



CHALMERS



Aerodynamisk Optimering för Förbättrad Effektivitet i Airborne Wind Energy-system

Designstrategier för att Minimera Aerodynamiskt Motstånd från linan i AWE

Kandidatarbete inom Maskinteknik

Abdirahman Dubad

Atrin Lakpour

Ayman Muhammed Ali

Mohammad Amiri

Mustafa Jaffari

Nils Van Leest

INSTITUTIONEN FÖR MEKANIK OCH MARITIMA VETENSKAPER

CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA

Göteborg, Sverige 2025

www.chalmers.se

AERODYNAMISK OPTIMERING FÖR FÖRBÄTTRAD EFFEKTIVITET I
AIRBORNE WIND ENERGY-SYSTEM

Designstrategier för Att Minimera Aerodynamiskt Motstånd från
linan i AWE

Abdirahman Dubad
Atrin Lakpour
Ayman Muhammed Ali
Mohammad Amiri
Mustafa Jaffari
Nils Van Leest



CHALMERS

Institutionen för Mekanik och Maritima Vetenskaper
Avdelningen för Avdelningsnamn
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg 2025

Aerodynamisk Optimering för Förbättrad Effektivitet i Airborne Wind Energy-system

Designstrategier för Att Minimera Aerodynamiskt Motstånd från linan i AWE

Abdirahman Dubad
Atrin Lakpour
Ayman Muhammed Ali
Mohammad Amiri
Mustafa Jaffari
Nils Van Leest

© Abdirahman Dubad, Atrin Lakpour, Ayman Muhammed Ali ,
Mohammad Amiri, Mustafa Jaffari, Nils Van leest, 2025.

Handledare: Isak Jonsson, Mekanik och maritima vetenskaper
Examinator: Valery Chernoray, Mekanik och maritima vetenskaper

Kandidatarbete 2025
Institutionen för Mekanik och Maritima Vetenskaper
Chalmers Tekniska Högskola
SE-412 96 Göteborg
Telefon +46 31 772 1000

Typsatt i L^AT_EX
Göteborg 2025

Aerodynamiks Optimering för Förbättrad Effektivitet i Airborne Wind Energy-system

Designstrategier för Att Minimera Aerodynamiskt Motstånd från linan i AWE

Mohammad Amiri, Abdirahman Dubad, Mustafa Jaffari,

Atrin Lakpour, Ayman Muhammed Ali, Nils Van Leest

Institutionen för Mekanik och Maritima Vetenskaper

Avdelningen för Strömningslära

Chalmers Tekniska Högskola

Abstract

This project investigates geometric optimization strategies to enhance the aerodynamic efficiency of the tether connected to the kite, with a specific focus on reducing dragforce. Through numerical simulations, wind tunnel experiments and modeling, a key finding emerged: approximately 50 % of the accumulated drag originated from the last 40 meters of the tether, highlighting its potential for modular optimization. In another result, an estimated 51.5 % reduction in total drag was achieved by using a combination of a cylindrical core covered with an aerodynamic shell shaped like a wing, which aligns with the previously stated result.

Sammanfattning

Detta projekt undersöker olika strategier för att förbättra den aerodynamiska effektiviteten hos linan som är kopplad till draken, med särskilt fokus på att minska luftmotståndskraften. Genom numeriska simuleringar, experiment i vindtunnel och modellering konstaterades en viktig upptäckt: cirka 50 % av det ackumulerade luftmotståndet kommer från de sista 40 meterna av linan, vilket gör denna del mycket lämplig för modulär optimering. I ett annat resultat uppnåddes en uppskattad minskning av det totala luftmotståndet med 51.5 % genom att använda en kombination av en cylindrisk lina täckt med ett aerodynamiskt skal format som en vinge.

Nyckelord: Airborne Wind Energy (AWE), Drag kraft, Reynolds tal, Aerodynamic, NACA0012, Vingprofil, Dimplar, Cylinder, CFD, vind tunnel.

Förord

Rapporten redogör för ett kandidatarbete utfört av en grupp om sex studenter från civilingenjörsprogrammen i Maskinteknik vid Chalmers tekniska högskola. Projektet genomfördes vid institutionen för Mekanik och Maritima Vetenskaper, under vårterminen 2025, och motsvarar 15 högskolepoäng.

Författarnas tack

Projektgruppen vill uttrycka sin djupa tacksamhet till alla som bidragit med stöd under arbetets gång. Ett särskilt tack riktas till examinator Valery Chernoray och handledare Isak Jonsson vid institutionen för Mekanik och Maritima Vetenskaper för deras ovärderliga vägledning och insikter. Vi vill tacka CASE-labbet för att vi fick tillgång till deras 3D-skrivare och fackspråket för deras feedback på rapportskrivandet. Vidare vill vi även tacka Laboratory of Fluids and Thermal Science för att vi fick tillgång till deras vindtunnel för testning av våra koncept. Slutligen vill vi tacka prototyplabbet för deras stöd och bidrag av material.

Abdirahman Dubad, Atrin Lakpour, Ayman Muhammed Ali, Mohammad Amiri, Mustafa Jaffari, Nils Van Leest , Göteborg, Maj, 2025

Ordlista och förklaring av begrepp

Detta är en ordlista över svenska begrepp där det engelska begreppet är mer veder-
taget, listade i alfabetisk ordning:

Airborne Wind Energy	Luftburen Vindenergi
Airfoil	Vingprofil
All y^+ treatment	All y^+ behandling
Brim	Kantstöd
Chord Length	Kordlängd
Constant density	Konstant densitet
Cylinder in Wing	En vinge med en cylinder inuti
Dimples	Knoppar, eller som refererat i text dimplor.
Drag	Luftmotstånd
Gyroid	Gyroidstruktur
Infill	Fyllning
Laminar	Laminär
Segregated flow	Segregerat flöde
Steady-state	Stationärt tillstånd
Tre cylinder	Tre cylindrar efter varandra
Unsteady-state	Icke stationärt tillstånd

Akronymer och beteckningar

Nedan är listan över akronymer och beteckningar som använts genom hela denna avhandling ordnade alfabetiskt:

A	Tvärsnittsarea
AWE	Airborne Windenergy
$A_{mekanisk}$	Bärande area
CAD	Computer-Aided Design
C_A	Areakoefficient
C_d	Dragkoefficient
$C_{d,eff}$	Effektiv dragkoefficient
C_{Re}	Reynolds koefficient
CFD	Computational Fluid Dynamics
F_d	Dragkraft
F_{exp}	Förväntad belastning
F_{max}	Maximal belastning
μ	Kinematiskt viskositet
NACA	National Advisory Committee for Aeronautics airfoils
∇	Divergens
Re	Reynolds tal
RANS	Reynolds-Averaged Navier-Stokes
ρ	Densitet
UHMWPE	Ultra High Molecular Polyethylene
URANS	Unsteady Reynolds-Averaged Navier-Stokes
U	Flödes hastighet
\vec{V}	hastighet
ω	Vinkelhastighet

Innehåll

Akronymer	ix
1 Inledning	2
1.1 Syfte	2
1.2 Avgränsningar	2
1.3 Bakgrund	3
1.3.1 Polyeten linor	3
1.3.2 Luftmotståndets minskning av cylindriska strukturer	4
2 Teori	7
2.1 Kontinuitets- och Navier–Stokes ekvationen	7
2.2 Reynoldstal	7
2.3 Definition av dragkraft	8
2.4 Vingprofiler och deras aerodynamiska egenskaper	8
2.5 Numeriska beräkningar	9
2.5.1 Stationärt och icke-stationärt flöde	10
2.5.2 Turbulensmodellering: RANS	10
2.5.3 Modellantaganden	11
2.6 Mekanisk Säkerhetsfaktor	11
3 Metod	12
3.1 Systembeskrivning	12
3.2 Diskretisering av linan	13
3.3 Beräkningsmetod för den effektiva dragkoefficienten	13
3.4 Numerisk modellering	14
3.5 Experimentella studier	18
3.5.1 3D-print	20
3.5.2 Vindtunnel	20
3.6 Mekanisk säkerhetsfaktorer	21
4 Resultat	22
4.1 Ackumulerad dragkraft	22
4.2 Total dragkraft från cylinder	23
4.3 Mekanisk analys	26
5 Diskussion & Slutsats	28
5.1 Diskussion	28

5.2 Slutsats	30
6 Vidare forskning	31
7 Bidrag	32
Litteraturförteckning	33
A Bilagor	I

1

Inledning

Världen står inför ett alltmer akut och ständigt växande behov av energi för att driva samhällets utveckling, samtidigt som trycket ökar för att hitta hållbara alternativ som kan möta globala utmaningar. Klimatförändringar och det ohållbara beroendet av fossila bränslen har gjort förnybara energikällor till en central del i omställningen till en hållbar framtid. Enligt Internationella energioorganet stod förnybara energikällor tillsammans med kärnkraft för 80 % av ökningen i global elproduktion under 2024, och bidrog sammantaget till 40 % av den totala elproduktionen (IEA, 2024). Bland de många alternativen har vindkraft etablerat sig som en viktig och snabbt växande lösning. Detta på grund av dess potential att leverera ren energi i stor skala. Utvecklingen inom vindkraftsteknologin går i snabb takt, driven av både tekniska framsteg och ett globalt engagemang för att producera energi utan att påverka klimatet (IEA, 2023).

Många företag i världen arbetar för att förfinas och förbättra teknologin för att maximera dess effektivitet och tillgänglighet. Fokuset ligger i att designa mer effektiva och hållbara vindturbiner som optimerar energiproduktionen. Utöver de traditionella vindkraftverken utforskas andra metoder, såsom luftburna vindturbiner (AWE). Vilket eliminerar behovet av infrastruktur och kan dra nytta av kraftigare, mer stabila vindar på högre höjder. Kitemill är ett av de företag som använder sig av denna typ teknik, som har utvecklat en teknik baserad på en drake (Kitemill, 2024). Deras produkt är en luftburen konstruktion som är kopplad till marken via en lina som driver en generator och utnyttjar vindens kraft för att generera elektricitet.

1.1 Syfte

Projektets syfte är att genom experimentella, analytiska och numeriska metoder, undersöka lösningar för att reducera de negativa effekterna från linan.

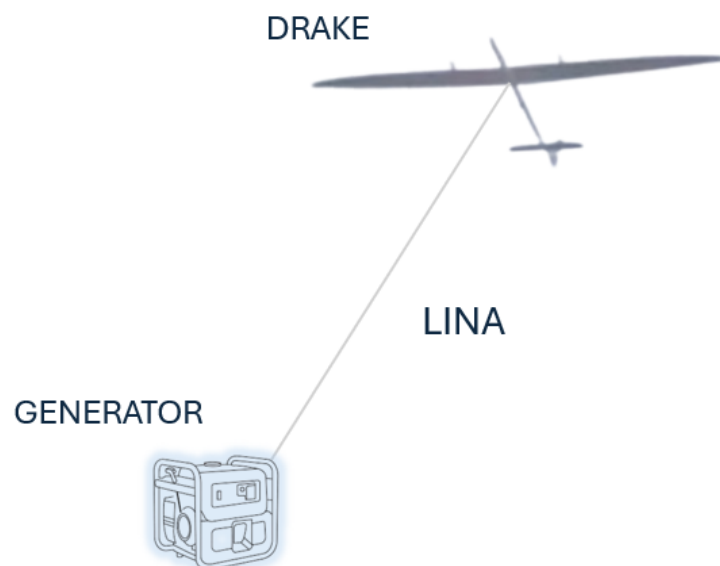
1.2 Avgränsningar

Detta projekt fokuserar uteslutande på linan och exkluderar resten av systemet från analysen. För att kunna simplificera problemet analyseras en representativ sektion av linan i stället för dess fullständiga längd. Vidare tar projektet inte hänsyn till hur energin överförs till elsystemet eller hur den lagras, eftersom fokuset ligger bara på linans aerodynamiska prestanda. Undersökningen kommer att genomföras genom

vindtunneltestning, numeriska simuleringar och användning av tabulerad data. Inget fälttest kommer att utföras.

1.3 Bakgrund

Projektet utgår ifrån ett samarbete med Kitemill. Kitemill är ett norskt företag som specialiserat sig inom utvecklingen av Airborne Wind Energy (AWE). Den befintliga lösningen fungerar genom en autonomt styrd drake som är kopplad till en generator på marken via en flätad lina gjord av högdensitetspolyeten (UHMWPE) (Kitemill, 2024; Fagiano m. fl., 2022). När draken rör sig genom luften, dras linan åt och generatoren producerar elektricitet. se Figur 1.1.



Figur 1.1: Representation av AWE system.

Luftmotståndet har en negativ påverkan på systemets totala effektivitet. Det minskar drakens rörelsehastighet och därmed reducerar den mängd energi som kan utvinnas. Enligt Kitemill utsätts linan för hastigheter mellan cirka 50 och 60 m/s på höjder upp till 600 m, vilket genererar betydande dragkraft. Linan etablerades ha en diameter på 3 mm i nuvarande prototypen. Luftmotståndet från linan är den primära faktorn som påverkar den lägsta vindhastigheten vid vilken systemet kan producera energi.

1.3.1 Polyeten linor

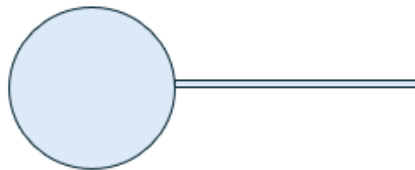
I de aktuella AWE-system som finns idag existerar en rad olika linor tillgängliga. Bland dessa är högmodulär polyeten (HMPE) (Ropes, 2025) det mest använda materialet och detta är på grund av hållfasthet i förhållande till vikt.

