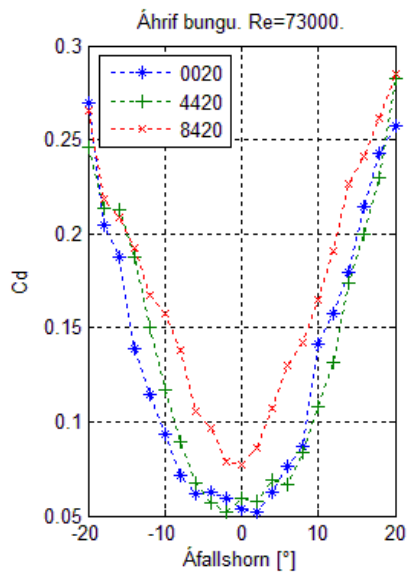
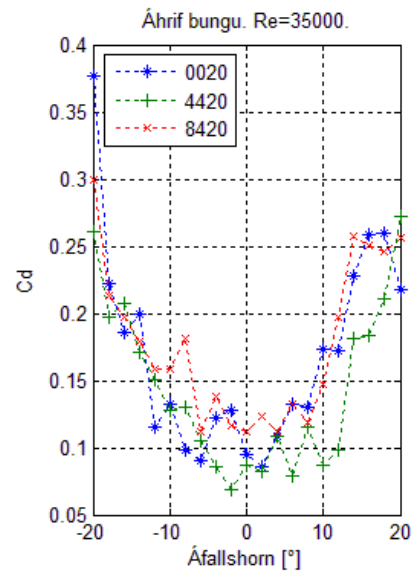
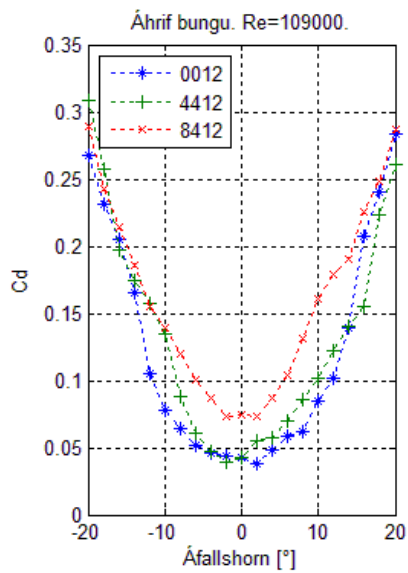
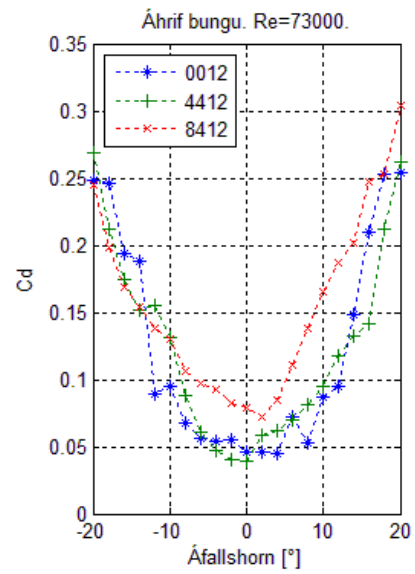
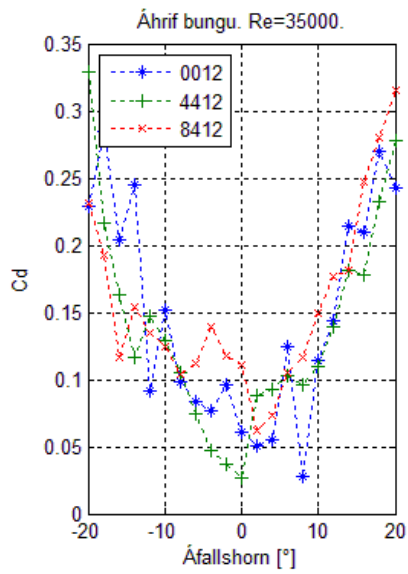
Cl/Cd fyrir NACA 0020 án plasthúðar með óvissumörkum

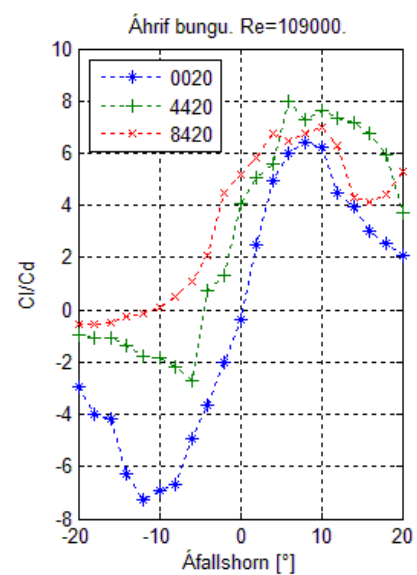
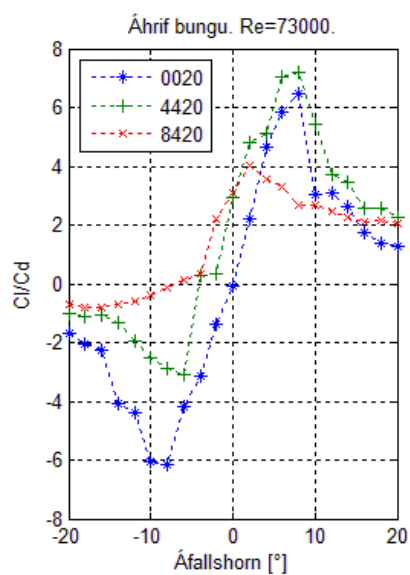
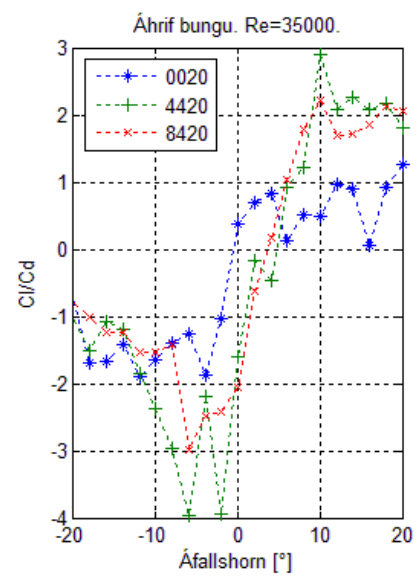
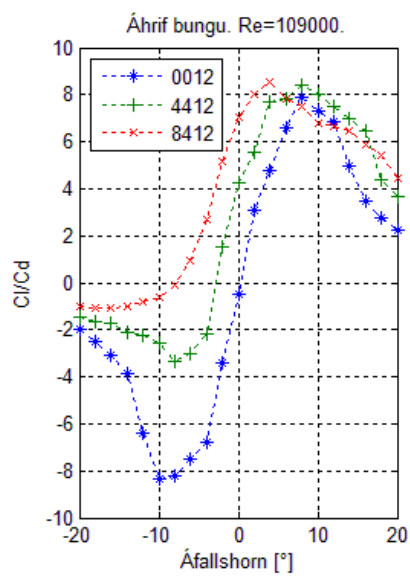
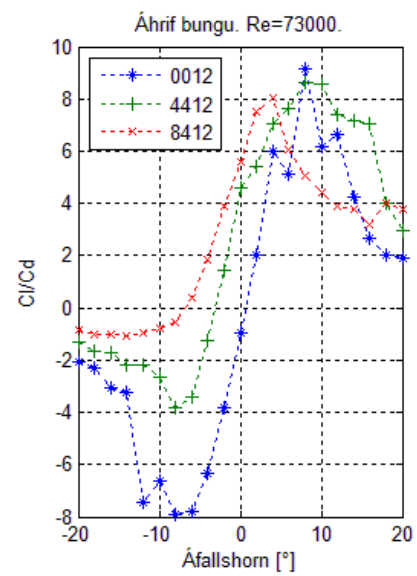
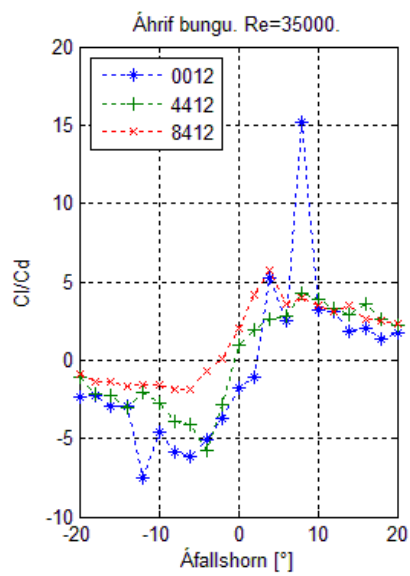


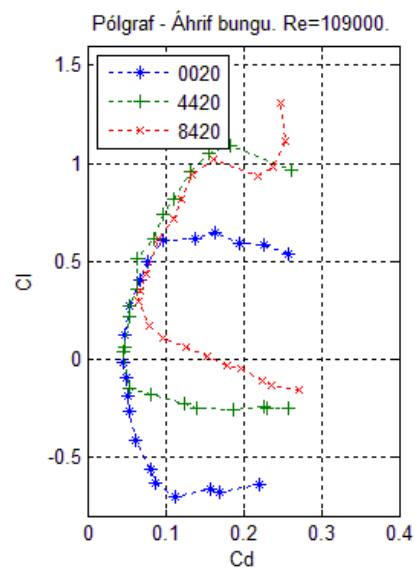
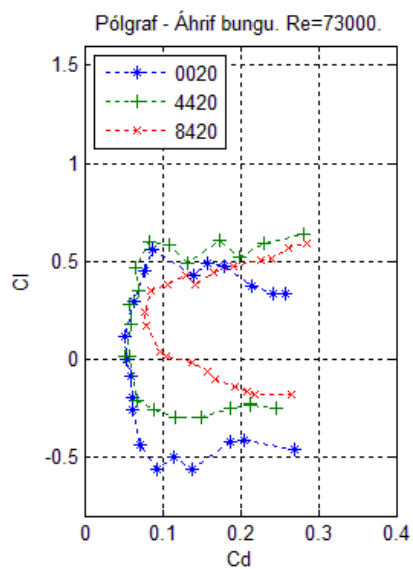
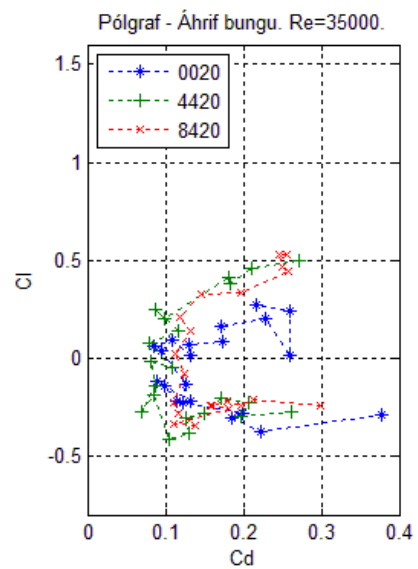
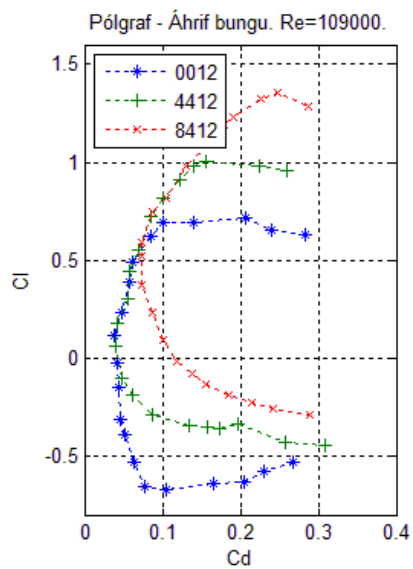
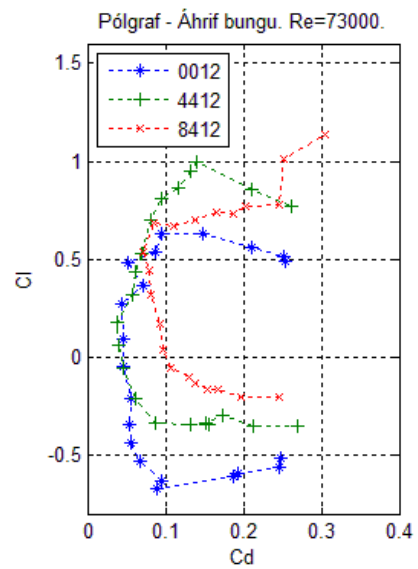
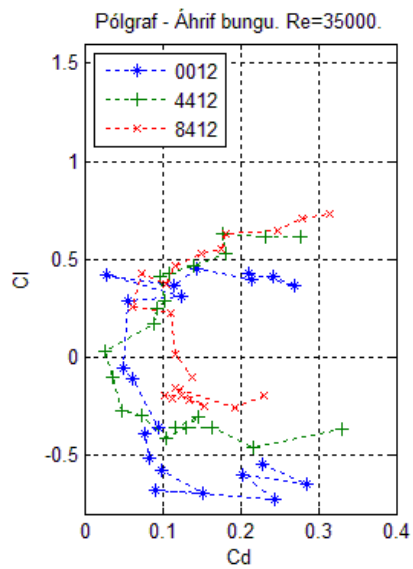
Viðauki D: Fleiri gröf fyrir kraftmælingar
á kyrrstæðum vængjum.

Áhrif bungu

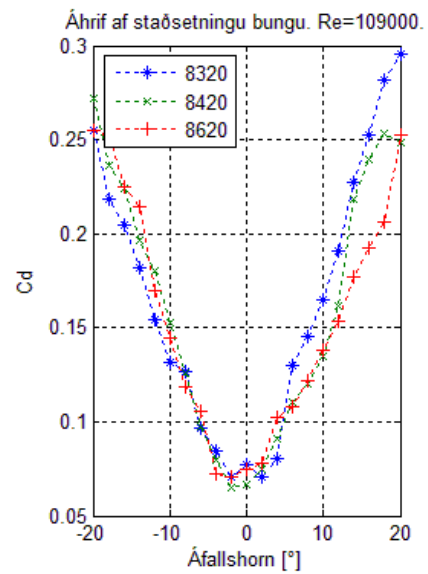
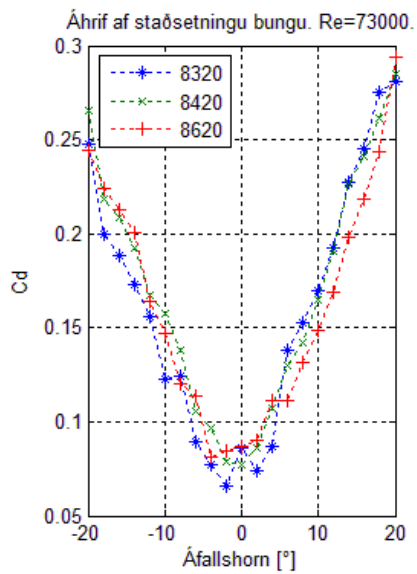
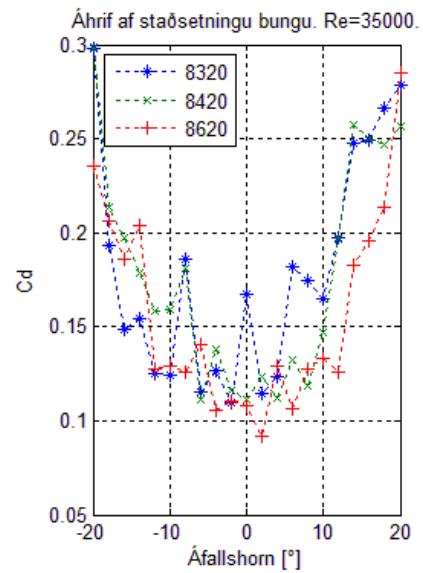
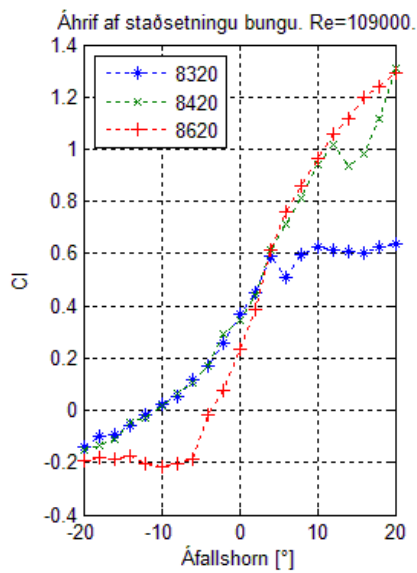
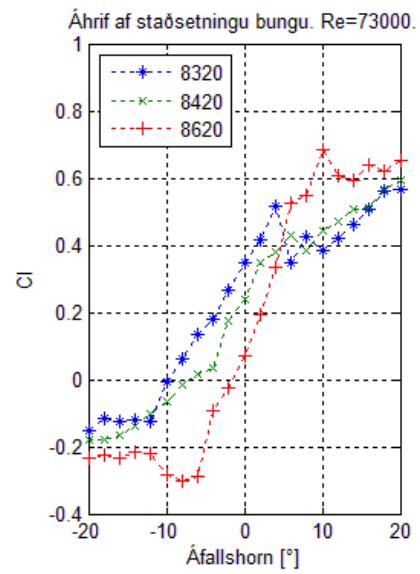
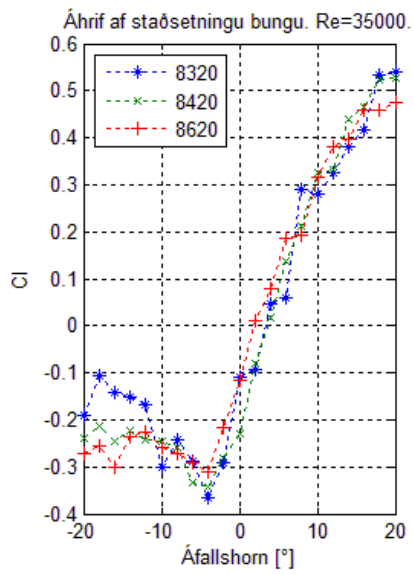


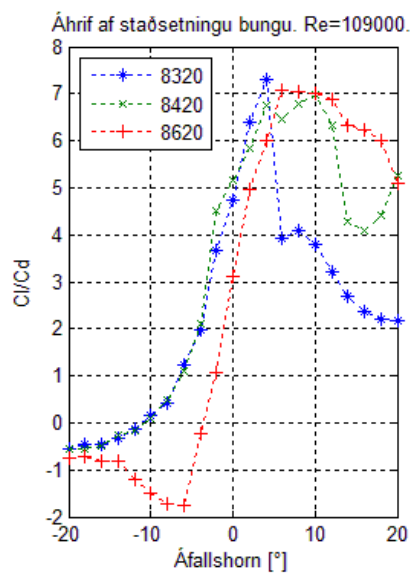
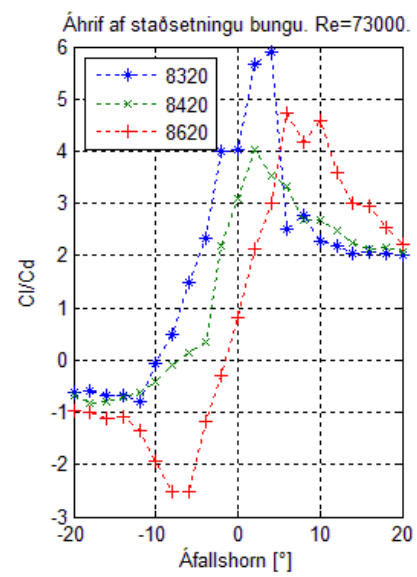
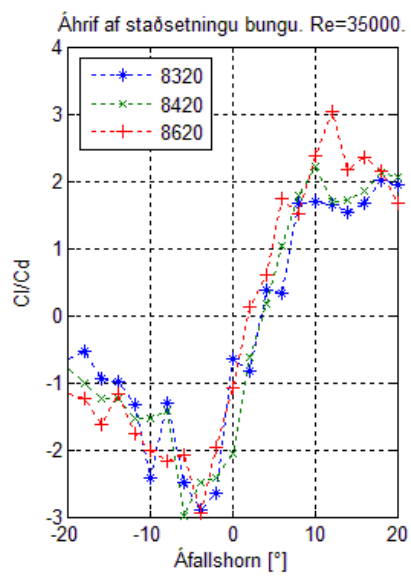




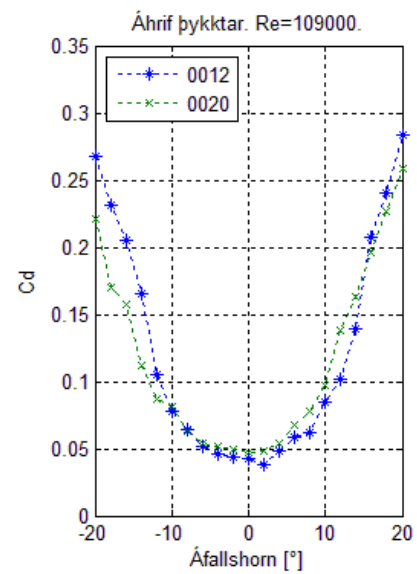
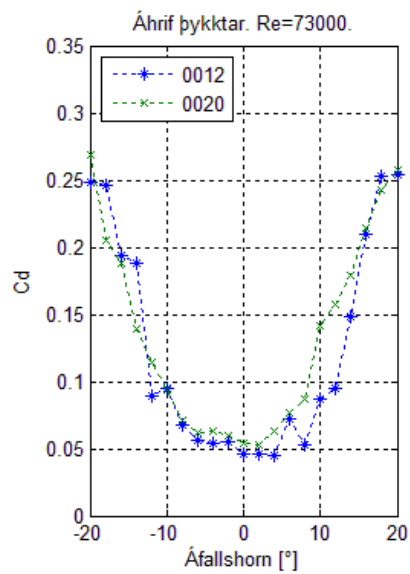
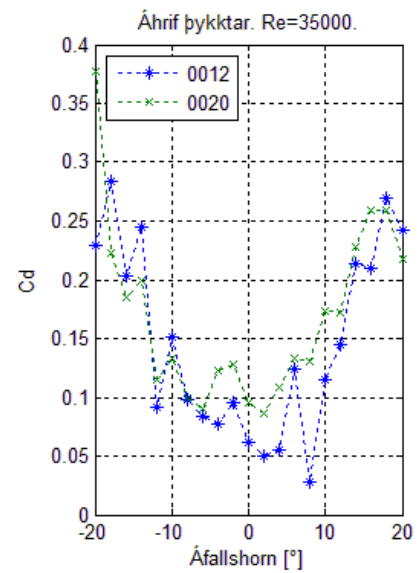
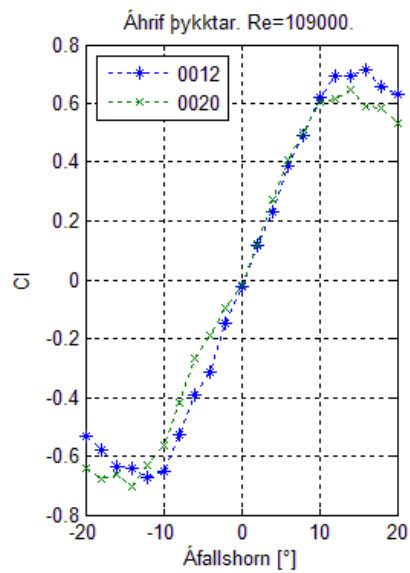
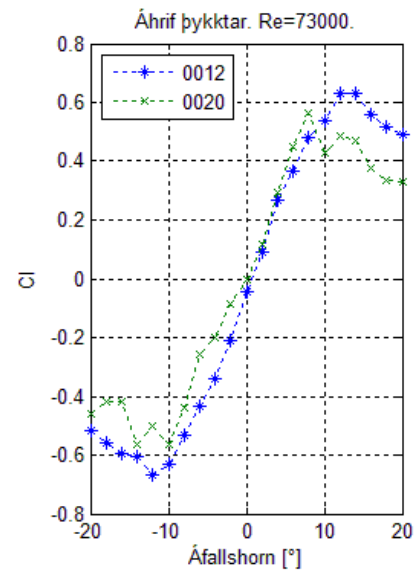
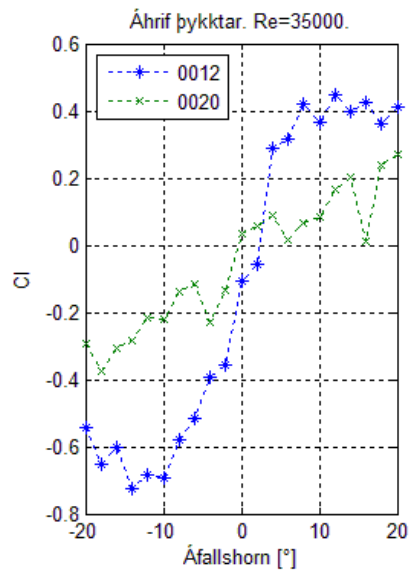