Det finns flera varianter av polyetenbaserade linor, där de mest framstående är SK99, SK78, SK75 och DM20 (Ropes, 2025). SK99 används i dynamiska tillämpningar där brottstyrka och låga vikt är avgörande som till exempel i AWE-system. SK78 är lämpad i både dynamiska och semi-statiska sammanhang, där en balans mellan styrka och deformations resistans är nödvändigt. SK75 är mest lämpad för statiska laster som permanenta förtöjningar. DM20 lik SK75 är lämpad för långvariga statiska tillämpningar som permanenta förtöjningar, men DM20 har bättre krypmotstånd vilket gör den perfekt för AWE-system som kräver stabilitet under konstant belastning över tid.

1.3.2 Luftmotståndets minskning av cylindriska strukturer

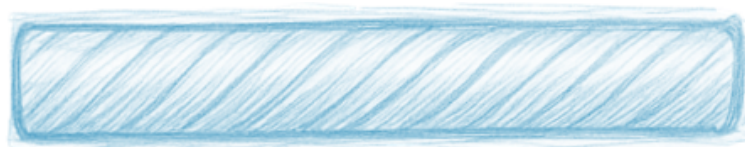
Tidigare studier har utforskat metoder för att minska luftmotståndet hos cylindriska strukturer, vilket är relevant för ett AWE-system som får energiförlust från sin lina.

En plan skiva placerad bakom en cylinder kan minska luftmotståndet med cirka 40 procent genom att förskjuta flödesseparationen nedströms (Frolov och Ha, 2023), se Figur 1.2.



Figur 1.2: Bilden visar ett 2D perspektiv av en cylinder med platta.

En annan studie visade att spiralformade utskott på en cylinders yta kan reducera luftmotståndet med cirka 30 procent, se Figur 1.3, (Dao m. fl., 2023). Dessa mönster dämpar vortexbildningen, som i sin tur minskar motståndet. Studien utfördes på en stel cylinder i vindtunneltest.



Figur 1.3: Spiral utformade utskott på cylinder.

En forskning utförd av (Fei Yan och Wang, 2021) har undersökt hur en dimplad yta (*dimpled surface*) på en cylinder kan reducera motståndet genom att påverka vortexbildningen. Genom numeriska simuleringar och experimentella mätningar analyserades effekterna av dimplarna. Vid ett Reynolds-tal (Re) på 1×10^5 reducerade dimplarna motståndet med upp till 19 procent jämfört med en slät cylinder.



Figur 1.4: Bilden visar exempel på en dimplad cylinderdesign.

I studien (McTavish m. fl., 2020) analyseras de aerodynamiska egenskaperna hos brokablarna med olika ytkonfigurationer genom vindtunneltestning. Flera kabelmodeller undersöktes för att mäta luftmotståndet och dragkraften vid varierande vindhastigheter, vinklar och turbulensnivåer. Resultaten visar att ytkonfigurationerna påverkar krafterna.

En ytterligare studie har undersökt en design som utgår från dimplarna på cylinderformade kroppar under olika testförhållanden. Dessa studier inkluderar, Fei Yan och Wang (2021) som kombinerade numeriska flödessimuleringar med experiment i en cirkulerande vattenbassäng där flödet visualiserades med partikelbildsvelocimetri. Tan m. fl. (2016) använde tredimensionella simuleringar som validerades genom vindtunnelexperiment på liknande dimplade cylindrar. Dandan m. fl. (2021) genomförde vindtunnelexperiment vid olika vindhastigheter, där flödet observerades med hjälp av rökvisualisering. Zhou m. fl. (2015) rapporterade modelltester i en vattenbassäng, där en cylinder med och utan dimple testades under vatten vid olika hastigheter. Slutligen undersökte Butt m. fl. (2014) cylindrar med utåtstående hexagonala dimples i en vindtunnel, där de mätte bakströmmens hastighetsprofiler och på som i förra studie använde rök för flödesvisualisering. En sammanställning av samtliga studiers dragreducering kan ses i Tabell 1.1.

Tabell 1.1: Studier av dragreduktion.

Studie (år, metod)	Reynolds tal	$C_{d,cylinder}$	$C_{d,dimplad}$	Dragreduktion (i %)
Yan et al. (2021, CFD/PIV)	1.0×10^5	1.242	1.006	19.0%
Tan et al. (2016, vindtunnel)	6.0×10^4	0.955	0.896	6.17 %
Dandan et al. (2019, vindtunnel)	1.3×10^5	0.2247	0.0283	87.28 %
Bo Zhou et al. (2015, vattenbassäng)	4.0×10^4	1.115	0.915	18.0 %
U. Butt et al. (vindtunnel)	4.0×10^4	1.2	1.05	12.5 %

Det är dock värt att notera att resultaten från Dandan m. fl. (2021) avviker tydligt från andra studier. Rapporten visar att dragkoefficienten för en cylinder täckt med utåtgående dimples kan minska till så lågt som $C_d = 0.0201$ vid 25,5 m/s och ner till $C_d = 0.0271$ vid 7,4 m/s. Detta leder till ovanligt hög dragreduktion jämfört med övriga studier, där C_d minskningen för motsvarande konfigurationer är betydligt lägre.

En möjlig förklaring till de låga koefficienterna är att de uppmätta dragkrafterna var mycket små. Dragkraften F_d kan uppskattas till endast 0,016 N vid 7,4 m/s och 0,14 N vid 25,5 m/s. Vid så låga kraftnivåer finns en betydande risk att mätinstrumentens noggrannhet inte är tillräcklig, vilket kan leda till mätosäkerhet och därmed påverka resultaten. Dessa begränsningar innebär att resultaten bör tolkas med försiktighet. Däremot anses konceptet fortfarande vara av intresse då andra studier indikerar att dimples kan vara en effektiv lösning.

2

Teori

I det här avsnittet presenteras den teoretiska grunden för projektet, med fokus på strömningslära, aerodynamik och mekanik. Centrala begrepp som styrande ekvationer, dragkraft, vingprofiler och turbulensmodeller presenteras, liksom grunderna i CFD och repmekanik som används för att analysera krafterna i systemet.

2.1 Kontinuitets- och Navier–Stokes ekvationen

Kontinuitetsekvationen beskriver att massan är bevarad i ett flöde, det innebär att massan som strömmar in i ett område måste också strömma ut, se ekvation 2.1.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V}) = 0 \quad (2.1)$$

$$\nabla \cdot (\rho \vec{V}) = \frac{\partial}{\partial x}(\rho u) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w)$$

För inkompressibelt flöde gäller att densiteten är konstant, dvs. $\frac{\partial \rho}{\partial t} = 0$ samt $\nabla \rho = 0$, vilket innebär att kontinuitetsekvationen kan skrivas som

$$\nabla \cdot (\rho \vec{V}) = \rho(\nabla \cdot \vec{V}) = 0$$

Eftersom $\rho \neq 0$ följer direkt att

$$\nabla \cdot \vec{V} = 0.$$

Navier–Stokes ekvationerna beskriver rörelsen hos en viskös vätska. Det är Newtons andra lag tillämpad på ett vätskeelement, där man tar hänsyn till krafter från tryck, viskositet och eventuella externa krafter, se ekvation 2.2 (Garvin, 2023).

$$\rho \left(\frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + (\vec{V} \cdot \nabla) \vec{V} \right) = -\nabla p + \mu \nabla^2 \vec{V} + \rho \vec{g} \quad (2.2)$$

2.2 Reynoldstal

När en fluid strömmar förbi ett cylindriskt objekt uppstår komplexa flödesmönster som påverkas av fluidens hastighet, densitet och viskositet samt diameter. De tidigare nämnda egenskaperna är avgörande faktorer och representeras som Reynoldstal (Re), vilket framgår i ekvation 2.3.

$$Re = \frac{\rho U D}{\mu} \quad (2.3)$$

Ett lågt Reynoldstal innebär att viskösa krafter dominerar och flödet blir laminärt, medan ett högt Reynoldstal innebär att tröghetskrafterna dominerar och flödet blir turbulent.

Flödesregimerna runt en cylinder kan delas in i tre huvudkategorier beroende på Reynolds tal: laminärt flöde ($Re < 10^3$), där C_D är relativt högt men minskar när Re ökar; övergångsregion ($10^3 < Re < 10^5$), där C_D minskar gradvis när flödet övergår från laminärt till turbulent; och turbulent flöde ($Re > 10^5$), där C_D sjunker markant vid den så kallade kritiska övergången. Vid kritisk övergång skiftar gränsskiktet från laminärt till turbulent, vilket fördröjer separationen och minskar tryckdraget.

En viktig teoretisk modell för flödet runt en cylinder är potentialflöde, som beskriver friktionsfritt flöde med hjälp av strömfunktionen $\psi = U_\infty r \sin \theta - \frac{\lambda \sin \theta}{r}$, där U_∞ är friströmmens hastighet och λ är dubbelstyrkan (White, 2016). Enligt d'Alemberts paradox är netto dragkraften på en cylinder i ett idealt flöde noll, eftersom tryckkrafterna på fram- och baksidan balanserar varandra. I verkligheten orsakar dock fluidens viskositet ett tryckfall bakom cylindern, vilket resulterar i en dragkraft.

2.3 Definition av dragkraft

Dragkraft (F_d) är den kraft som utövas av en fluid som motverkar ett objekts rörelse. Dragkraften påverkas av dragkoefficienten, tvärsnittsarean, densiteten och hastigheten. Vid laminärt flöde ökar dragkraften linjärt med hastigheten och vid turbulent ökar dragkraften kvadratisk.

$$F_d = \frac{1}{2} C_d \rho U^2 A \quad (2.4)$$

Dragkoefficienten (C_d) kan ses som ett mått på hur strömlinjeformad en kropp är. Ju lägre C_d , desto lägre motstånd i flödet.

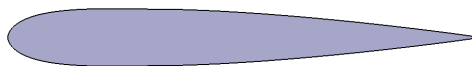
2.4 Vingprofiler och deras aerodynamiska egenskaper

Vingprofiler är tvådimensionella tvärsnittsformer som används för att styra luftflödet kring en kropp. Till skillnad från runda eller kantiga objekt är luftprofiler formgivna för att låta luftströmmen följa ytan så länge som möjligt. Det minskar tryckskillnader mellan fram- och baksida, vilket leder till lägre dragkraft.

En vingprofil har en *framkant* (den del som först möter luftströmmen), *bakkant* (den spetsiga avslutningen) och *kordlinje*, som är en rät linje mellan fram- och bakkant. Avståndet längs denna linje kallas *kordlängd*. Tjockleken på profilen uttrycks vanligtvis som en andel av kordlängden.

En serie vingprofiler är NACA-serien (National Advisory Committee for Aeronautics). Profilen NACA0012 är ett vanligt exempel och har en symmetrisk form, vilket innebär att dess översida och undersida är identiska vilket framgår i Figur 2.1. Den har en maximal tjocklek motsvarande 12 % av kordlängden. Eftersom den är symmetrisk genereras ingen lyftkraft vid noll anfallsvinkel, men luftmotståndet är lågt tack vare den strömlinjeformade geometrin (Airfoil Tools, 2025). Simpsons formel används för att kunna approximera arean för vingprofilen, se ekvation 2.5 (Larsson, 2022).

$$\int_a^b f(x) dx \approx S_n = \sum_{i=1}^n \frac{f(x_{i-1}) + 4f\left(\frac{x_{i-1}+x_i}{2}\right) + f(x_i)}{6} \Delta x_i. \quad (2.5)$$



Figur 2.1: Exempel på NACA-0012 vingprofil.

Den aerodynamiska fördelen med en vingprofil jämfört med exempelvis en cylinder är att luftströmmen separeras senare, vilket minskar det turbulenta området bakom kroppen. Detta område kallas *vak*, och kännetecknas av virvlar och tryckförluster. Ett mindre vak innebär lägre tryckdrag och därmed en lägre dragkoefficient (C_d), vid motsvarande flödesförhållanden.

2.5 Numeriska beräkningar

Computational Fluid Dynamics (CFD) är ett numeriskt verktyg som används för att simulera och analysera strömningar av vätskor och gaser kring fasta kroppar. Metoden bygger på att Navier–Stokes-ekvationerna löses med hjälp av datorbaserade approximationer, se ekvationer 2.1 och 2.2. För att kunna lösa dessa ekvationer diskretiseras flödesdomänen i små finita element, även kallat mesh, där varje element beräknas individuellt.

Med hjälp av CFD kan man få detaljerad information om tryckfält, hastighetsfördelning, gränsskiktutveckling och krafter såsom drag eller lyft. Detta gör tekniken särskilt användbar när fysiska experiment är svåra, dyra eller otillräckliga.

Eftersom verkliga flöden ofta är turbulenta, tidsberoende och påverkas av komplex geometri, används förenklade fysikaliska modeller för att göra beräkningarna hanterbara. Dessa modeller styr bland annat hur turbulens behandlas, om flödet antas förändras över tid, samt om densiteten hålls konstant eller tillåts variera. I nästkommande avsnitt beskrivs de vanligaste antagandena och modellvalen som används i teknisk CFD-analys.

2.5.1 Stationärt och icke-stationärt flöde

Ett flöde kan modelleras som stationärt eller icke-stationärt. I ett stationärt flöde förändras flödets egenskaper inte med tiden. Detta används när man är intresserad av ett jämviktstillstånd, till exempel med konstant in- och utflöde. Stationära simuleringar är mindre beräkningskrävande.

Ett icke-stationärt flöde innebär att flödets egenskaper varierar över tid. Detta är nödvändigt för att kunna fånga tidsberoende fenomen som virvelavlösning eller oscillerande krafter. Unsteady simuleringar kräver betydligt mer beräkningstid.

2.5.2 Turbulensmodellering: RANS

RANS (Reynolds-Averaged Navier-Stokes) innebär att flödet delas upp i ett medelvärde och en fluktuerande del. Det medelvärda flödet löses direkt, medan turbulenta effekter modelleras. RANS-ekvationer används för att modellera den turbulenta strömmen runt cylindern och vingarna i detta projekt, vilket gör att simuleringen blir enklare och snabbare att lösa. Detta är homogeniseringen av Naviers-Stokes-ekvationen för att hantera de aktuella värdena för flödvariabler. För ett inkompressibelt flöde ges de grundläggande styrekvationerna enligt följande (Fei Yan och Wang, 2021):

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (2.6)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_i \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{1}{Re} \cdot \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \quad (2.7)$$

u_i är hastighetskomponenten i riktning x_i , där $i, j = 1, 2$ i två dimensioner, så att $u_1 = u$ och $u_2 = v$ är de horisontella och vertikala hastighetskomponenterna. Vidare är t tiden, p trycket och $Re = \rho U_\infty D / \mu$ är Reynolds-talet, där ρ är fluidens densitet, U_∞ är inflödehastigheten, D är cylinderdiametern eller vingens chord-längd, och μ är den dynamiska viskositeten.

RANS-ekvationerna, som används för att beskriva turbulenta flöden, erhålls genom att tidsmedelvärdera Navier-Stokes-ekvationerna: Vanliga turbulensmodeller inom RANS:

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (2.8)$$

$$\frac{\partial \rho \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial \rho \bar{u}_i \bar{u}_j}{\partial x_j} = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \mu \nabla^2 \bar{u}_i - \frac{\partial \rho \overline{u'_i u'_j}}{\partial x_j} \quad (2.9)$$

$$u'_i = u_i - \bar{u}_i, \quad u'_j = u_j - \bar{u}_j \quad (2.10)$$

Här \bar{u}_i är den tidsmedelsvärderade hastigheten, u'_i och u'_j är de tidsvarierande hastighetskomponenter och $-\rho \overline{u'_i u'_j}$ är Reynolds-spänningstermen. RANS-systemet blir icke-slutet på grund av denna term och därför krävs Boussinesqs antagande för en

turbulensmodell för att stänga ekvationerna. Cylindrar och vingar har en stor hastighetsgradient i gränsskiktet och därför ansågs att SST (Shear Stress Transport) $k - \omega$ -modellen är ett lämplig val att använda i detta projekt Fei Yan och Wang, 2021. Turbulent kinetisk energi (k) och dissipationshastighet (ω) ingår i modellen:

Vid modellering beskrivs gränsskiktet som ett mått för att mäta avståndet från väggen till gränsskiktets yta, detta kallas för $Y+$ värdet. Detta värde har ingen dimension och används för att effektivt beskriva gränsskiktet. $k-\omega$ -modellen är bra för vägnära flöden och separation, men känslig för randvillkor. Modellen $k-\omega$ ger även bättre noggrannhet i områden med tryckfall och separation, vilket är viktigt om man analyserar dragkraft eller vakbeteende. Valet av turbulensmodell påverkar framför allt hur väl vägnära flöden och separation förutsägs.

2.5.3 Modellantaganden

Konstant densitet i ett flöde är ett vanligt antagande när hastigheterna är låga ($Mach < 0.3$) och densitetsvariationer är försumbara. Detta förenklar ekvationerna utan större precisionstapp (White, 2016). Ett annat antagande är kompressibelt flöde och används vid högre hastigheter eller vid stora temperaturvariationer, där densiteten varierar i betydande grad och påverkar tryckfältet. Viskositet är avgörande för att modellera gränsskikt, separation och friktion. Viskösa modeller används i praktiskt taget alla ingenjörssapplikationer där friktion spelar roll. Icke-viskösa modeller bortser från viskositet och används främst i teorin eller vid mycket höga Reynolds tal, då viskositetsverkan begränsas till mycket tunna lager. Att inkludera viskositet gör det möjligt att beräkna friktionsdrag, väggskjuvspänningar och korrekt modellera gränsskikt. En icke-viskös modell kan ge en överförenklad bild där väsentliga fenomen som separation och vakbildning uteblir, vilket gör den olämplig för tekniska tillämpningar där dragkraft är relevant.

2.6 Mekanisk Säkerhetsfaktor

Vid dimensionering av en lina ska de mekaniska egenskaper beaktas, med särskilt fokus på säkerhetsmarginaler. En viktig parameter för detta projekt är säkerhetsfaktorn för linan, och den beskrivs som kvoten mellan den förväntade- och maximala belastningen, se ekvation 2.13. Den visar hur mycket starkare en komponent såsom en lina är jämfört med den maximala belastningen som den utsätts för.

$$\text{Säkerhetsfaktor} = \frac{F_{exp}}{F_{max}} \quad (2.11)$$

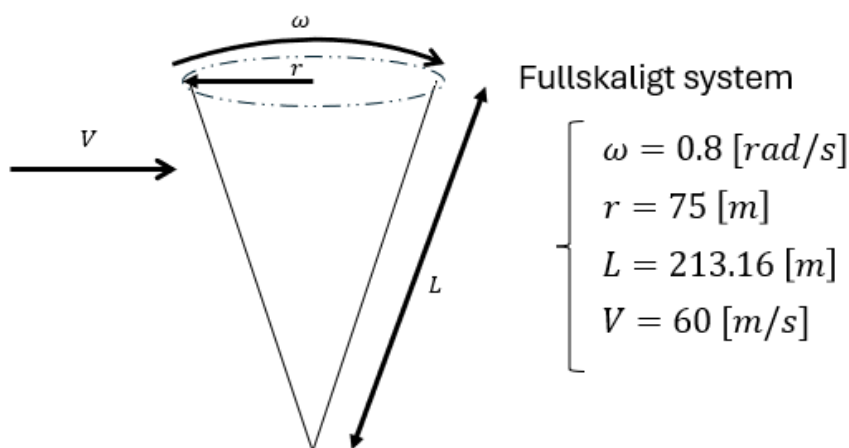
3

Metod

Projektet inleddes med att definiera systemets parametrar och diskretisera linan, vilket möjliggjorde beräkning av ackumulerade krafter längs dess längd. Därefter analyserades olika geometrier i Python, CFD samt vindtunneltester av tillverkade geometrier genomfördes för att kunna jämföra resultaten. Slutligen genomfördes en mekanisk analys för att undersöka möjligheten att minska linans tvärsnittsarea.

3.1 Systembeskrivning

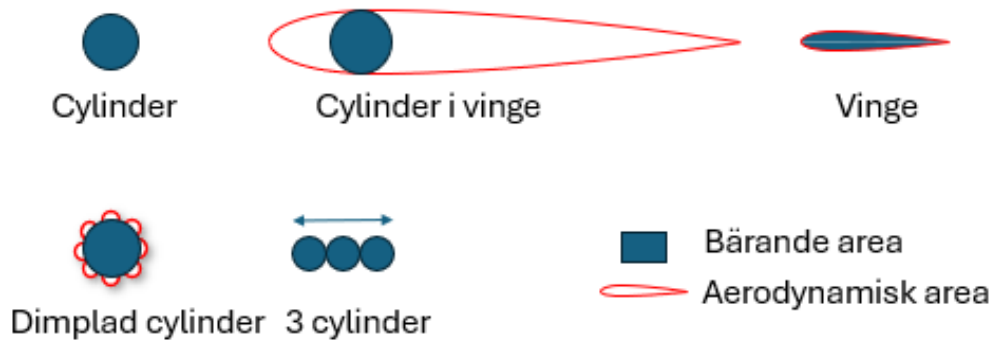
Linan antas röra sig i en cirkulär bana med given flyghöjd, flygradie och flyghastighet. Anfallsvinkeln för luftflödet mot linan antogs vara konstant 90 grader. Vidare antogs linan vara rak, fullt utsträckt och opåverkad av gravitationen och linans diameter till 3 mm, se Figur 3.1. Dessutom antogs luftens hastighet vara 60 m s^{-1} som högst, utifrån det beräknades vinkelhastigheten till 0.8 rad s^{-1} och linans längd till 213.16 m. Draken antas också dra med en kraft på 700 kg, även yttre påverkan såsom temperatur, vindbyar eller nederbörd försummas i arbetet.



Figur 3.1: Fullskaligt system med givna parametrar, vindhastigheten V , vinkelhastigheten ω , flygradien r och linans längd L .

Genom att analysera studier av olika geometrier för modellering undersöks hur aerodynamiska egenskaper påverkas. Formerna som undersöks i projektet är cylinder, cylinder i vinge, vinge, tre cylinder och dimplad cylinder, se Figur 3.2. Tvärsnittsarean beräknas för cylindern med 3 mm och används som utgångspunkt för samtliga geometrier. Ett undantag är cylinder i vinge som har en större aerodynamisk area,

men samma tvärsnittsarea. Cylindern fungerar som vår referensdesign och utgör grunden för jämförelse med våra andra figurer. Vingprofilen används som en jämförelse för en geometri med mycket bra aerodynamiska egenskaper.



Figur 3.2: Framtagna geometrier för modellering.

3.2 Diskretisering av linan

Python användes för att analytiskt beräkna dragkoefficienter för cylinder, cylinder i vinge och vinge. Data från CSV-filer användes och dessa skapades med sammanställd data från kapitel 7 i White (2016) samt från Airfoil Tools (2025). De innehåller Reynolds-tal och dragkoefficienter (C_d) för cylinder respektive NACA0012-profil. Filerna bidrar också med koordinater för NACA0012. Vidare diskretiseras kabeln i 214 element, motsvarande linans längd i meter.

Linans geometri beräknades trigonometriskt, och koordinater längs kabelns längd genererades. Elementens hastighet beräknas med $\omega = U/R$, (se Figur 3.1). NACA0012-koordinater bearbetades i särskilda funktioner där x -värden normaliseras och y -värden skalas relativt maximal tjocklek. Profilens area bestämdes med Simpsons formel, ekvation 2.5, varifrån kordlängd och tjocklek härleddes. Reynoldstal för varje element beräknades enligt ekvation 2.3. Dragkoefficienter (C_d) erhöles via interpolering från inläst data. Dragkraft beräknades för varje element och summerades för både cylinder och vinge. Graferna för ackumulerad dragkraft skapades med hjälp av funktionen *cumulative sum* från biblioteket *numpy* i Python.

3.3 Beräkningsmetod för den effektiva dragkoefficienten

För att ta hänsyn till skillnaden mellan bärande area och aerodynamisk area för beräkning av drag mellan de olika geometrierna, se Figur 3.2, vid 60 m/s infördes variabeln $C_{d,eff}$, det effektiva värdet av C_d ,

$$C_{d,eff} = C_d(Re \cdot C_{Re})/C_A$$

där $C_d(Re \cdot C_{Re})$ är en funktion av C_d vars värde hämtas från Cd - Re värden. Denna metod använder geometrin cylinder som referens för beräkning av variabler.

Den karakteristiska längden definieras för varje geometri. För cylinder samt cylinder dimple används diameter, resterande geometrier använder kordlängd. Reynoldstalet för respektive geometri beräknas med hjälp av dess karakteristiska längd.

Formfaktorn C_{Re} är en faktor på differensen av reynolds-talet för relevant geometri och cylinder, exempelvis:

$$C_{Re} = Re_{airfoil} / Re_{cylinder}$$

Areakoefficienten, C_A , är en faktor vars avsikt är att definiera skillnaden mellan aerodynamisk area och bärande area, alltså

$$C_A = A_{mekanisk} / A_{aerodynamisk}$$

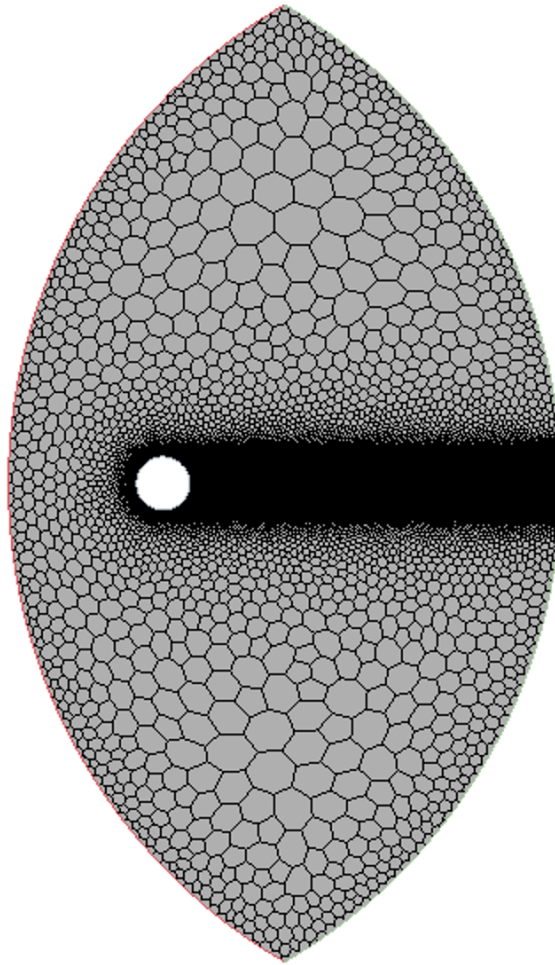
Applicering av denna metod till arbetet gav ett resultat som presenteras i Tabell 3.1.

Tabell 3.1: Egenskaper hos valda modeller.