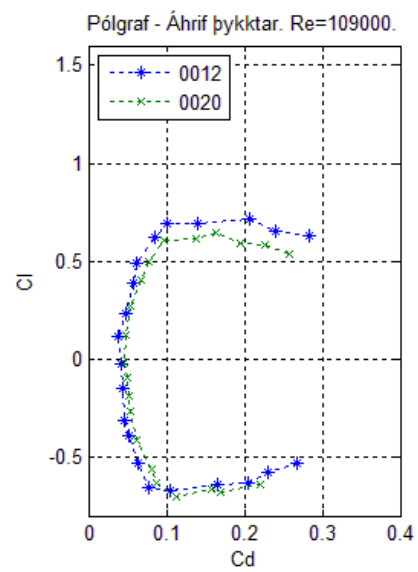
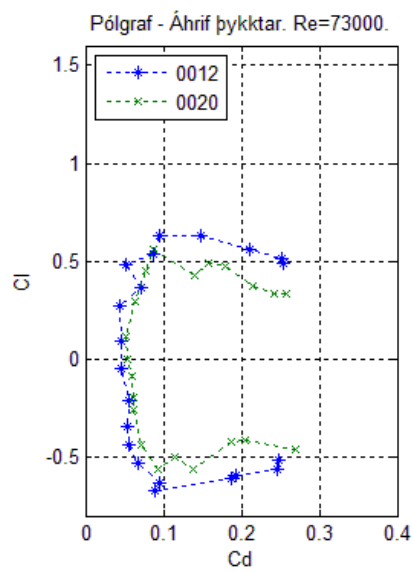
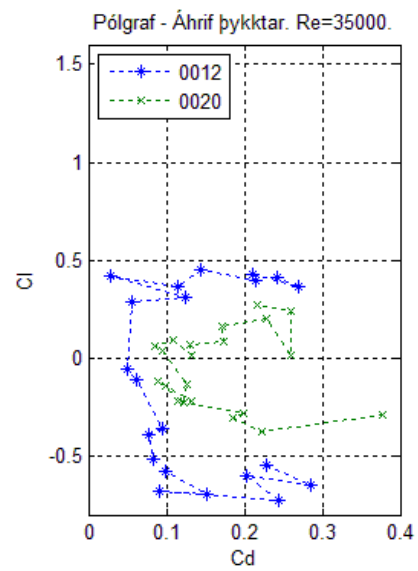
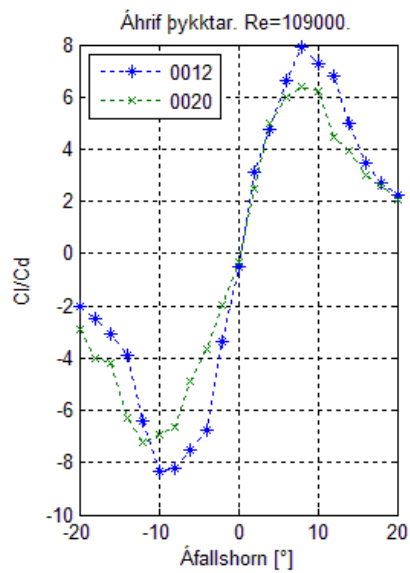
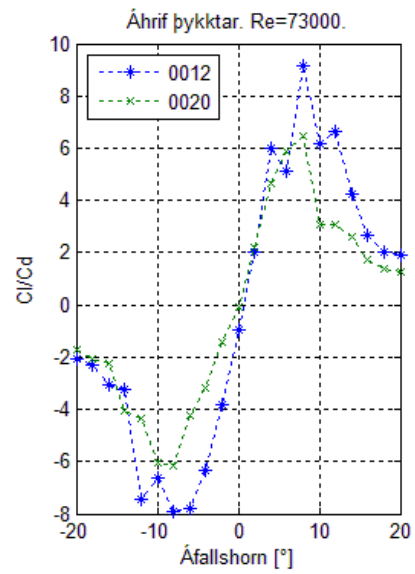
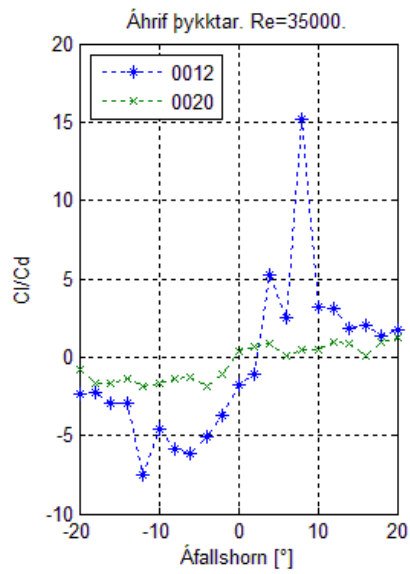
Áhrif af staðsetningu bungu



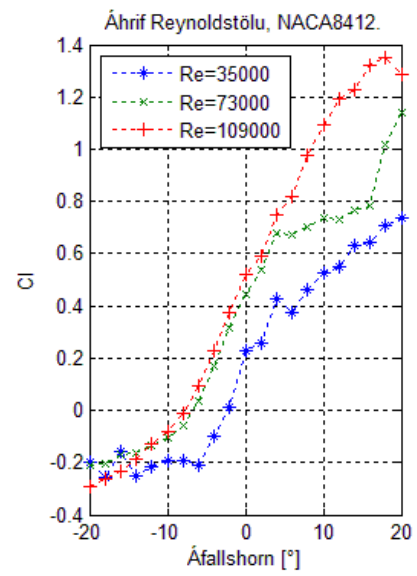
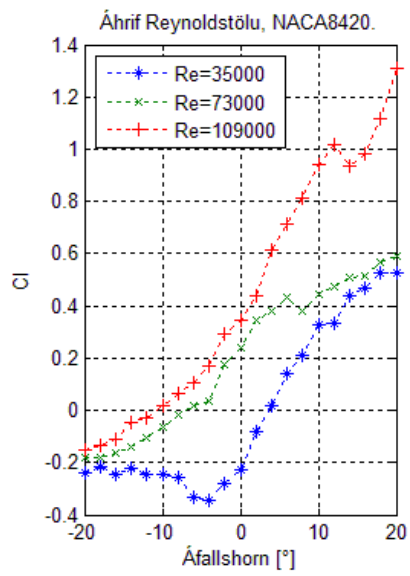
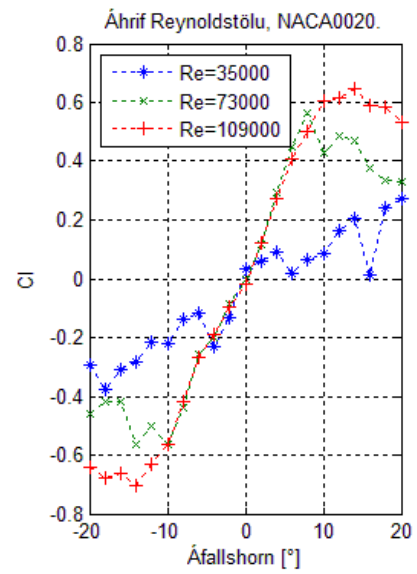
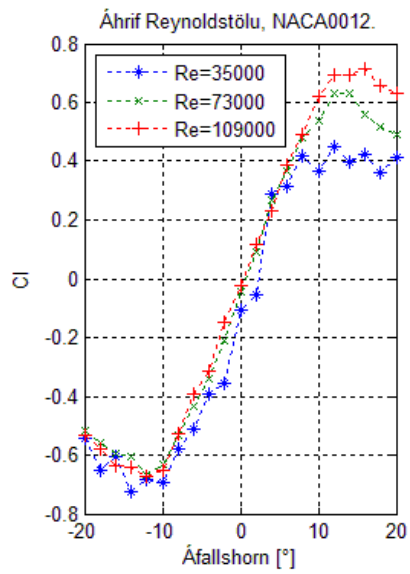


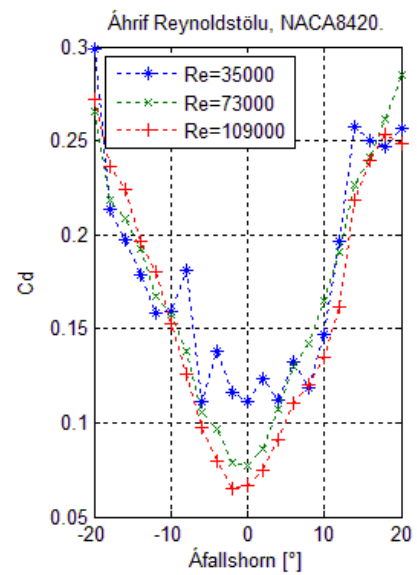
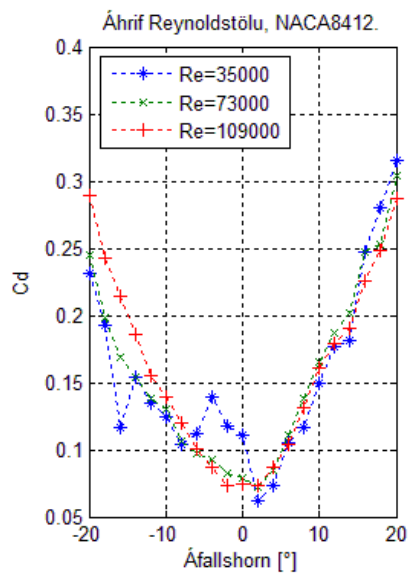
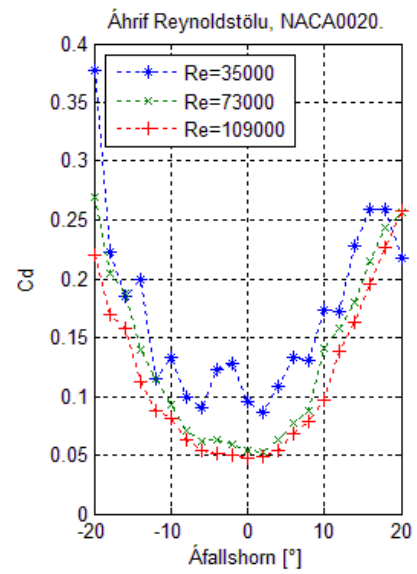
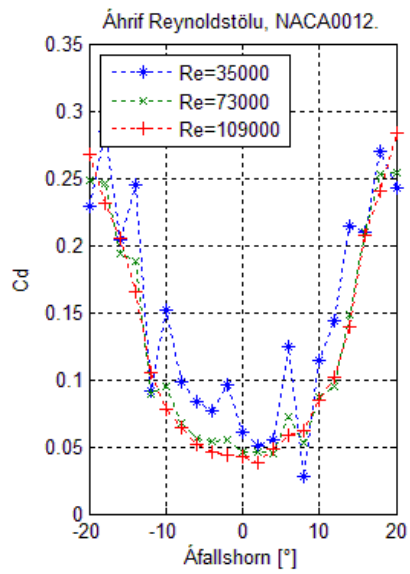
Áhrif þykktar

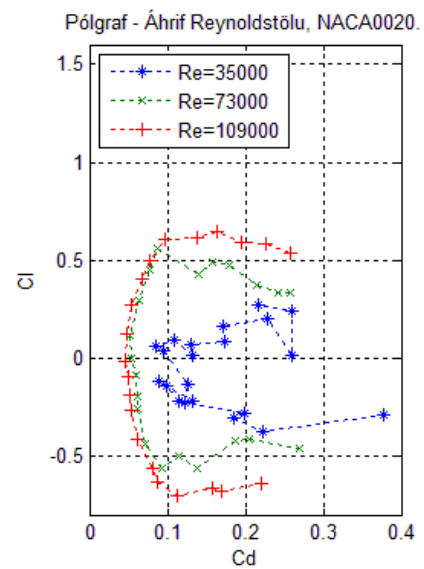
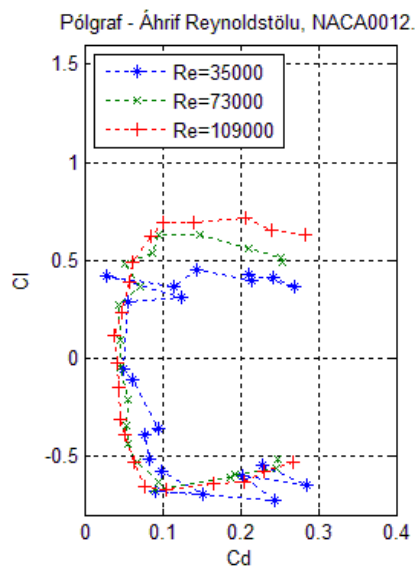
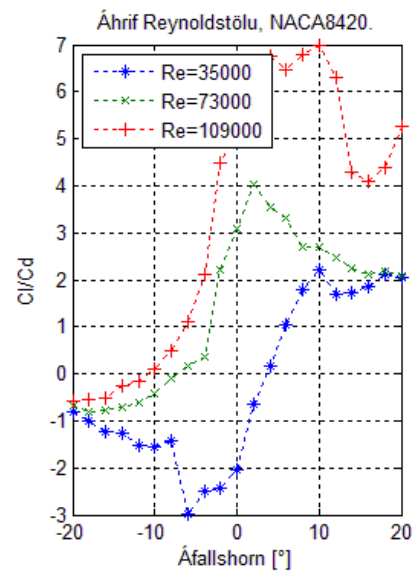
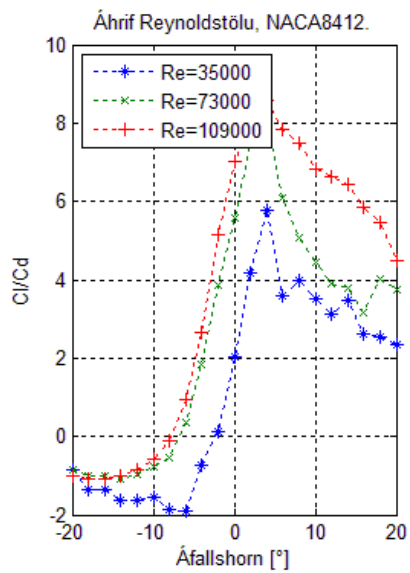
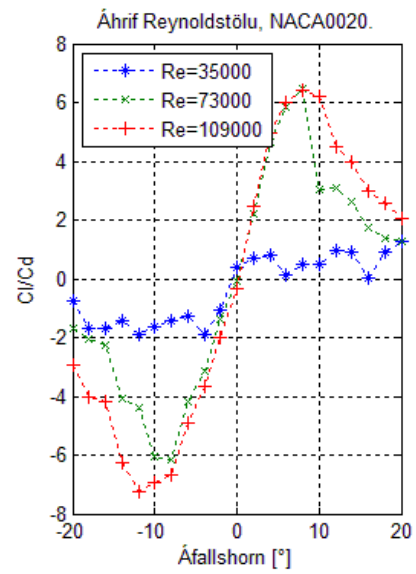
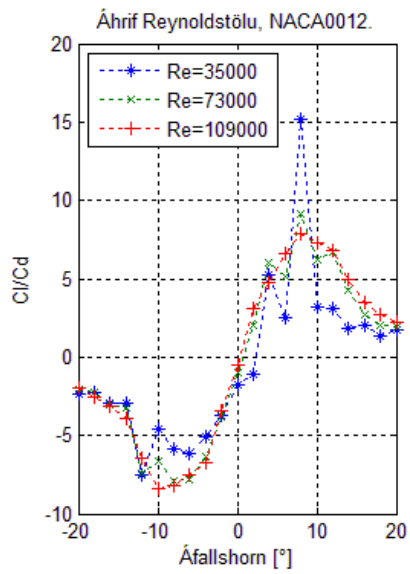




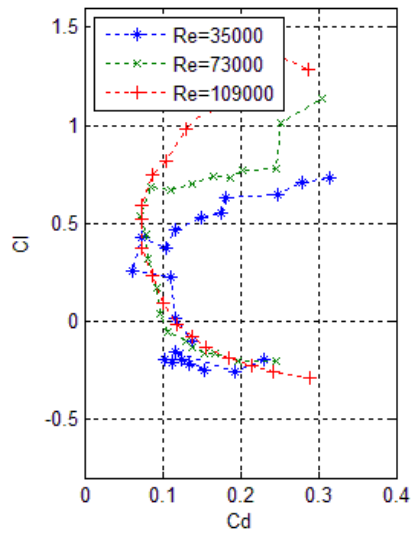
Áhrif Reynoldstölu



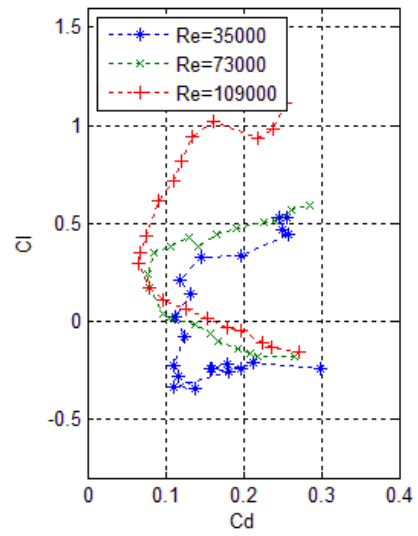




Pólgraf - Áhrif Reynoldstölu, NACA8412.

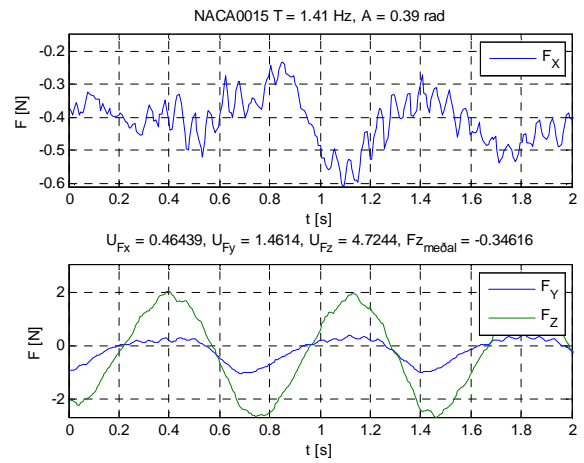
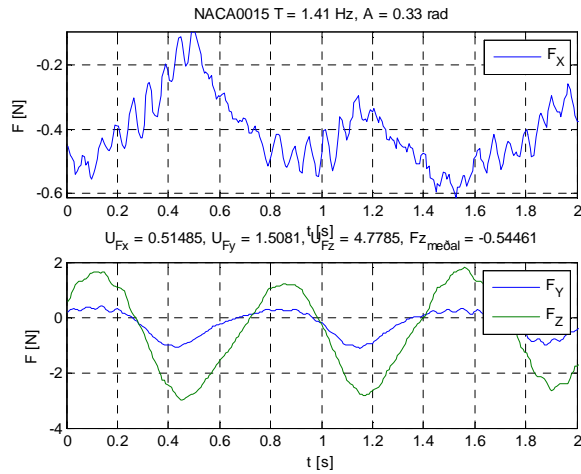
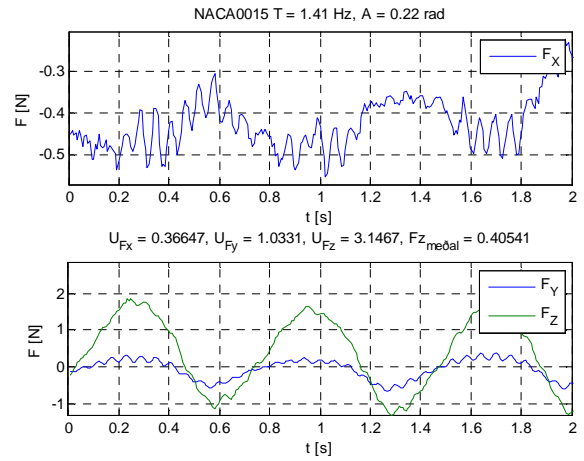
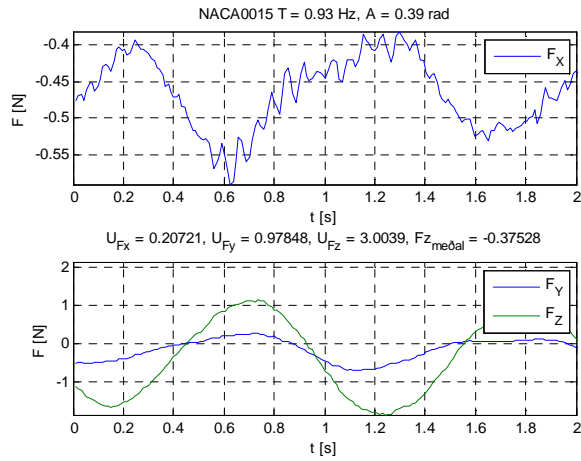
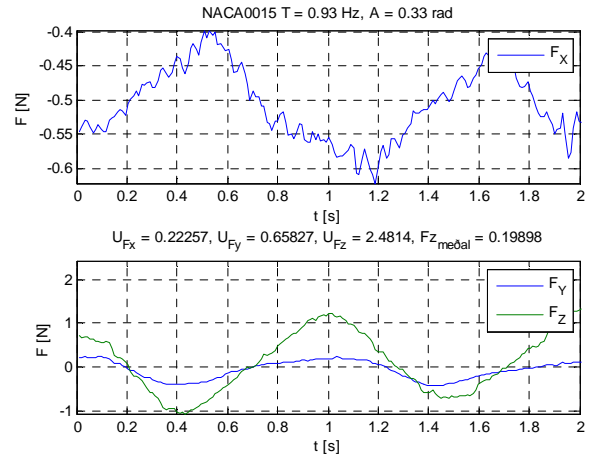
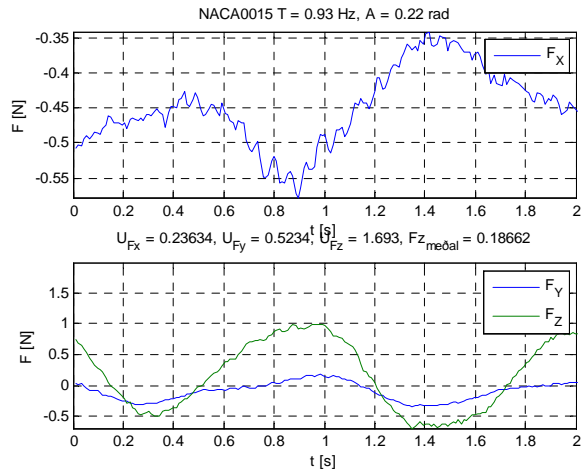


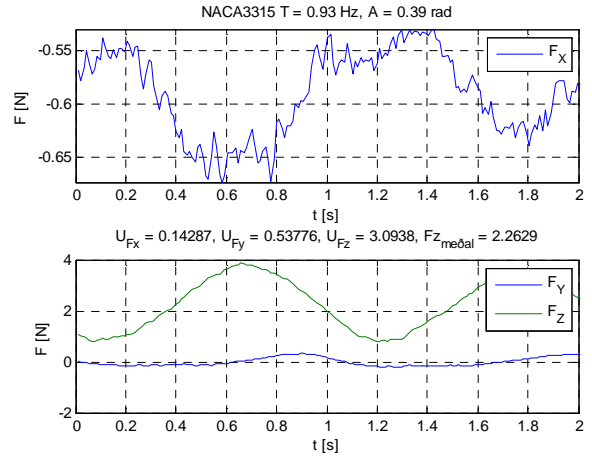
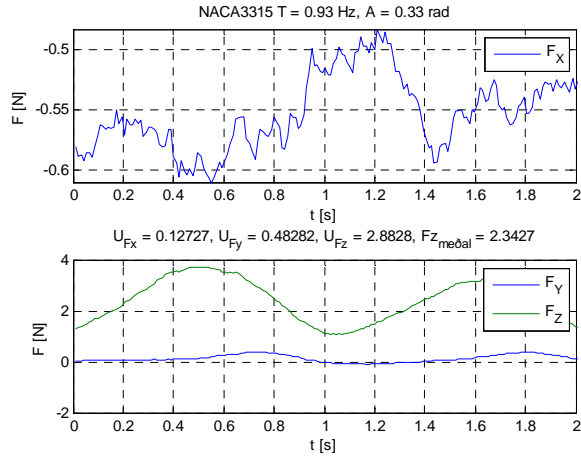
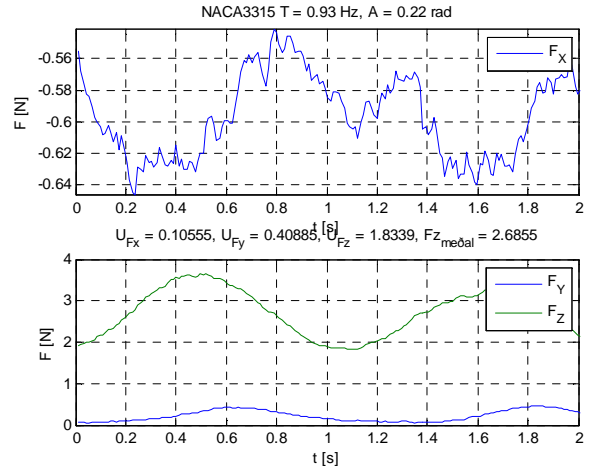
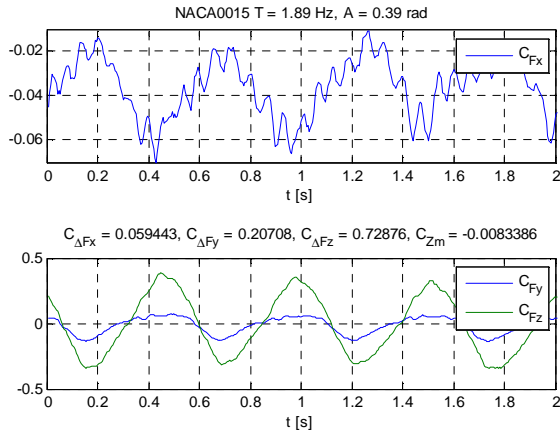
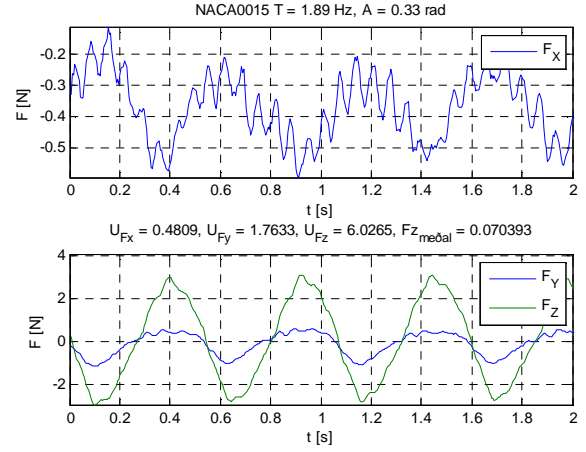
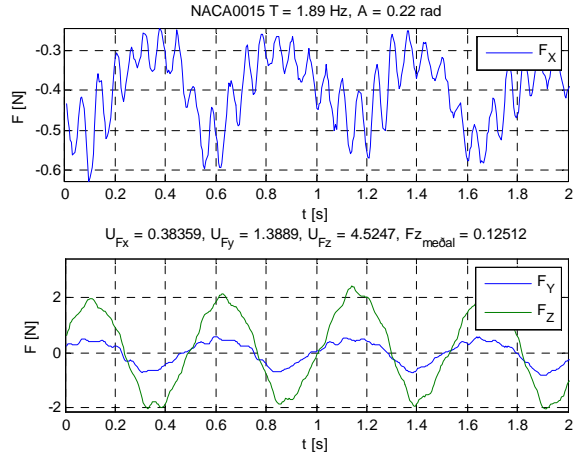
Pólgraf - Áhrif Reynoldstölu, NACA8420.