Parameter	Cylinder	Cylinder i vinge	Vinge	Dimplad cylinder	Tre-cylindrar
Karakteristisk längd	3 mm	25 mm	9.27 mm	3 mm	5.22 mm
Reynolds längd	Diam	Kord	Kord	Diam	Kord
C_{Re}	1	8.33	3.09	1	1.74
C_A	1	0.137588	1	1	1
$C_{d,eff}$	$C_{d,eff} = C_d(Re \cdot C_{Re}) / C_A$				

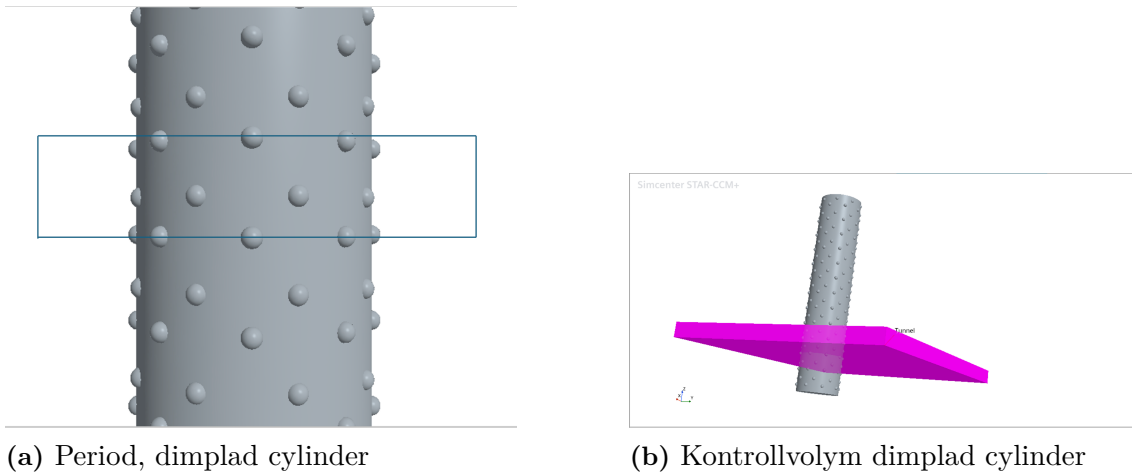
3.4 Numerisk modellering

Anledningen till att verifiera de tabulerade värdena för cylinder, vinge och cylinder i vinge var att bekräfta att den använda metoden var korrekt. Därför tillämpades en liknande metod för de andra geometrierna, vilket ökar sannolikheten för att de modelleras korrekt. För att verifiera och jämföra resultaten användes programmet *StarCCM+* version 2410.0001, build 19.06.009, för att utföra numeriska modelleringar. Programmet baseras på teorier inom *Computational Fluid Dynamics* (CFD). Samtliga geometrier, exklusive dimplad cylinder använder sig av en ellipsformad kontrolllyta och varvid intaget definierats med hastighetsvillkor, och uttaget som ett obestämt gränsvillkor. Geometrierna är höjdcentrerade men placerade något till vänster relativt till mittpunkten, för att tillåta vaken utvecklas i så hög grad som möjligt.



Figur 3.3: Figuren visar exempel på kontrolllyta, ellips, taget från *StarCCM+*.

För att minimera lösningstiden av modellerna simulerades samtliga geometrier, bortsett från dimplad cylinder, i två dimensioner. Dimplad cylinder simulerades i tre dimensioner, då den inte är symmetrisk. För att minska lösningstiden simulerades endast en period av den dimplade cylinderns mönster.



Figur 3.4: Figuren illustrerar en dimplad cylinder inklusive dess specifika mönsterkonfiguration.

De huvudsakliga modellerna som användes (*continua*) för att simulera flödet kring geometrierna var följande: Steady-state, implicit-unsteady, laminar, constant density, segregated flow, RANS, k-omega, gamma-theta, gamma-retheta samt all Y+ treatment.

Tabell 3.2: Tabellen presenterar de standardinställningar för meshern inställningar.

Typ	Bas storlek (m)
Cylinder	0,0025
Cylinder (URANS)	0,002
Wing	0,001
Cylinder in wing	0,001
Three cylinders	0,0005
Cylinder dimple	0,008

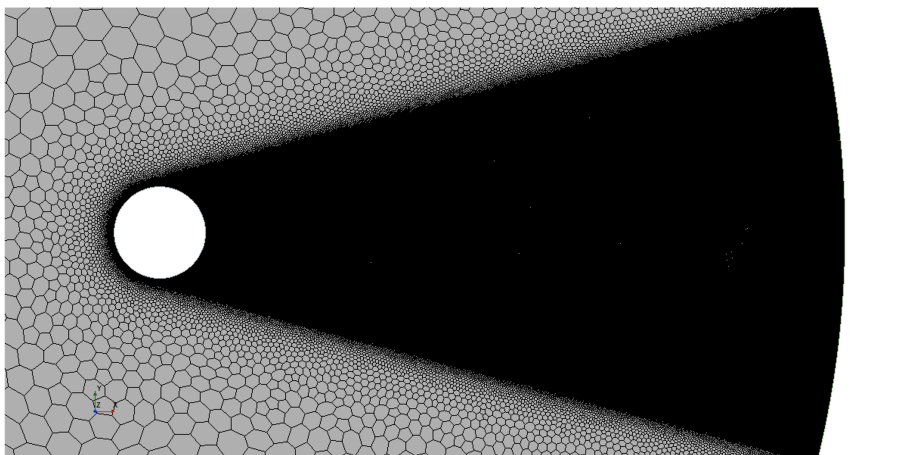
Eftersom cylindrar i grund och botten är ostabila (Ben och Dou, 2015) så utfördes även laminära samt URANS-modelleringar i försök att uppnå mer verklighetstroga resultat. URANS-modelleringar kräver högre mesh-upplösning och fler antal iterationer jämfört med steady-state och laminära modelleringar, som konsekvens är de därför mer tids- samt resurskrävande.

Tre modelleringar av URANS utfördes med justeringar på antal iterationer per tidssteg, tidssteg, samt antal element, se Tabell 3.3.

Tabell 3.3: Tabellen presentera URANS parametrar.

Försök	Tidssteg (s)	Iterationer / tidssteg	Antal element	Vak-vinkel (deg)	Simulerad tid (s)
1	0,0002	20	662535	0	0,332
2	0,0001	100	957427	0	0,0125
3	0,0001	100	786056	15	0,0374

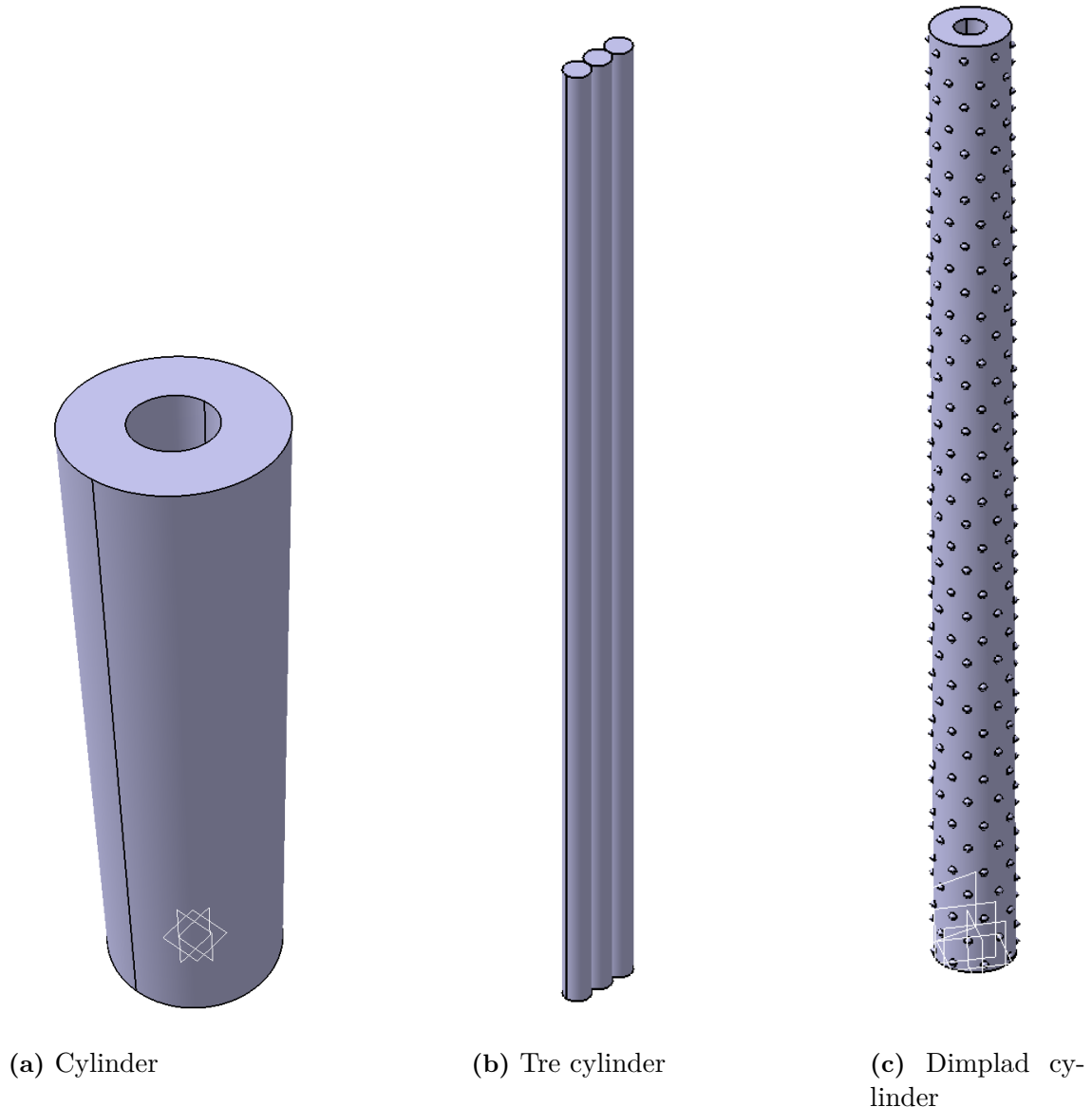
Simuleringarna stoppades automatiskt i det fall modelleringen konvergerade med minimala fluktuationer inom kontinuitet, X samt Y-momentum och C_d med minsta värde $1 \cdot 10^{-4}$

**Figur 3.5:** Figuren visar URANS cylinder försök 3 med vak-vinkel 15° .

En manuell mesh studie genomfördes för samtliga modelleringar med ändamålet att uppnå en balans mellan lösningstid och precision. Meshen ansågs vara godtagbar i det fall skillnaden i drag blev mindre än 1 %. Samtliga modeller har betydligt högre upplösning i området kring geometrin samt vaken, jämfört med resterande kontrolllyta eller kontrollvolym. Alla modelleringar har genomförts med en vakvinkel på 0 grader exklusive försök 3, cylinder URANS. Den numeriska modelleringen ansågs uppnå acceptabla resultat i det fall modelleringen konvergerade med minimala fluktuationer inom kontinuitet, X samt Y-momentum och dragkoefficient med minsta värde $1 \cdot 10^{-4}$ per iteration. För att dämpa fluktuationerna justerades URF-konstanten till ett lämpat värde. Se Figur 3.5 och A.19-A.29 för illustrationer av mesh.

3.5 Experimentella studier

I detta avsnitt presenteras de olika konceptmodeller som har konstruerats i 3D med hjälp av programvaran CATIA V5. Fyra huvudkoncept har modellerats: en cylinder, en dimplad cylinder, ihopkopplade tre cylindrar samt en ving baserad på vingprofilen NACA0012 Airfoil Tools, 2025. Dessa modeller presenteras i Figur 3.6.



Figur 3.6: Figuren illustrerar de tre koncepten som modellerades hjälp i CATIA V5.

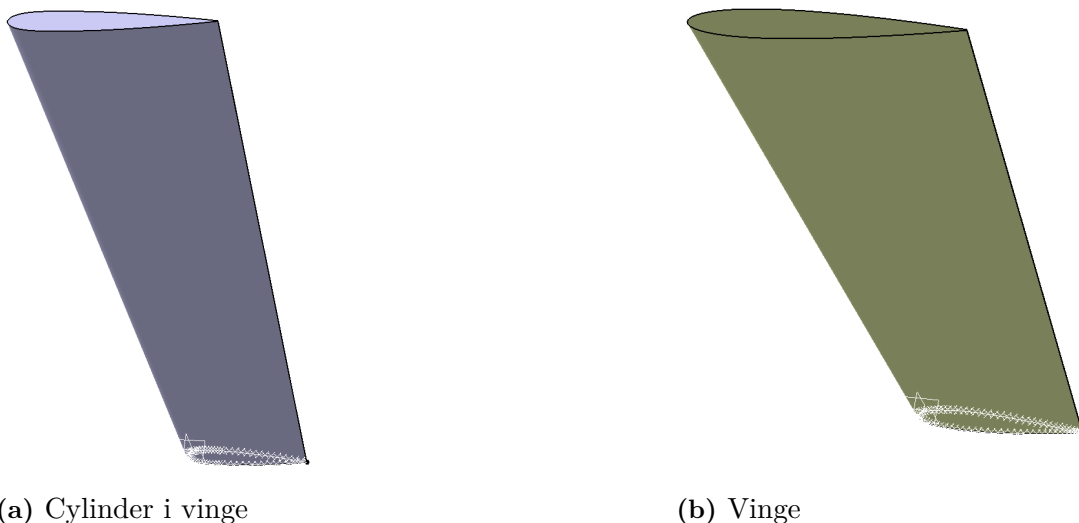
Modellerna anpassades till 3D-skrivarens begränsningar, eftersom skrivaren endast tillåter en maximal utskriftshöjd på 360 mm. Den vanliga och den dimplade cylindern har försetts att ha inre-diameter 12.5 mm för senare montering i vindtunnel. På grund av utskriftsbegränsningar och kravet på en dragkraft på 10 N, testades endast

den vanliga och den dimplade cylindern i vindtunnel. Cylinder i vinge och vinge testades inte i vindtunneln eftersom de hade varit för stora för att skalas och testas. Cylinder är den första modellen som skapades och är en enkel slät cylinder. Cylindermodellen utformades med en diameter på 31 mm och en längd på 360 mm, vid en flödehastighet på 20 m s^{-1} , för att dimensionera till hastigheten 60 m s^{-1} . Den cylindriska formen modellerades genom att skapa en cirkulär bas med diameter (D) på 31 mm och extrudera den till längd (L) på 120 cm.