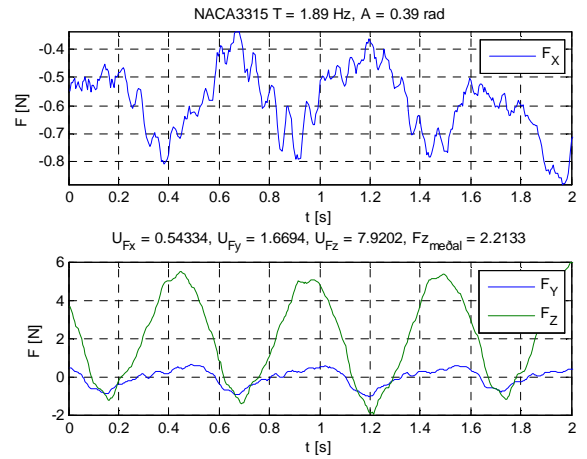
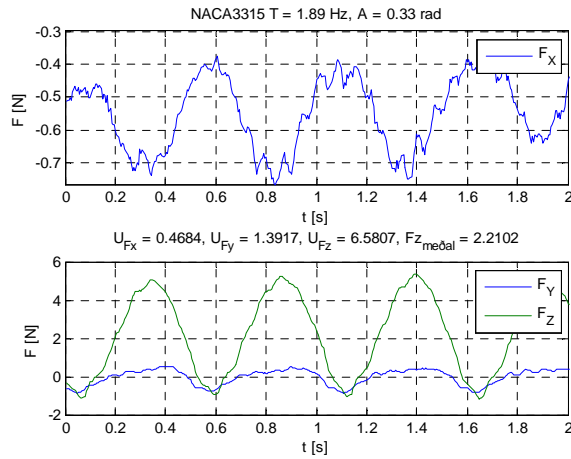
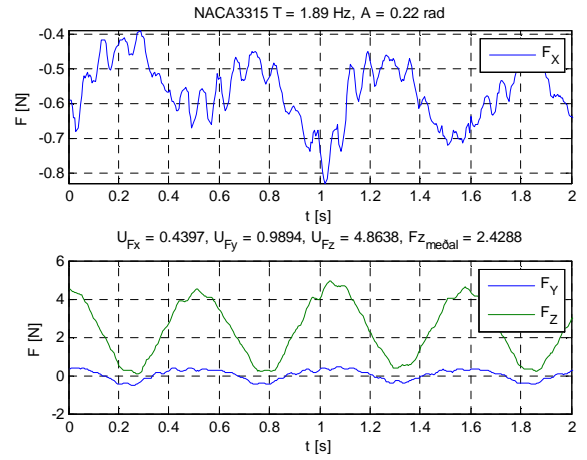
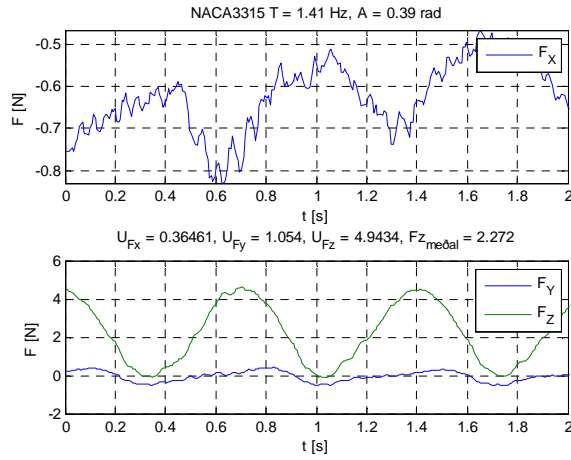
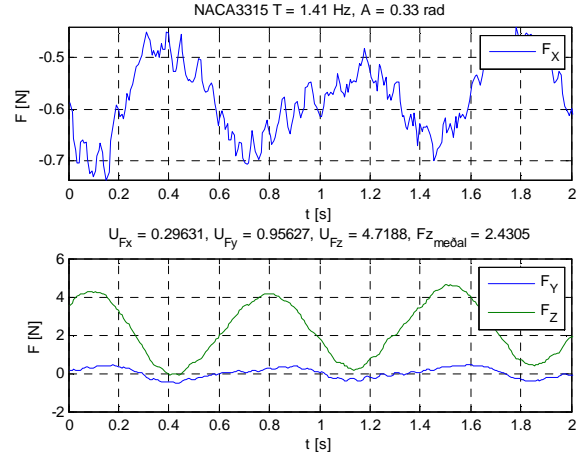
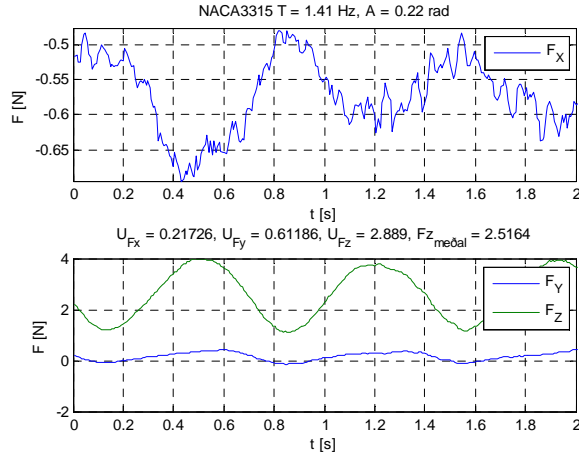


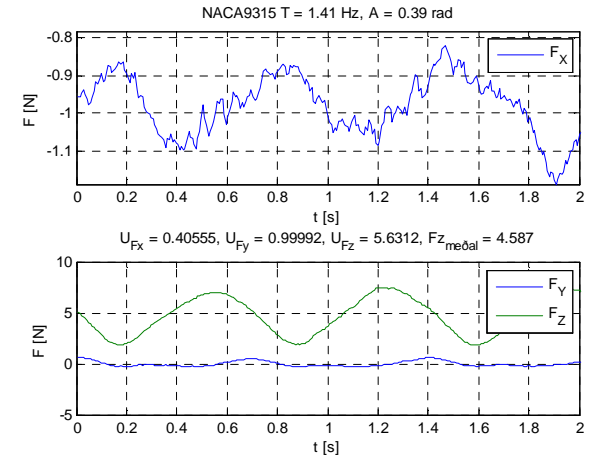
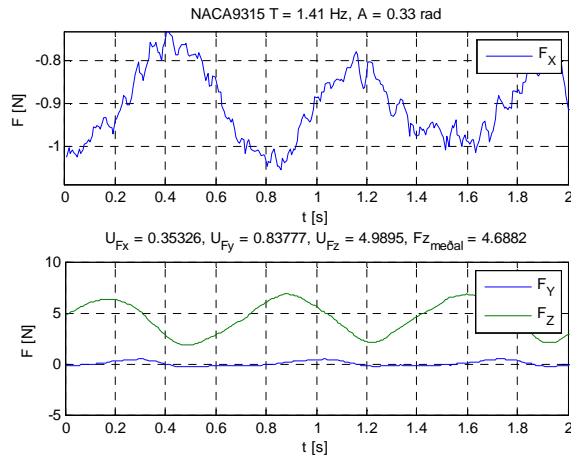
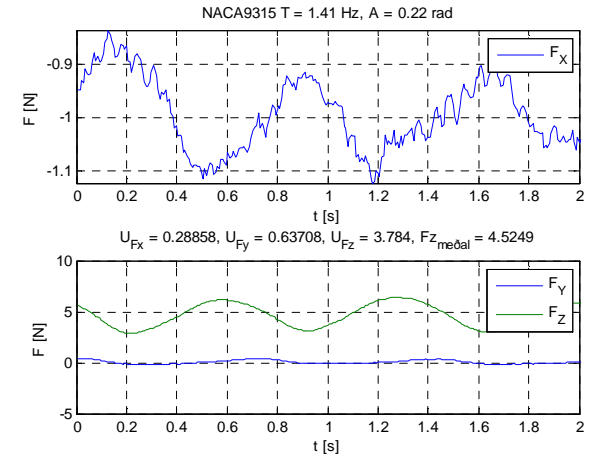
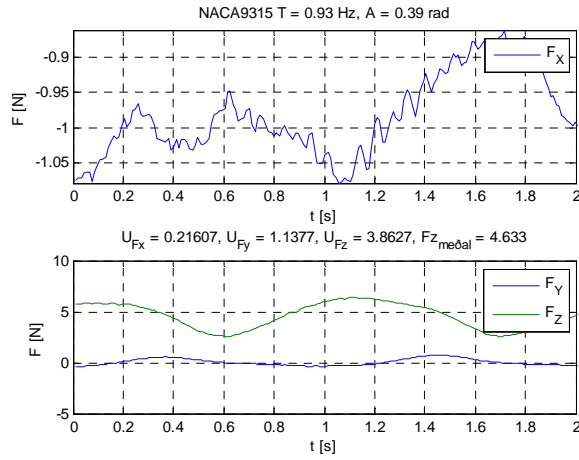
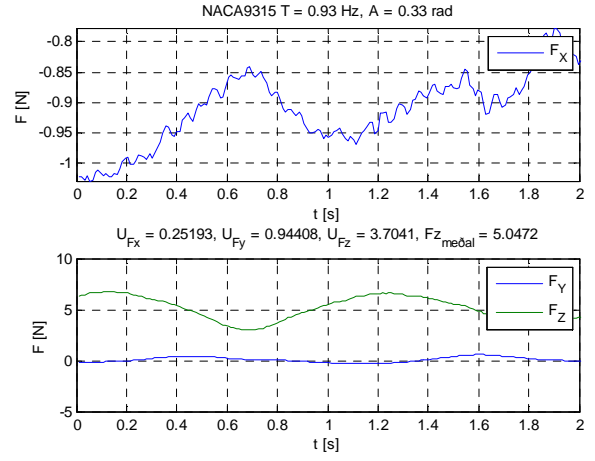
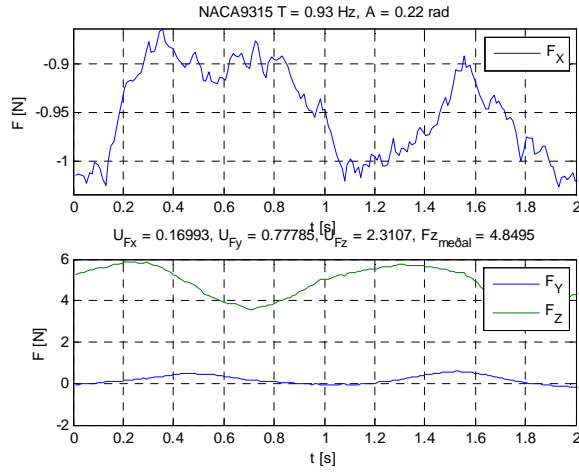
Viðauki E: Fleiri gröf fyrir krafmælingar
á blakandi vængjum.