Modellen cylinder-dimplad har samma diameter (D) på 31 mm och en längd (L) på 120 cm som den enkla cylindern för att möjliggöra direkt jämförelse. Mönstret med dimples skapades genom att först applicera det rektangulärt längs höjden och sedan rotera cirkulärt för att uppnå periodiskt mönster, se Figur 3.6c.

Konceptet med tre cylindrar utformades så att de är tangentkopplade och sammanfogade. Konceptet har en total diameter på 31 mm och därmed justerades diametern för varje enskild cylinder efter det. Linjära referenser användes för att säkerställa tangenterna och Trim-verktyget användes för att ta bort de inre delarna som överlappar. Sedan extruderades denna profil för att bilda en tredimensionell kropp som visar den aerodynamiska konfigurationen med tre sammanfogade cylindrar, se Figur 3.8b.

Vingen baserades på NACA0012-profilen och utformades för två koncept: cylinder i vinge och vinge. För att modellera dessa koncept hämtades koordinaterna för NACA0012-profilen från Airfoil Tools (2025). NACA0012 har en maximal tjocklek på 12 % relativt kord-längden där övre- och underdel är symmetriska. Profilen skalades sedan till en kord-längd på 75 mm och extruderades till en spännvidd på 1000 mm för att skapa en 3D-modell av vinge, se Figur 3.7.



Figur 3.7: Konceptet med vinge.

3.5.1 3D-print

Samtliga relevanta CAD-modeller har exporterats som `.stl`-filer och därefter importerats in i ett *slicer*-program, se A.30-A.31. För detta arbete har programmet *Prusaslicer* använts.

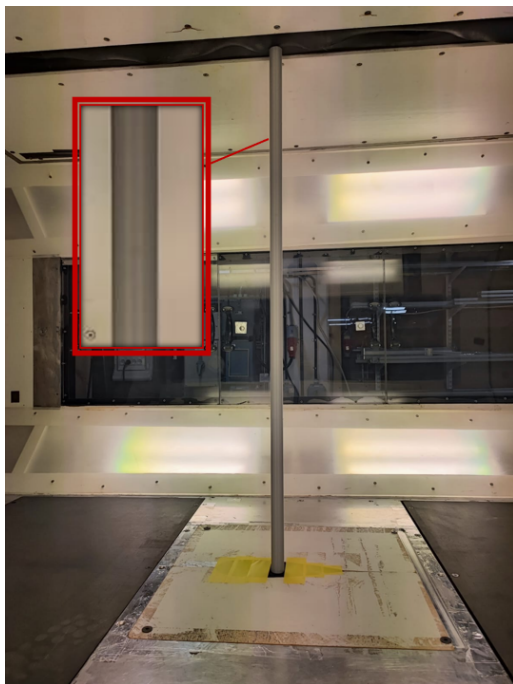
Modellerna på längden kopierades till ett flertal enheter med maxhöjd per enhet på 36 cm. Denna begränsning kommer från 3D-printern, Original Prusa XL - 5T Input Shaper 0.4 nozzle.

Inom programmet har en modifierad version av förinställningen 0.20 mm STRUCTURAL @XLIS 0.4 använts. De parametrar som justerades från standard är minimum perimeters till 5 lager, fill-pattern till gyroid, infill till 10 % med brim och support endast på plattan. Samtliga printade modeller skapades med addnorth PETG-filament.

3.5.2 Vindtunnel

Experimentet genomfördes i Chalmers L2 vindtunnel. Vindtunneln är en sluten lågturbulens tunnel med högsta möjliga hastighet på 60 m s^{-1} . Dimensionen på testvolymen är 1.8 m x 1.2 m x 3.0 m. Experimentet genomfördes vid hastigheter i ett intervall på 0 m s^{-1} till 25 m s^{-1} . Hastigheten ökades inkrementellt med 5 m s^{-1} i intervallet.

De tillverkade koncepten matades sedan in på ett ihåligt stålrör med diameter på 12 mm, röret fästes därefter på en platta i vindtunneln, se Figur 3.8. En FCO-510 micromanometer, Prandtlrör, sexkomponentvåg och programvaran LabView användes tillsammans för att presentera samt spara datan i textfiler.



(a) Slät cylinder



(b) Dimplad cylinder

Figur 3.8: Figuren illustrerar monteringen av cylindrarna i vindtunneln.

3.6 Mekanisk säkerhetsfaktorer

Enligt ekvation 2.4 framgår det att linans area också har en betydande inverkan på dragkraften, där en mindre area bidrar till lägre dragkraft. Därför genomfördes en mekanisk analys av linan för att undersöka om den är överdimensionerad. Data från Dyneemas datablad sammanställdes för SK99, SK78, SK75 och DM20 för 3 mm rep. Extrapolering utfördes för att analysera repens prestanda vid olika diametrar och bestämma minsta diameter som klarar den maximala belastning på 700 kg. När värdena extrapolerades användes lutningen för båda datapunkter minimum- och medelvärdesbrottstyrkan, för att estimeras ett värde för den minsta möjliga diametern under maximal belastning. Säkerhetsfaktorn för belastningen beräknades för att bedöma överkapacitet och möjliggöra mindre diameter med bibehållen säkerhet, se ekvation 2.11.

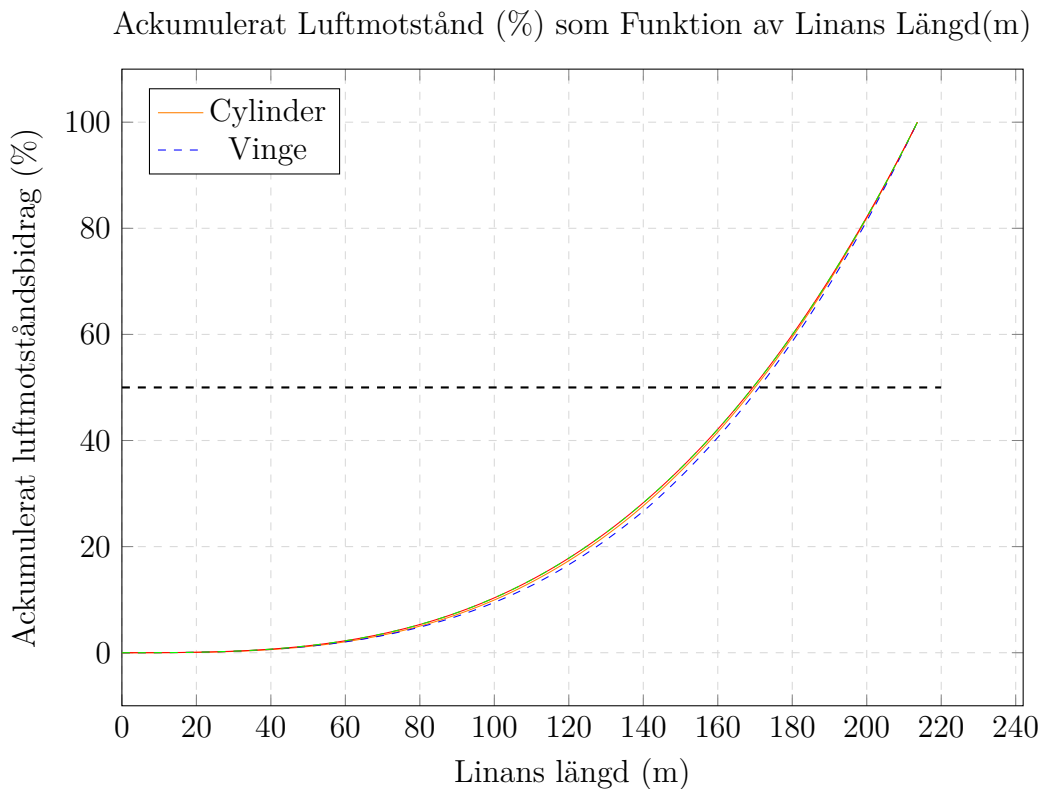
4

Resultat

Detta kapitel presenterar resultaten från den totala dragkraften av linan, de numeriska beräkningarna (CFD), den mekaniska analysen samt vindtunneltesterna tidigare beskrivits i projektet.

4.1 Ackumulerad dragkraft

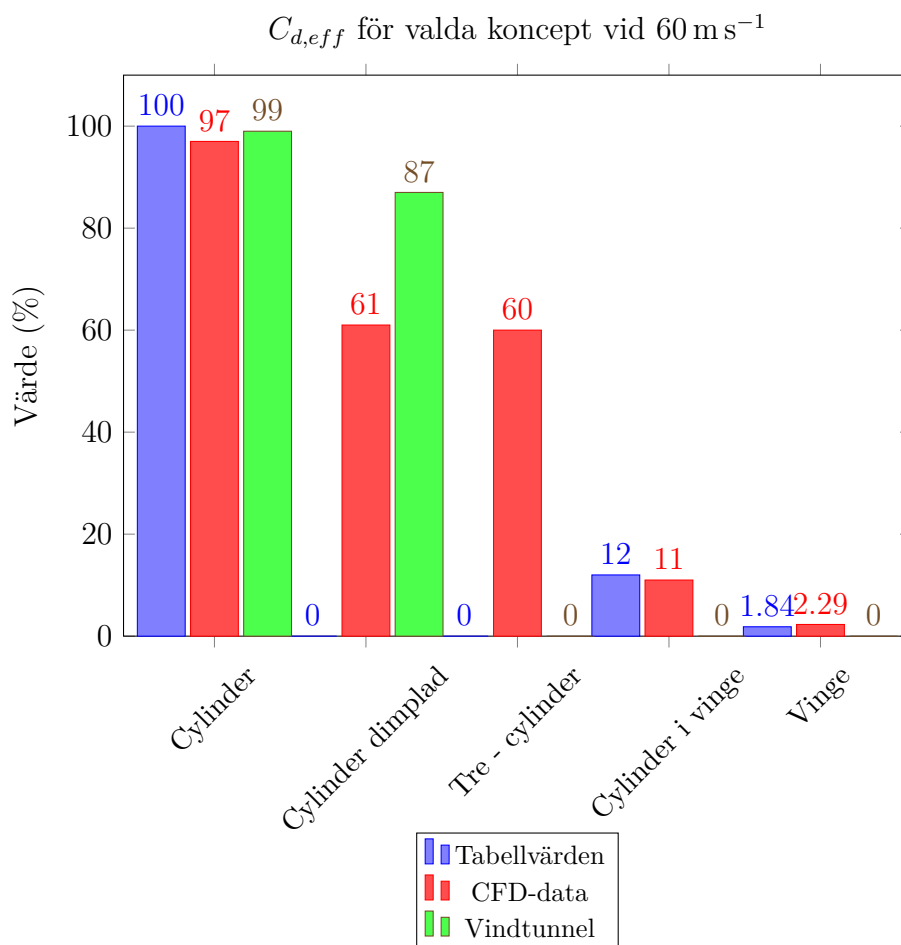
Grafen i Figur 4.1 visar hur dragkraften ackumuleras längs kabelns längd för de testade geometrierna. Den streckade horisontella linjen markerar den punkt där 50 % av den totala dragkraften har uppnåtts. Figur 4.1 visar att de cirka sista 40 meterna av kabeln bidrar med hälften av dragkraften för både cylinder och ving.



Figur 4.1: Samlad graf över hur den ackumulerade dragkraftens bidrag utvecklas längs linans längd.