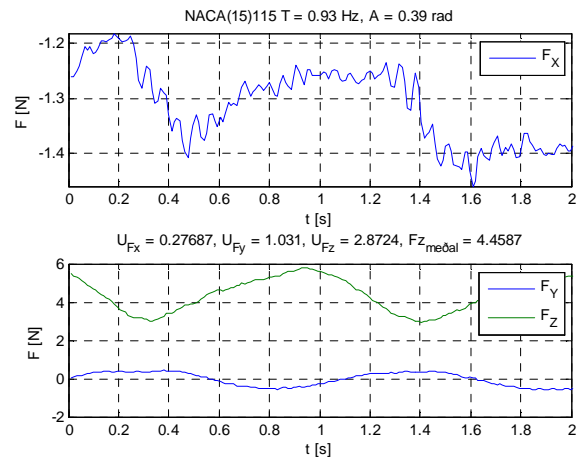
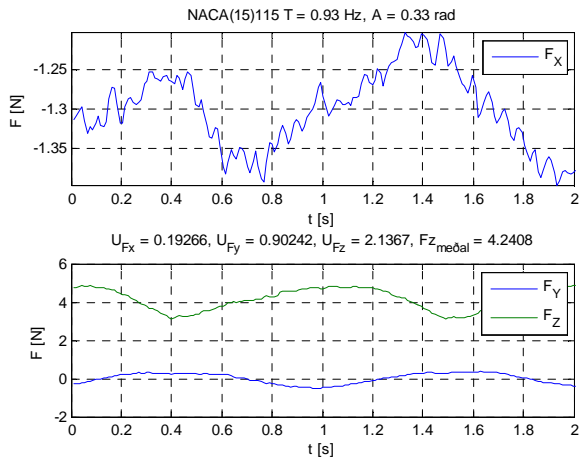
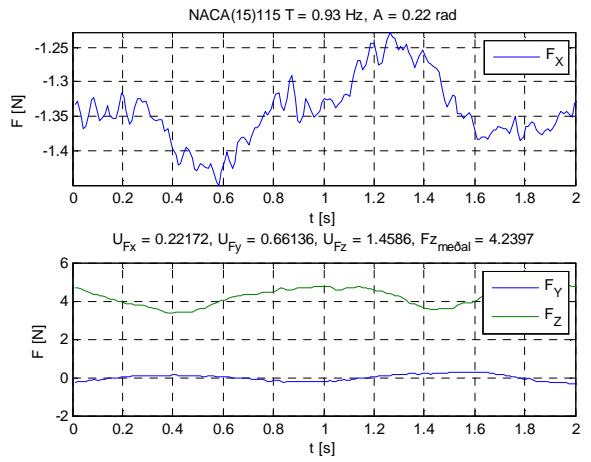
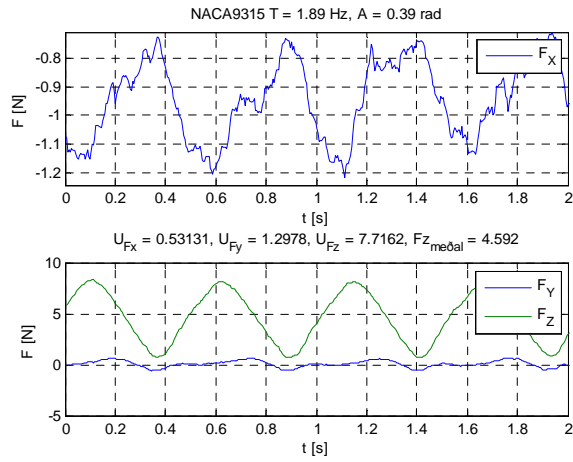
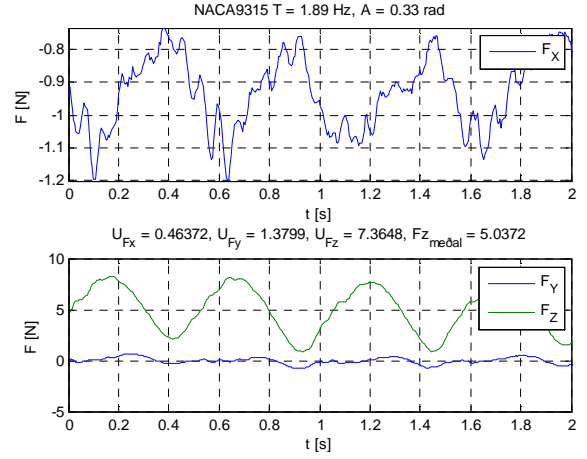
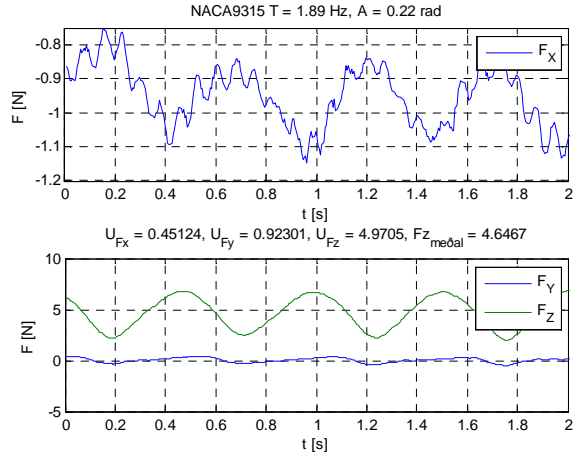
Kraftferlar með hlaupandi meðaltali.

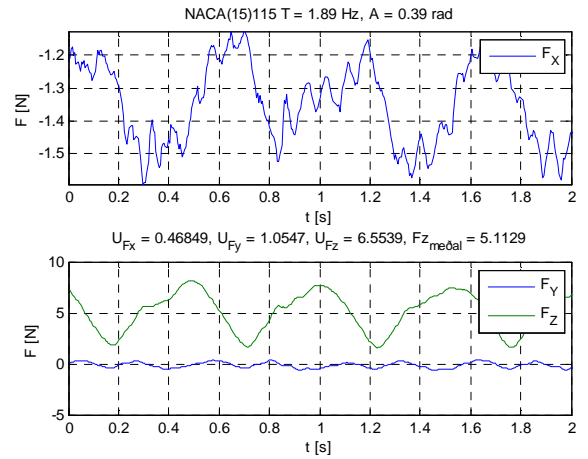
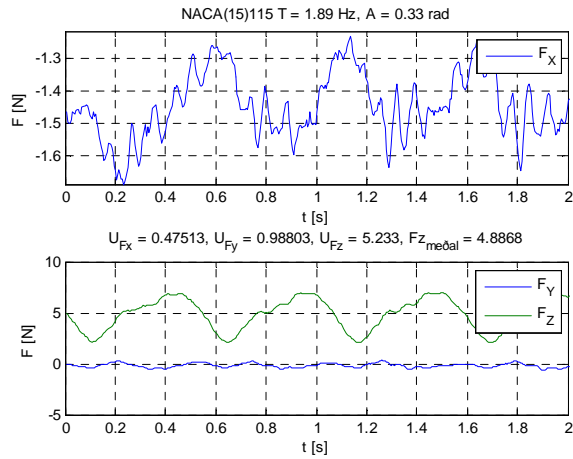
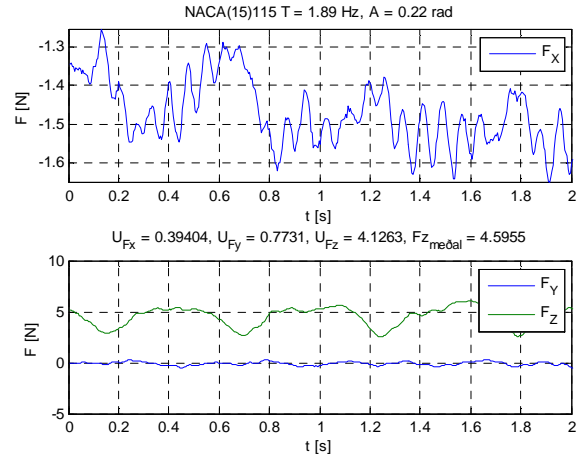
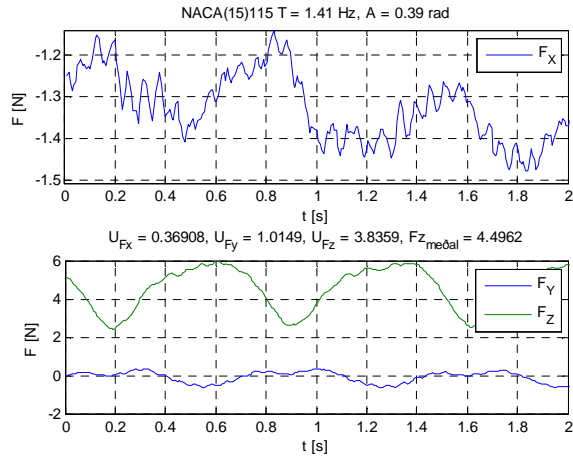
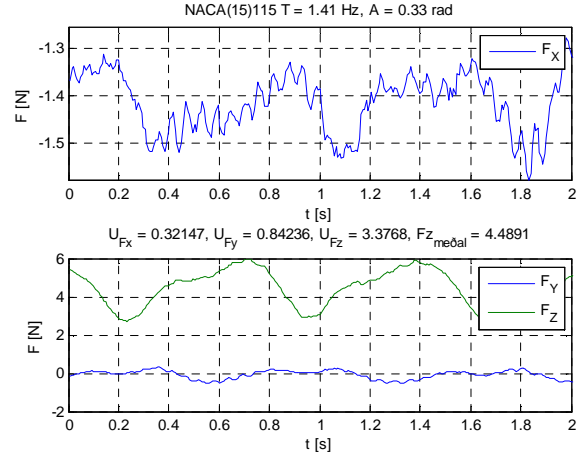
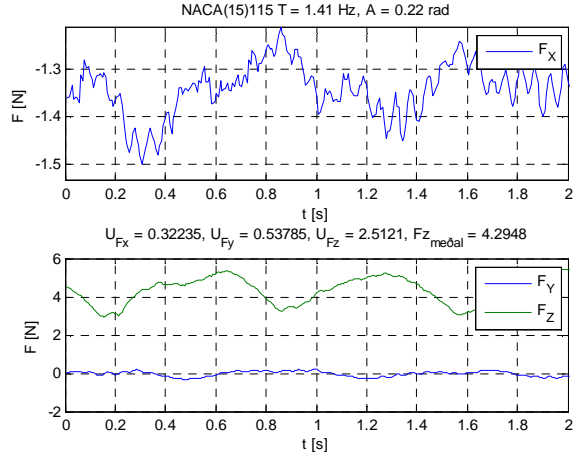


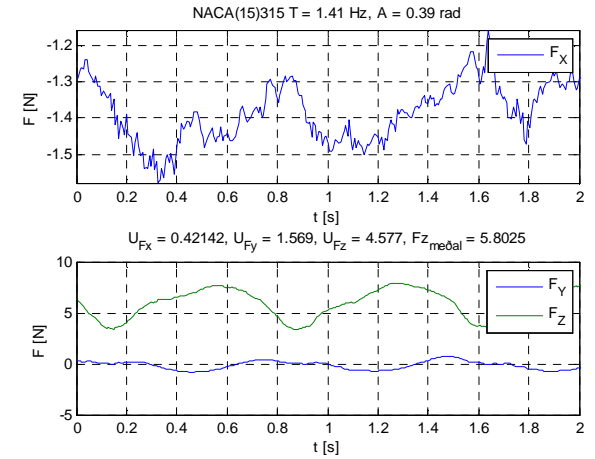
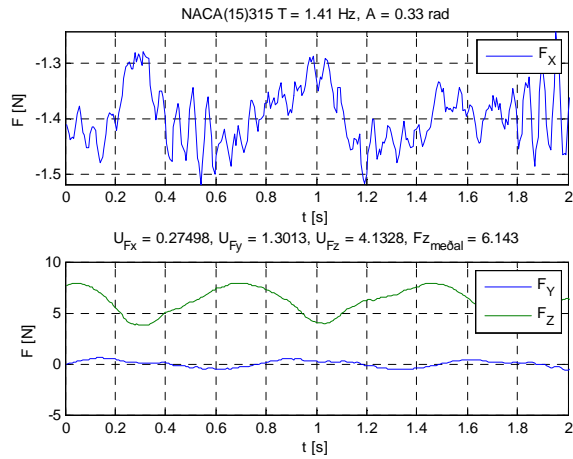
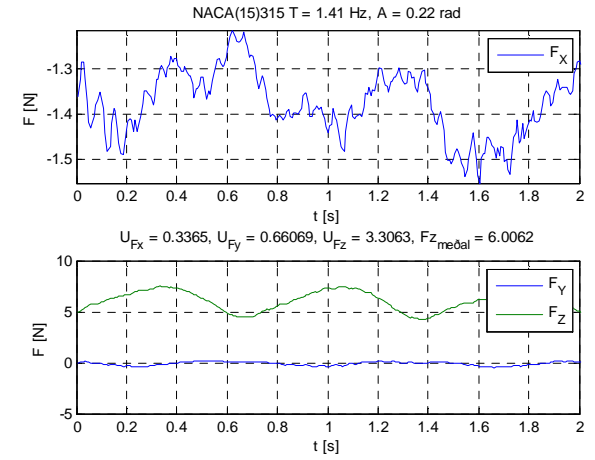
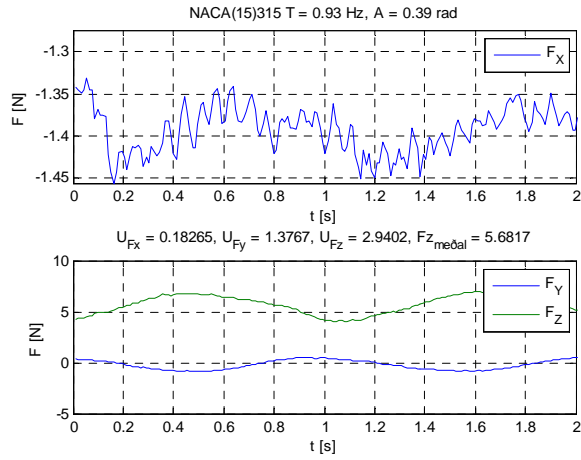
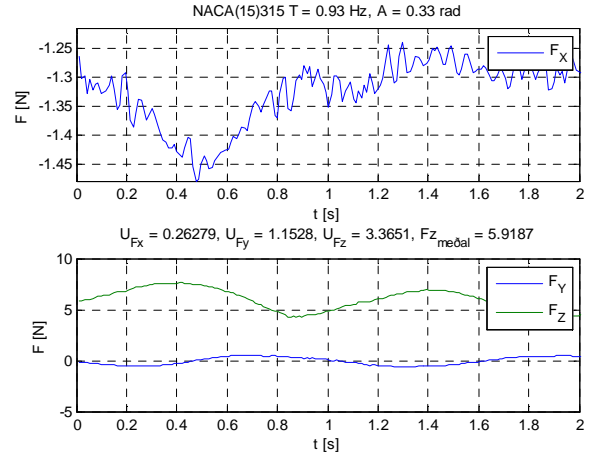
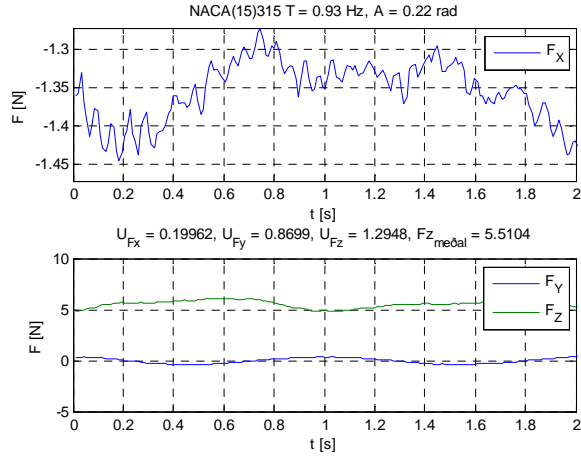