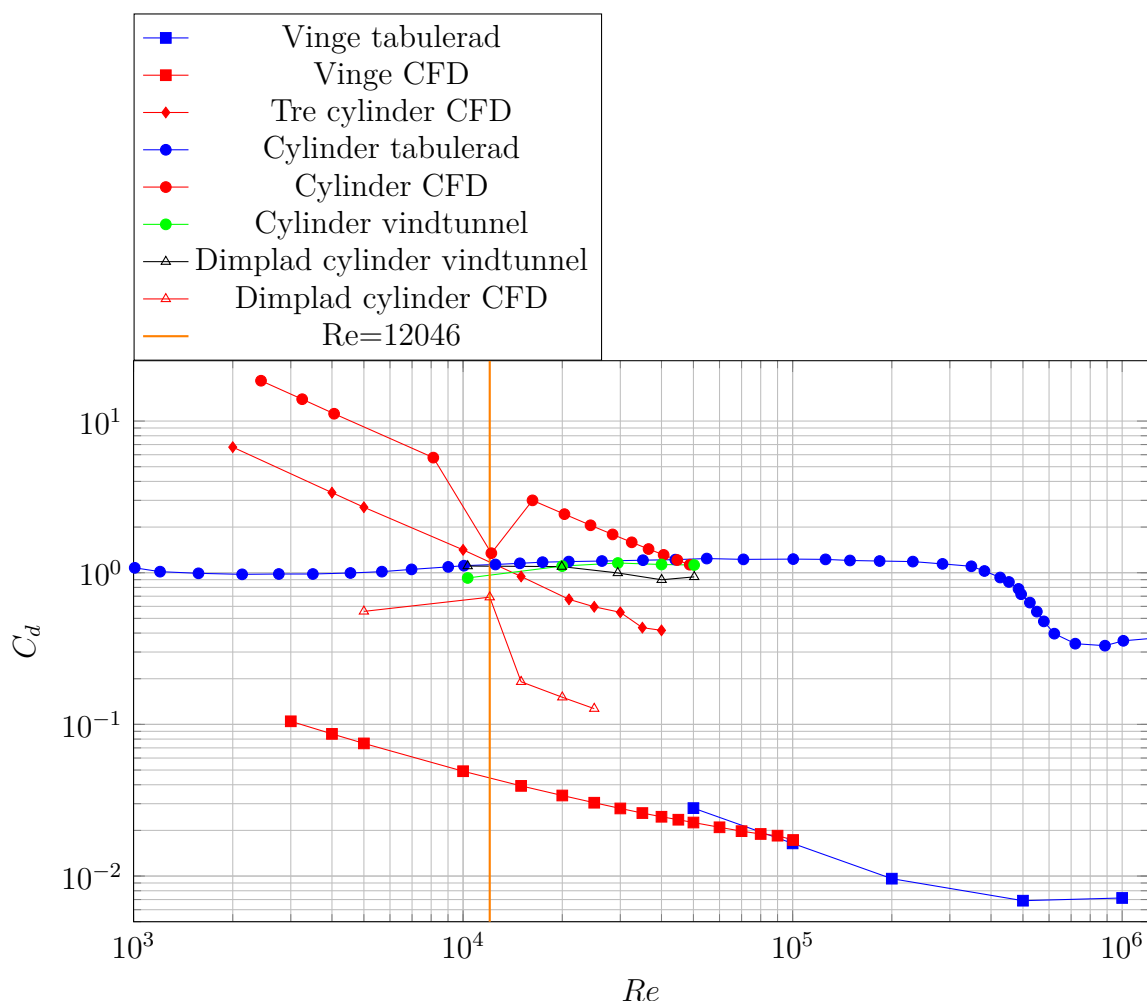
4.2 Total dragkraft från cylinder

Figur 4.2 visar ett stapeldiagram över de beräknade effektiva dragkoefficienterna $C_{d,eff}$ för olika geometrier vid en konstant vindhastighet på 60 m/s med 12046 Reynolds. Här inkluderas både enkla och sammansatta kroppar – från en cylinder till mer komplexa geometrier som cylinder i vinge. All CFD-data exklusive cylinder har erhållits via steady-state modelleringar, för cylinder användes laminar modellering. Cylindern med diameter 3 mm används som referens och får därmed värdet 100 %. Resterande värden visas som en andel av referencylindern, exempelvis cylinder i vinge $C_{d,eff}$ värde visas som 12 % av referencylindern, för tabell och 11 % för CFD-data. Dimplad cylinder och tre - cylinder saknar tabell-data i figuren då tabullerad data för dessa saknades. Från vindtunnelexperimentet hämtades värden för både den dimplade cylindern och cylindern. Den dimplade cylindern minskade $C_{d,eff}$ med 13 % i relation till de tabellvärden för cylindern. Experimentet visade en skillnad med 1 en procentenhet i $C_{d,eff}$ från tabellvärden mot cylindern samt en skillnad på 2 procentenheter i jämförelse med CFD-data. Resultatet tyder även på en differens i $C_{d,eff}$ på en procentenhet mellan tabell-värden och CFD-data för cylinder i vinge samt 0,45 procentenheter mellan datan för vinge.



Figur 4.2: Jämförelse mellan tabulerade värden, CFD-data och vindtunnelresultat vid $U = 60 \text{ m s}^{-1}$ för olika koncept.

Dragkoefficient (C_d) som Funktion av Reynolds Tal i Logaritmisk Skala



Figur 4.3: Figuren presenterar resultaten av hur dragkoefficienten (C_d) varierar som en funktion av Reynolds tal för olika koncept i en logaritmiska skala.

Figur 4.3 visar dragkoefficienten (C_d) som funktion av Reynolds tal i logaritmisk skala för samtliga geometrier. De inkluderade fallen består av tabellvärden för vingen samt dimplad och vanlig cylinder. Det ingår även CFD-resultat för samtliga geometrier, alla modelleringar genomfördes vid steady-state exklusive cylinder vid 12046 Re som simulerades laminar. Även vindtunnelresultat för cylinder och dimplad cylinder presenteras. Skillnader i lutning och nivå mellan kurvorna ger information om geometriernas dragkraft relativt mot varandra. Figuren visar en kombinerad version av Figur A.3-A.6 utifrån olika geometrier och tester, för enklare tolkning av värden.

Figur 4.5 tyder på att en cylindrisk lina vars sista 40 metrar byts ut mot cylinder i vinge resulterar till en minskning i total dragkraft på nära 50 %.

Effektiv-Dragefficient ($C_{d,eff}$) som Funktion av Reynolds Tal i Logaritmisk Skala

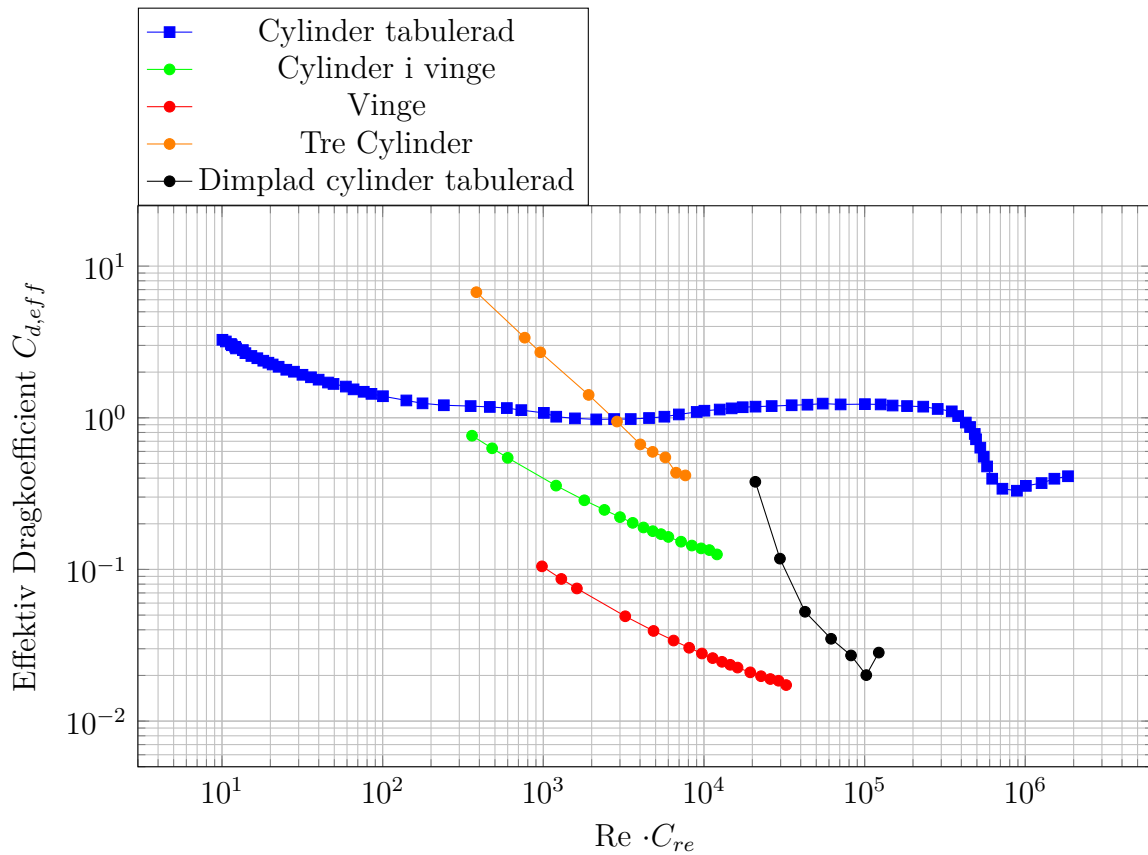


Figure 4.4: Figuren presenterar resultaten av hur dragkoefficienten ($C_{d,eff}$) varierar som en funktion av Reynolds tal för valda koncept.

Jämförelse av Totalt Dragkraft (N) för Cylinder och Kombination av Cylinder i Vinge och Cylinder

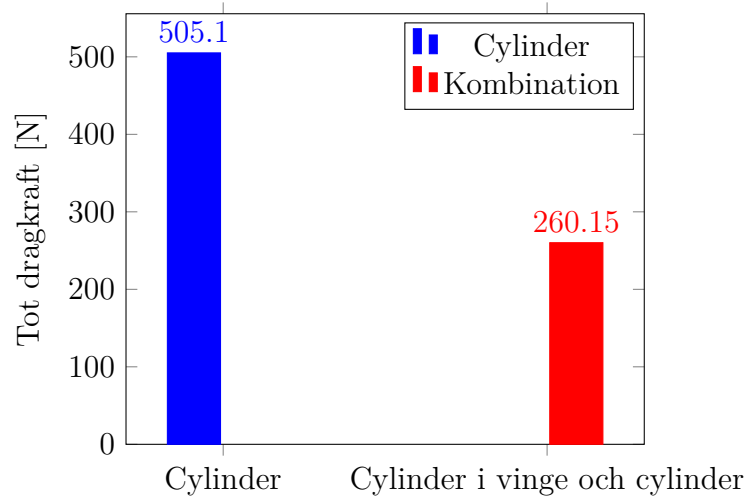


Figure 4.5: Total dragkraft för olika konfigurationer mellan cylinder och cylinder i vinge kombination för sista 40 m.

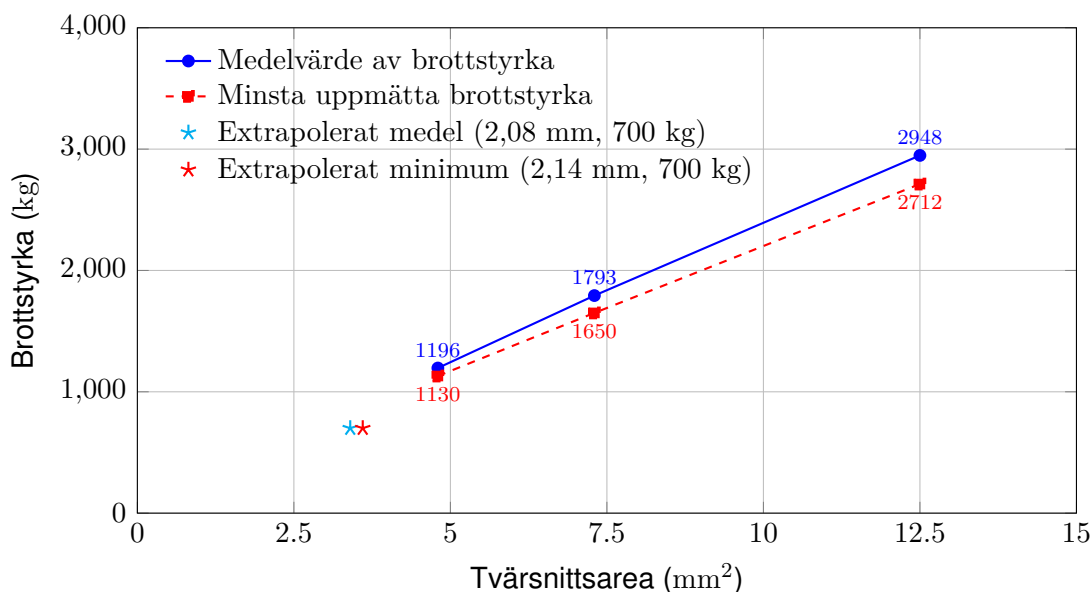
Tabell 4.1 visar resultatet av C_d , F_d samt totalt simulerad tid för respektive URANS körning. Det uppkom tydliga skillnader i resultat mellan respektive försök. Försök två samt tre simulerades i betydligt kortare tid jämfört med försök ett då antalet iterationer per tidssteg samt tidsstegen inte var identiska.

Tabell 4.1: Resultat från olika körningar av cylinder URANS

Försök	Simulerad tid (s)	C_d	F_d (N)
1	0.332	2.381	3.872
2	0.0125	3.134	5.097
3	0.0374	2.179	3.543

4.3 Mekanisk analys

I Figur 4.6 visas extrapolering av brottstyrka mot tvärsnittsarean för SK99 för 0-15 mm^2 . I grafen visas medelvärdet av brottstyrka, samt den minsta uppmätta brottstyrkan. Med medelvärde av brottstyrka menas den genomsnittliga värdet av den maximala spänning som materialet kan uthärda utan att deformeras dvs gå sönder. Minsta uppmätta brottstyrka menas den lägsta spänning som materialet garanterat kan uthärda innan plastisk deformation inträffar. Det extrapolerade medelvärdet för brottstyrkan är 2.08 mm vid en maximallast av 700 kg. Minimum extrapolerade brottstyrka observeras även till 2.14 mm . Graferna av extrapolering för SK78, SK75 och DM20 kan ses från Figur A.7-A.9.



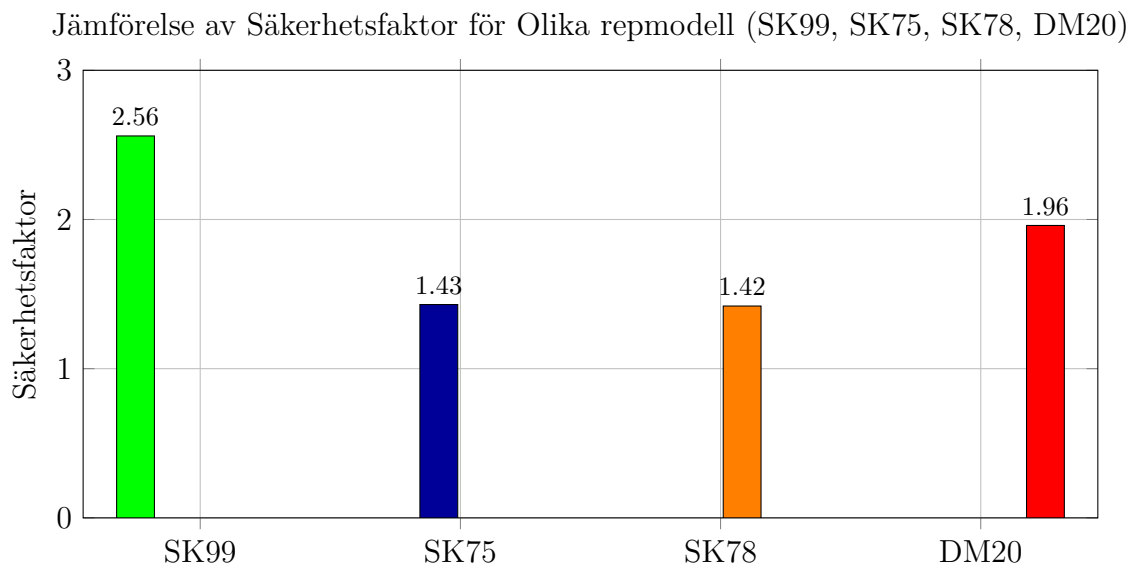
Figur 4.6: Extrapolering av brottstyrka som funktion av tvärsnittsarea för SK99 (inzoomat: 0–15 mm^2).

Tabell 4.2 sammanfattar extrapolerade värden för brottstyrka vid 700 kg för olika Dyneema[®]-material (SK99, SK75, SK78, DM20) inom intervallet 0–15 mm². Värdena inkluderar både medelvärde och minimum för diameter och tvärsnittsarea, där data för minsta brottstyrka saknas för DM20.

Tabell 4.2: Extrapolerade värden för brottstyrka vid 700 kg för olika Dyneema[®]-material inom intervallet 0–15 mm².

Material	Extrapolerat medelvärde (diameter, area)	Extrapolerat minimum (diameter, area)
SK99	2.08 mm ($\approx 3.40 \text{ mm}^2$)	2.14 mm ($\approx 3.60 \text{ mm}^2$)
SK75	2.70 mm ($\approx 5.73 \text{ mm}^2$)	2.78 mm ($\approx 6.07 \text{ mm}^2$)
SK78	2.65 mm ($\approx 5.52 \text{ mm}^2$)	2.74 mm ($\approx 5.91 \text{ mm}^2$)
DM20	2.37 mm ($\approx 4.41 \text{ mm}^2$)	Data Saknas

I Figur 4.7 presenteras säkerhetsfaktorerna för samtliga rep vid en diameter på 3 mm. Det kan noteras att SK99 uppvisar den högsta säkerhetsfaktorn med ett värde av 2.56. Därefter följer repet DM20 med en säkerhetsfaktor på 1.96. För repen SK75 och SK78 kan säkerhetsfaktorerna uppskattas till 1.43 respektive 1.42.



Figur 4.7: Säkerhetsfaktorer för ett 3 mm rep med SK99, SK75, SK78 samt DM20 specifikationer.

5

Diskussion & Slutsats

5.1 Diskussion

I detta projekt undersöktes metoder för att förbättra linans aerodynamiska egenskaper i ett AWE-system, med målet att minska den dragkraft som linan genererar. Resultaten visar att de negativa effekterna kan reduceras genom att modifiera linans ytkonfigurationer.

Enligt Figur 4.2 kan det fastställas hur olika geometrier påverkar de negativa effekterna i linan vid Reynold-tal på 12046. Vingen uppvisar den lägsta effektiva dragkoefficienten, följt av cylinder i vinge, tre cylindrar och slutligen dimplad cylinder. Vingen är en ideallösning då den minskar dragkraften mest procentuellt i relation till cylindern med 98.16 procentenheter för tabulerade data. Detta tyder på att den lägsta dragkraften, med samma tvärsnittsarea som en 3 mm cylinder, uppnås med hjälp av geometrin vinge.

Vingens design kan dock vara utmanande att implementera som lina i verkligheten utan att kraftigt försvaga dess mekaniska egenskaper. Detta är utmanande eftersom linan rör sig i komplexa banor, se Figur A.12. Linan vrider sig, vilket kan orsaka att vingprofilen förlorar sin aerodynamiska effektivitet eller skapar oönskade krafter, exempelvis sidokrafter som destabiliserar systemet. Att tillverka en lina med vingprofil är mer komplicerat än att producera en traditionellt flätad, rund lina eftersom vingformen måste vara konsekvent längs hela längden och ojämnheter som finns på grund av dyneema-linorna kan orsaka aerodynamiska störningar. Material som kolfiber eller kompositer kan användas, men de är dyrare och känsliga för utmattning samt skador vid långvarig användning.

Cylinder i vinge har effektiv dragkoefficient på 12 % respektive 11 %, vinge 1.84 % respektive 2.29 %, för de tabulerade och numeriska simuleringarna i ett flöde på 60 m s^{-1} . Eftersom geometrin vinge är strömlinjeformad är det möjligt att uppnå korrekta resultat med steady-state, inom numeriska modelleringar. Därmed är tabulerad data och numeriska resultat väldigt lika. Cylinder i vinge har samma funktionalitet som vinge, dock större effektiv dragkraft på grund av dess mer omfattande aerodynamiska area, se Figur (3.2). Tillverkningen av konceptet är relativt enkelt jämfört med vinge då den kan tillverkas som ett skal för linan.

Tre cylindrar har en minskad dragkraft på 60 %, jämfört med cylindern. Det är dock

svårt att bekräfta validiteten av resultatet då projektet inte kunnat sammanställa analytiska värden från andra studier eller utföring av en vindtunneltest av koncepten. Numeriska modelleringar utfördes endast vid steady-state.

Från numeriska simuleringar fick den dimplade cylindern ett relativt värde på 61 % i effektiv dragkoefficient jämfört med den tabulerade cylinderns värde. Vindtunnelexperimentet visade en minskning på 13 procentenheter för den dimplade cylindern. Detta går att jämföra med de fem studierna från Tabell 1.1, som gav resultat mellan 6.17-87.28 %. Studien med 87.28 % dragreduktion ansågs dock ha felaktiga resultat. Vindtunnelexperimentet och de numeriska värdena har en procentuell skillnad på 26 % för den dimplade cylindern. Anledningen till detta kan bero på flera faktorer, varav en är det sätt den dimplade cylindern modellerats i CFD. Vindtunnelvärdena för den dimplade cylindern är relativt lika med de andra studiers värden exklusive Dandan m. fl. (2021). Något som kan ha påverkat resultatet är längden av geometrin som inte räckte till vindtunnelns höjd. Som lösning limmades en bit slät cylinder för den kvarstående längden. En konsekvens av den tillsatta biten blir att dragkoefficienten blir högre.

CFD-data för cylinder uppnådde ett relativt värde på 97 % och vindtunneln ett relativt värde på 99 %. Det bör tas i åtanke att den numeriska modelleringen för denna geometri vid det relevanta reynoldsvärdet, 12046, simulerades med laminar modell. Det gjordes då det inte gick att uppnå rimliga resultat med varken steady-state eller URANS modelleringar, se Figur 4.3 och Tabell 4.1. Detta beror på cylinderns form. Cylindrar resulterar till att gränsskiktet separeras tidigt och orsakar därmed virvlar i vaken. Dessa virvlar är väldigt problematiska att simulera exakt med steady-state, URANS samt laminar modeller, detta kan tydligt ses på Figur A.11-A.15.

Laminar-modelleringar är avsedda för reynoldstal under 2000, trots detta uppnåddes resultat som bäst överrensstämde med tabulerad data med hjälp av denna modellering. Orsaken bakom detta är inget som undersökts i detta arbete.

Genom analytiska beräkningar kunde det fastställas att de sista 40 meterna av linan står för cirka 50 % av den motverkande dragkraften (Figur 4.1). Denna insikt möjliggör riktade förbättringar där de ger störst effekt, vilket effektiviserar utvecklingsprocessen, optimerar resursanvändningen som bidrar till minskad miljöpåverkan samt förbättrad kostnadseffektivitet för utvecklingen. Ett förslag på en sådan förbättring visas på figur 4.5 där de sista 40 meterna byts ut mot geometrin cylinder i vinge, och har därmed resulterat till en minskning på totala drag till 51.5 %

Dessutom identifierades linans mekaniska överkapacitet, som kan optimeras för att ytterligare minska dragkraften genom att minska tvärsnittsarea. Enligt de beräknade värdena kan det konstateras att många linor som undersöktes har en hög säkerhetsfaktor, vilket möjliggör användning av en mindre tvärsnittsarea (ekvation 2.11). Samtidigt betonades de krafter linan utsätts för i luften, vilket understryker behovet av tillräckliga säkerhetsfaktorer för att säkerställa att brott undviks under användning.

AWE-system är känsliga för miljöfaktorer, och variationer i omgivningen kan påverka både linans och drakens prestanda. På de höjder där systemet verkar kan temperatur, luftfuktighet och vindhastighet variera avsevärt, vilket i sin tur påverkar både Reynoldstalen och linans mekaniska egenskaper. Projektet begränsades till att endast fokusera på specifika antaganden, kring höjd, hastighet, anfallsvinkel och väder. Detta medför att de framtagna resultaten endast representerar en specifik del av verkligheten.

Enligt 4.4 kan det konstateras att efter Reynoldstalet 12046 får den dimplade geometrin en negativ påverkan på luftmotståndet desto högre Reynolds-talet blir. Detta beror på att dimplarna genererar en kontrollerad turbulens i gränsskiktet kring dimplad cylindern. Denna turbulens fördröjer separationen av luftflödet, vilket reducerar lågtrycksområdet som uppstår bakom den dimplade cylindern vid flödesseparation. Detta medför att den dimplade cylindern har en lägre motstånd och är mer aerodynamiskt vid högre Reynolds.

5.2 Slutsats

Projektet visar att linans aerodynamiska egenskaper i ett AWE-system kan förbättras genom att ändra dess ytkonfiguration. Detta resultat kan direkt kopplas till projektets ursprungliga syfte. Projektgruppen anser därför att syftet i stort sett har uppnåtts, och flera metoder för att minska luftmotståndet har identifierats och utvecklats.

Den största dragkraftsminskningen hade vingprofilen, men dess implementering av koncepten på en polyetenlina är komplex. Andra varianter, såsom tre-cylindrar och dimplade cylindrar, visar också dragkraftreducering; däremot är resultaten osäkra på grund av begränsad validering i form av tabelldata och numeriska simuleringar. Vindtunneldatan för dimplade cylindern är den mest pålitliga för geometrin och gav 13 % reduktion i dragkraft, vilket är lägre än vissa tidigare studier visat.

Dragkraften beräknades som ojämnt fördelad längs linan, där de sista 40 metrarna står för cirka hälften av den totala dragkraften, vilket möjliggör riktade förbättringar på just den längd som bidrar mest till de negativa effekterna. En översyn av linans mekaniska överkapacitet indikerar att tvärsnittsarean kan reduceras utan att påverka säkerheten, vilket ytterligare minskar dragkraften.

Konceptet cylinder kombinerat med cylinder i vinge sista 40 m, leder till en reduktion av total dragkraft med 51.5 % och anses även vara mycket praktiskt, då den appliceras som ett skal runt en del av linan snarare än ersätter den direkt.

6

Vidare forskning

För vidare forskning identifierades flera idéer tidigare studier som inte kunde undersökas i detta arbete. En sådan idé är att förse linan med en platta placerad bakom den, med syftet att förskjuta vortexbildningen och därmed minska de negativa effekterna, se Figur 1.2. En annan möjlighet är att utforska spiralformade ytkonfigurationer på linan, vilket kan påverka luftflödet och reducera aerodynamiska förluster. Dessutom är det viktigt att undersöka hur olika infallsvinklar hos luftflödet påverkar linans prestanda och för att bättre förstå konceptens effektivitet under realistiska miljöförhållanden. Dessa forskningsinriktningar kan bidra till ytterligare optimering av linors aerodynamiska och mekaniska egenskaper i AWE-system. Kombinationer av flera geometrier kan också undersökas. Flera av undersökningarna kring geometrierna har begränsats av tillgängliga resurser och kunskap, särskilt kring CFD. Därför hade flera koncept kunnat modelleras på andra sätt för att framställa bättre resultat. Projektet hade även kunnat utgå ifrån mer resultatvärden än C_d . Ett exempel är att undersöka reduktion av svängningar för ökad stabilitet.

En annan metod som är intressant för framtida forskning är att utveckla ett aerodynamiskt skal, som reducerar linans dragkraft. Genom att utforma skalet med en vingliknande form, vilken enligt Figur 4.5 uppvisar en kraftig minskning på dragkraften. På så sätt kan linans prestanda optimeras ytterligare.

En begränsning under detta arbete var att inga experiment kunde genomföras på de mekaniska aspekterna av linan. För framtida arbeten kan tester av linan med den reducerade diametern under dynamiska förhållanden och ytterligare analyser av säkerhetsmarginaler göras. Detta för att undersöka hur linans mekaniska egenskaper påverkas över tid vid användning och för att fastställa vid vilken punkt linan inte längre kan motstå de krafter den utsätts för.

7

Bidrag

A.D. medverkade i inledande faser av CFD-simuleringar, hållfasthetsanalys och framtagning av material för vindtunnelexperiment, bland annat med Python. A.D. bidrog aktivt med projektledning, idéer och underlag för rapportförfattande.