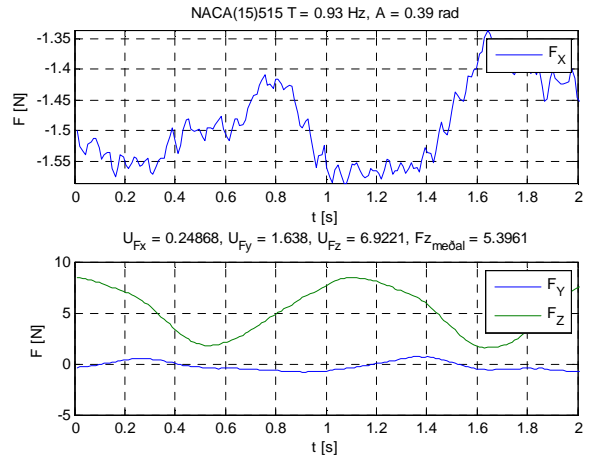
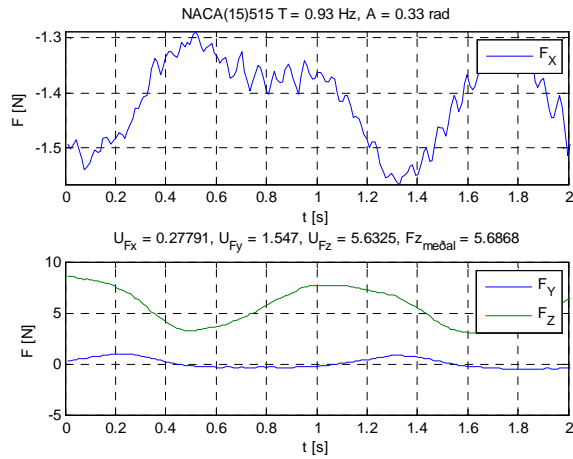
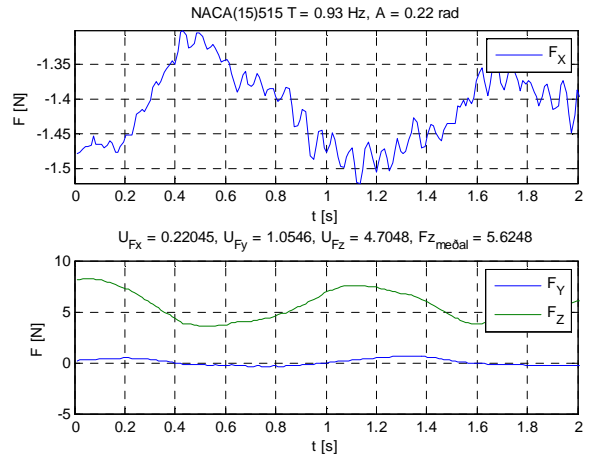
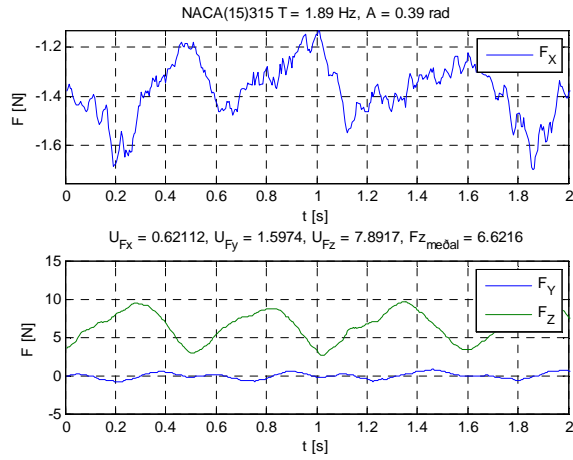
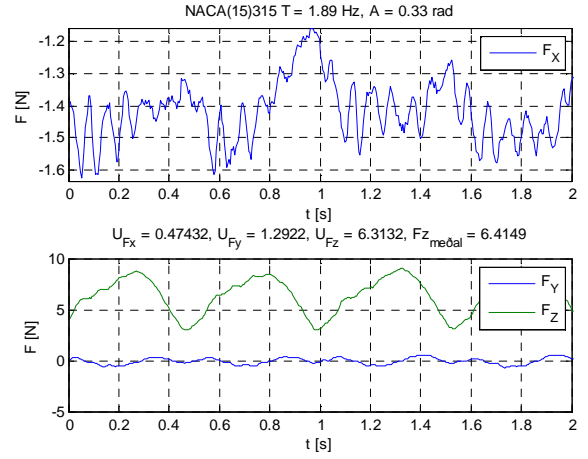
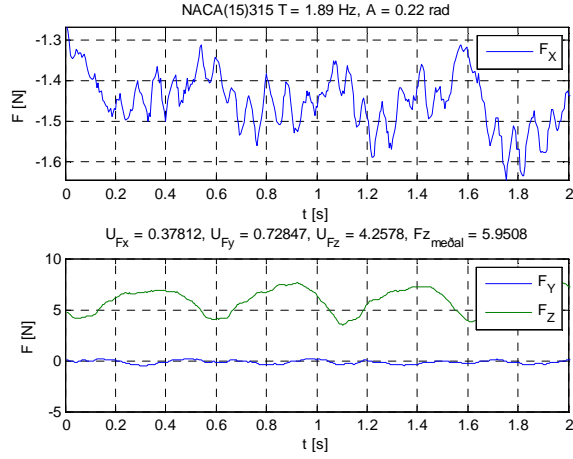


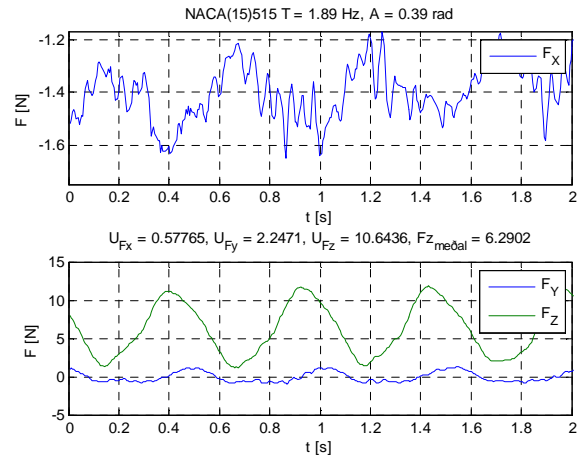
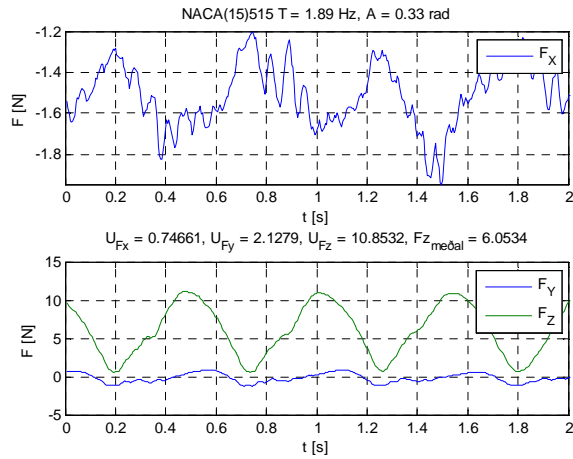
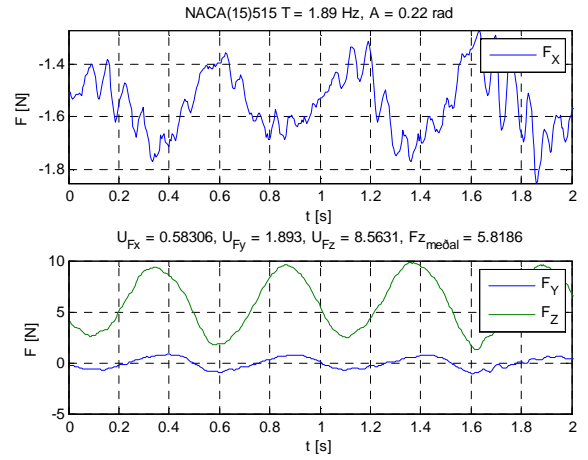
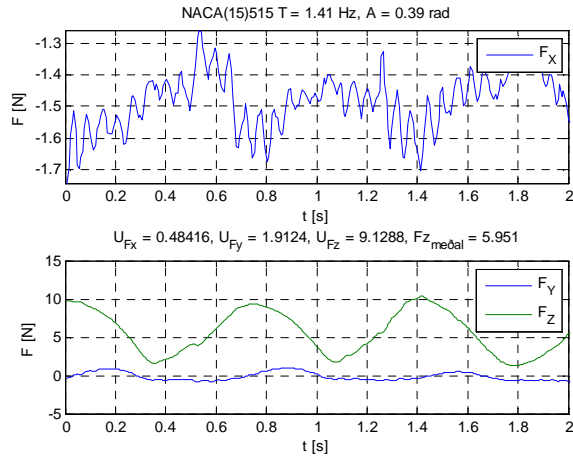
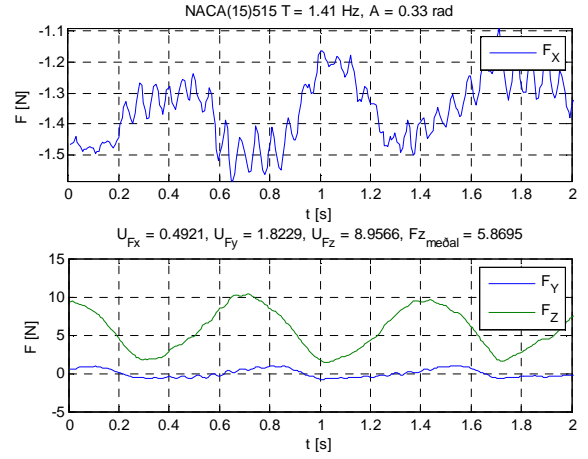
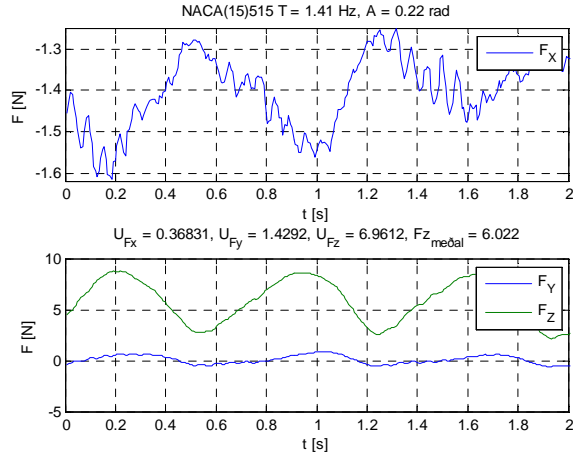


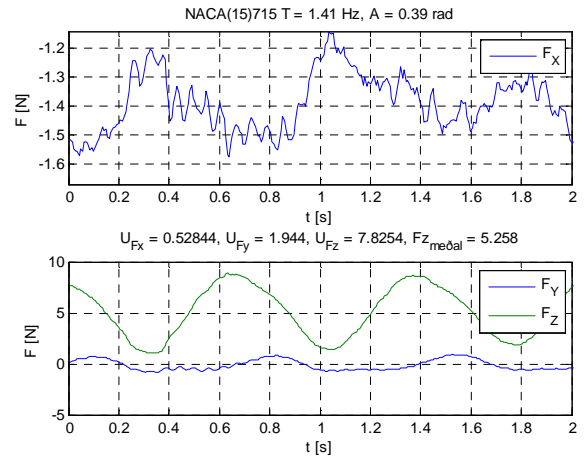
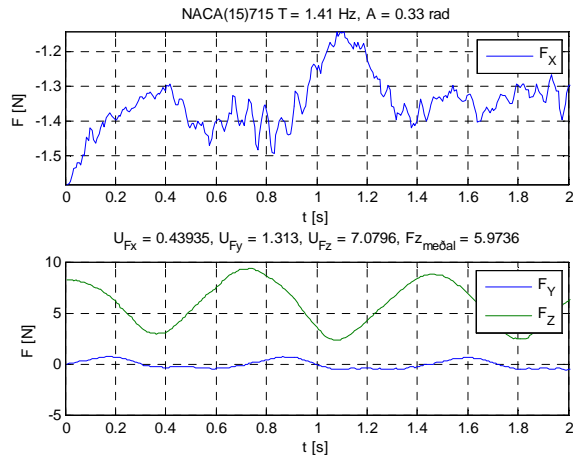
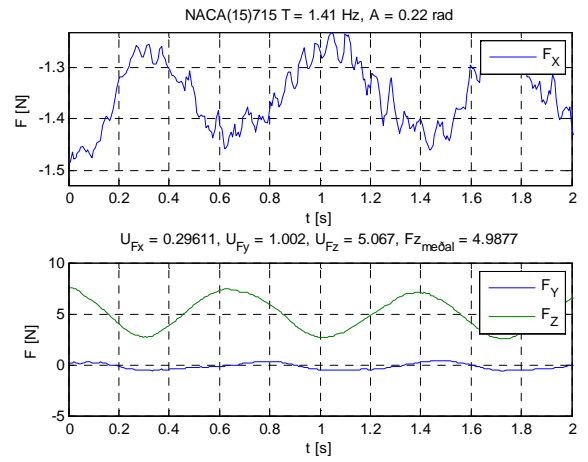
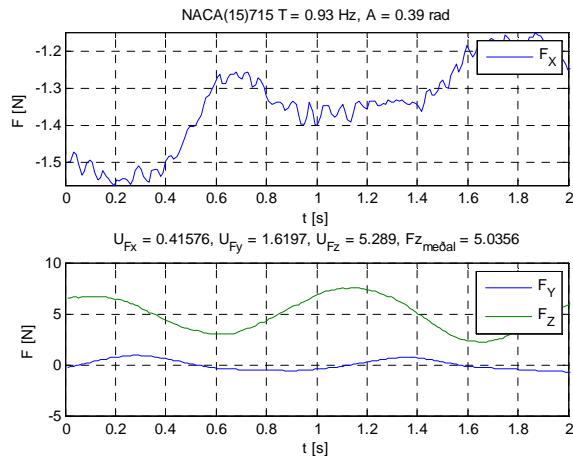
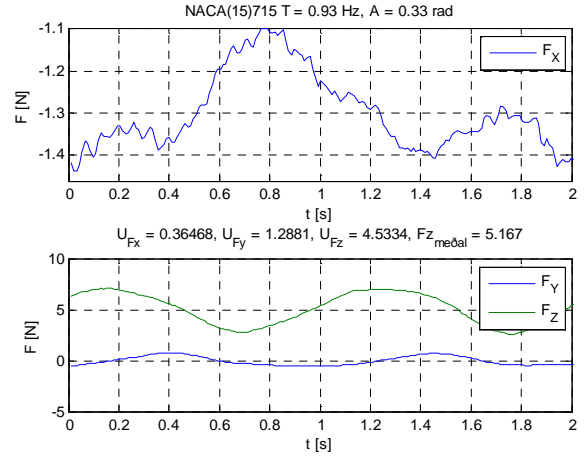
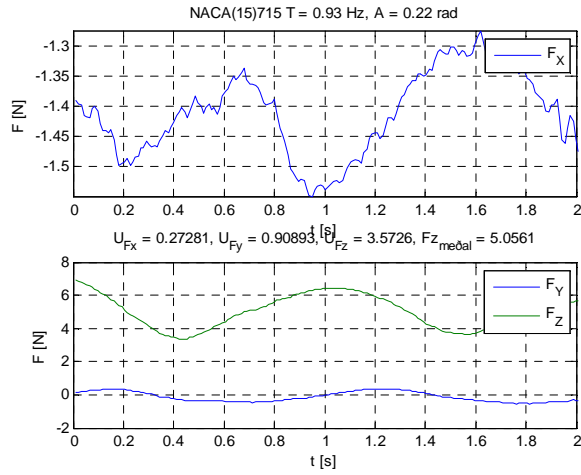


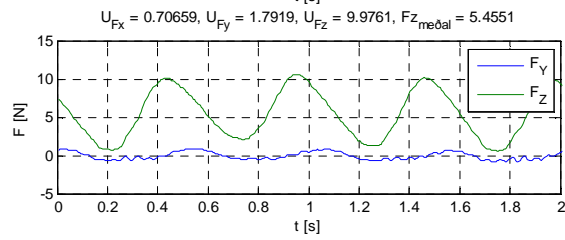
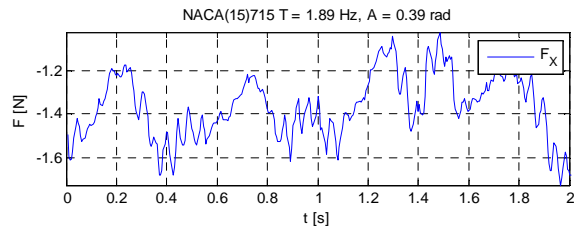
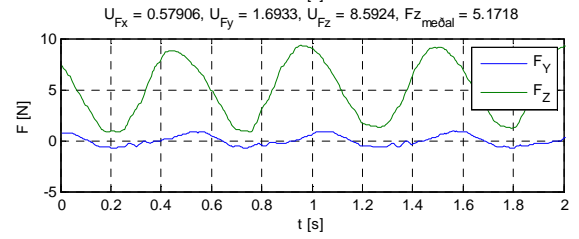
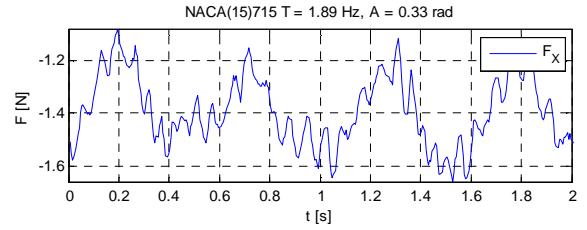
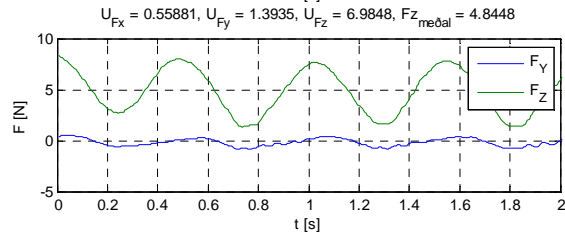
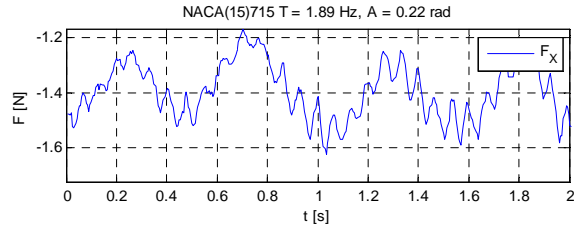






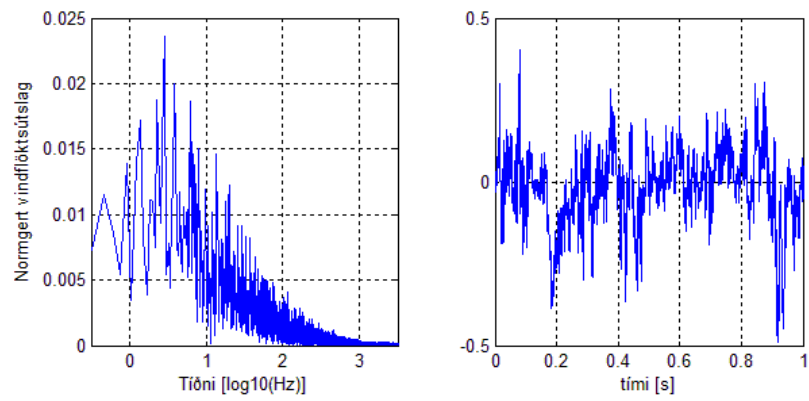




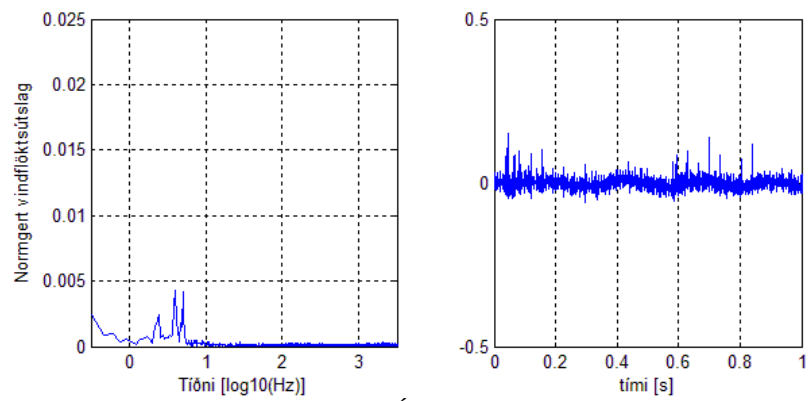


Viðauki F: Fleiri gröf fyrir merki vindhraða
í tíma og tíðnirúmi.

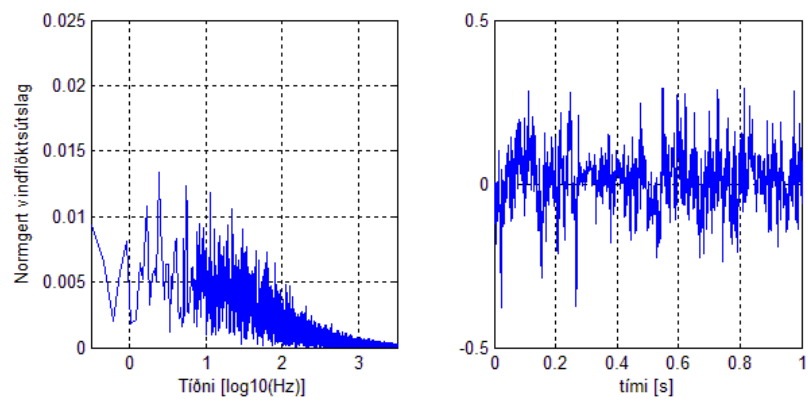
F = 30 Hz. Án inntaksneta:



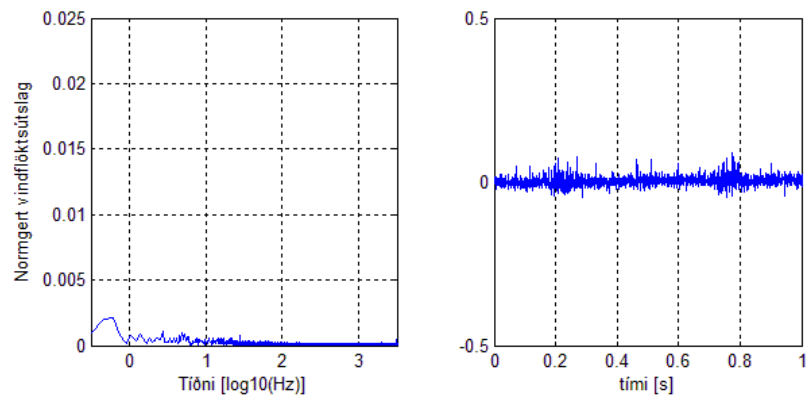
F = 30 Hz. Þrjú inntaksnet:



F = 10 Hz. Án inntaksneta:



F = 30 Hz. Þrjú inntaksnet:



Viðauki G: Leiðbeiningar til keyrslu
vængsniðahermiforrítsins XFOIL.

- **Naca 0012** skilgreinir vængsnið
- **Oper** opnar operating menu
- **Visc 73000** vel reynoldstölu
- **Vpar** leyfir breytingar á föstum
- **N** vel critical amplification ratio(útskýrt seinna)
- **1,4** vel gildi fyrir Ncrit
- **<ENTER>** fer til baka í oper
- **Pacc** opna viðmót til að vista gildi
- **Nafn skráar.txt**
- **<ENTER>** fer til baka í oper
- **As -20 20 0.1** reiknar bilið alfa -20 til 20 með 0.1°millibili

Viðauki H: Viðbót við ReplicatorG
fyrir frauðplastskeyra.

ReplicatorG (version 25 or higher)

- Modify the file Thingomatic.xml found in the folder /ReplicatorG/Machines/

```
<machine experimental="0">
  <name>EXPERIMENTAL - Thingomatic - 4 axes</name>
  <geometry type="cartesian">
    <axis id="x" length="106" maxfeedrate="4000" stepspermm="50.0"
endstops="Xmax"/>
    <axis id="y" length="120" maxfeedrate="4000" stepspermm="50.0"
endstops="Ymax"/>
    <axis id="a" length="106" maxfeedrate="4000" stepspermm="50.0"
endstops="Xmin"/>
    <axis id="b" length="120" maxfeedrate="4000" stepspermm="50.0" endstops="Ymin
  </geometry>
  <tools>
    <tool name="Plastruder MK5" type="extruder" material="abs" motor="true"
fan="true" heatedplatform="true" heater="true"/>
  </tools>
  <clamps></clamps>
  <driver name="makerbot4g">
    <rate>115200</rate>
  </driver>
  <warmup>
  </warmup>
  <cooldown>
  (Turn off steppers after a build.)
M18
  </cooldown>
</machine>
```