A.L skapade numerisk uppsättning av aerodynamiska beräkningar, från diskretisering (Python) till numeriska modeller (CFD) samt resultat. Led utförandet av projektet, producerade underliggande material för experimentella tester och bidrog till rapportskrivning.

A.M.A. modellerade alla geometrier i CATIA V5 och förberedde dessa för 3D-printing inför vindtunneltester. Deltog i experimentellt arbete i vindtunneln och ansvarade för insamling, sammanställning och analys av mätdata och resultat. Genomförde mekanisk analys med hjälp av Python-baserade beräkningar, inklusive extrapolering och bestämning av säkerhetsfaktorer. Genomförde litteraturstudie och analyserade relevant forskning för att jämföra och kontextualisera projektet. Bidrog även till framtagning av underlag för experimentella tester samt till rapportskrivningen.

N.v.L har genomfört delar av analysen, deltagit i vindtunnelexperimentet samt skrivit på rapporten

M.J. bidrog med mekanisk analys för aerodynamiska beräkningar, hållfasthetsanalys och materialframtagning för vindtunnelexperiment. Bidrog aktivt med projektledning, idéer, resultatanalys och rapportskrivning.

M.A bidrog med mekanisk analys relaterad till aerodynamiska beräkningar, analyserade problemställningen och deltog i planering och utförande av experimentella tester. Ansvarade för insamling, bearbetning och sammanställning av data med hjälp av python samt identifierade relevanta studier. M.A bidrog även till tolkning av resultat och rapportskrivning.

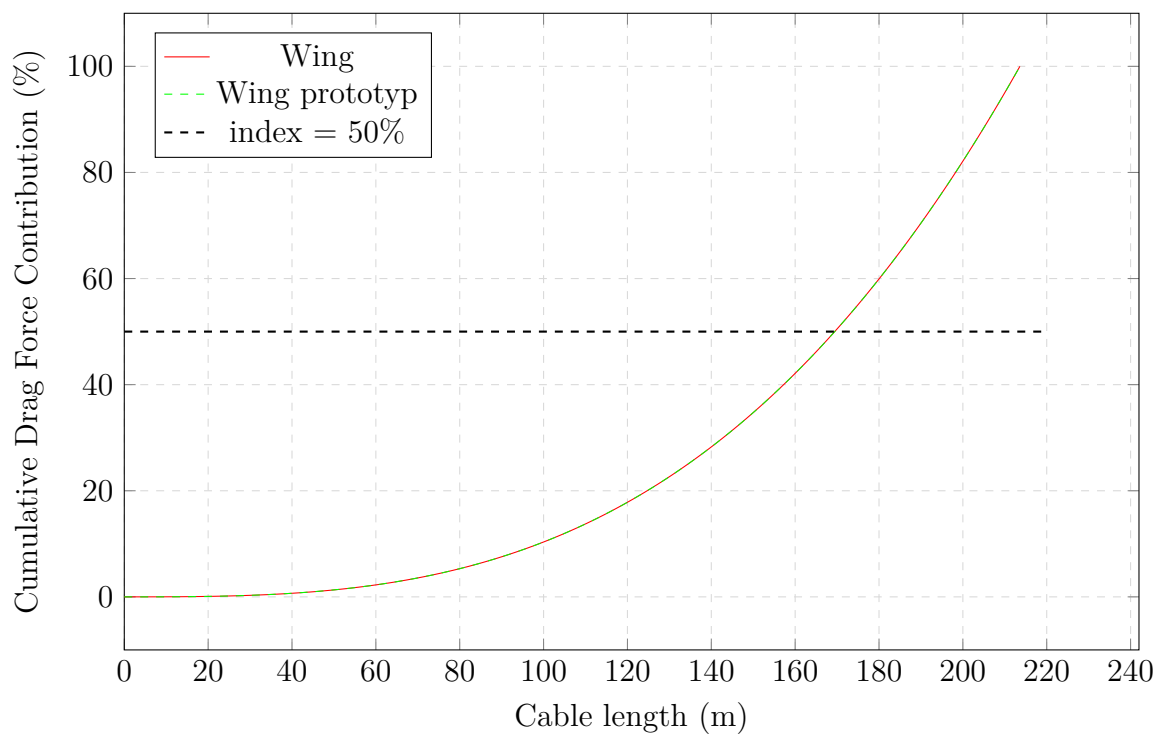
Litteratur

- IEA. (2024). *World Energy Outlook* [Accessed: 2025-05-05]. <https://www.iea.org/news/growth-in-global-energy-demand-surged-in-2024-to-almost-twice-its-recent-average>
- IEA. (2023). *Wind has significant potential to increase countries' renewable capacity growth* [Accessed: 2025-05-07]. <https://www.iea.org/reports/renewables-2023>
- Kitemill. (2024). *Technology* [Accessed: 2025-05-05]. <https://www.kitemill.com/technology>
- Fagiano, L., Quack, M., Bauer, F., Carnel, L., & Oland, E. (2022). Autonomous Airborne Wind Energy Systems: Accomplishments and Challenges. *Annual Review of Control, Robotics, and Autonomous Systems*, 5 (Volume 5, 2022), 603–631. <https://www.annualreviews.org/content/journals/10.1146/annurev-control-042820-124658>
- Ropes, D. (2025). *Safelift* [Accessed: 2025-05-07]. <https://dynamica-ropes.com/products/safelift/>
- Frolov, V. A., & Ha, L. V. (2023). DRAG COEFFICIENT OF A CYLINDER WITH A FLAT PLATE PLACED BEHIND IT. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 64(6), 993–999. <https://doi.org/10.1134/S0021894423060081>
- Dao, T., Matsumiya, H., Noguchi, K., Xu, R., Marey, O., & Yagi, T. (2023). Drag reduction of a cylinder by using spiral protuberances to generate three-dimensional surface flow. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 241, 105550. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2023.105550>
- Fei Yan, H. Y., & Wang, L. (2021). *Study of the Drag Reduction Characteristics of Circular Cylinder with Dimpled Surface*. Hämtad 28 februari 2025, från <https://www.mdpi.com/961838>
- McTavish, S., D'Auteuil, A., & Raeesi, A. (2020). Effect of cable surface characteristics and flow turbulence on the aerodynamic behaviour of stay cables in dry conditions. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 207, 104414. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jweia.2020.104414>
- Tan, S., Koh, J., & Ng, Y. E. (2016 augusti). *Study of Flow over Dimpled Cylinder for Drag Reduction*. WORLD SCIENTIFIC. https://doi.org/10.1142/9789814704496_0008
- Dandan, M. A., Samion, S., Musa, M. N., & Zawawi, F. M. (2021). Evaluation of Lift and Drag Force of Outward Dimple Cylinder Using Wind Tunnel. *ARCHIVES OF AKADEMIKA BARU ARTICLES*, 11(3), 145–153. Hämtad 6 maj 2025, från <https://akademiabaru.com/index.php/archives/article/view/220>

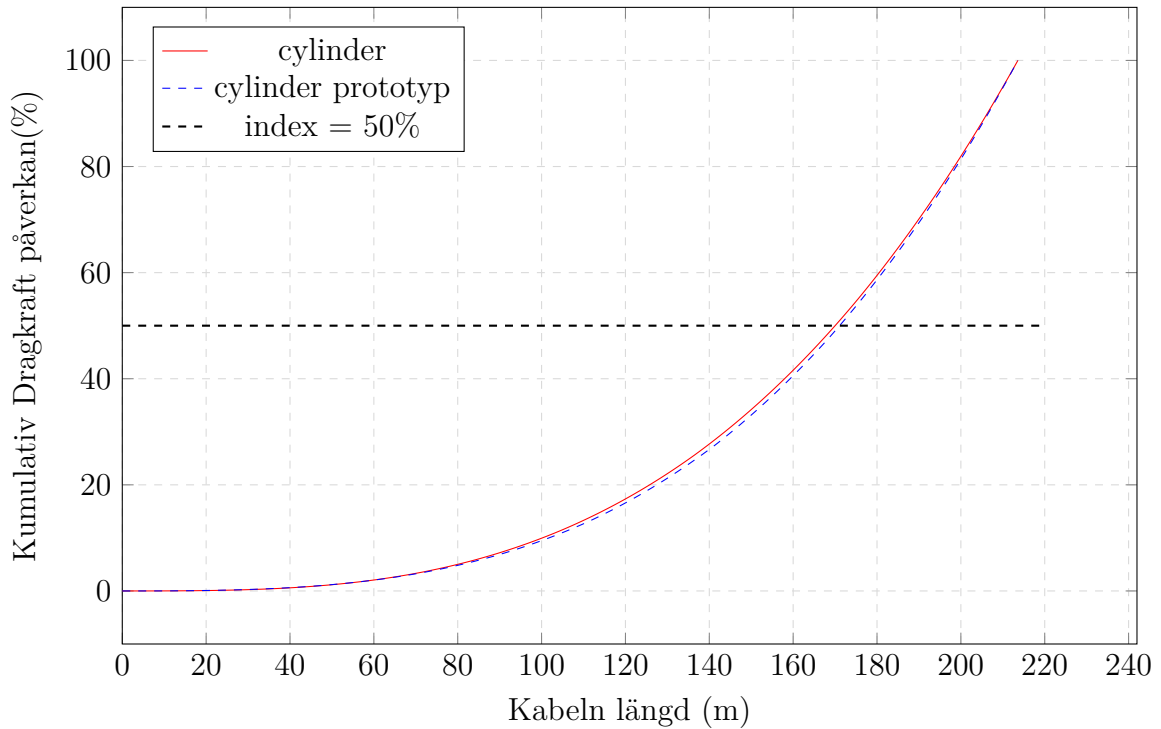
- Zhou, B., Wang, X., Guo, W., Gho, W. M., & Tan, S. K. (2015). Experimental study on flow past a circular cylinder with rough surface. *Ocean Engineering*, *109*, 7–13. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2015.08.062>
- Butt, U., Jehring, L., & Egbers, C. (2014). Mechanism of drag reduction for circular cylinders with patterned surface. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, *45*, 128–134. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatfluidflow.2013.10.008>
- Garvin, J. W. (2023). *A Student's Guide to the Navier-Stokes Equations*. Cambridge University Press.
- White, F. M. (2016). *Fluid Mechanics* (8. utg.). McGraw-Hill Education.
- Airfoil Tools. (2025). NACA 0012 Airfoil [Accessed 6 May 2025]. <http://airfoiltools.com/airfoil/details?airfoil=n0012-il>
- Larsson, S. (2022). *Integralkalkyl och ordinära differentialekvationer* (Upplaga 1) [Se kapitel 2, sida 41]. Studentlitteratur.
- Ben, A.-Q., & Dou, H.-S. (2015). Simulation and Stability Study of the Flow Around a Cylinder in Infinite Domain [Frontiers in Fluid Mechanics Research]. *Procedia Engineering*, *126*, 68–72. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.11.180>

A

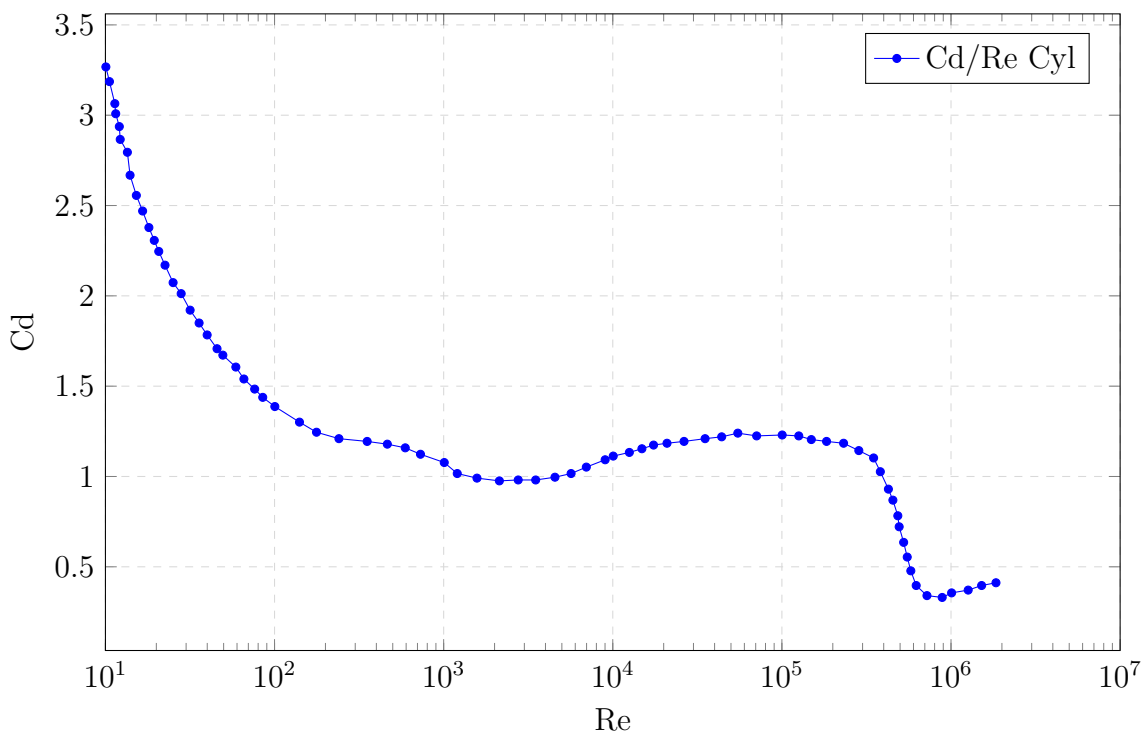
Bilagor



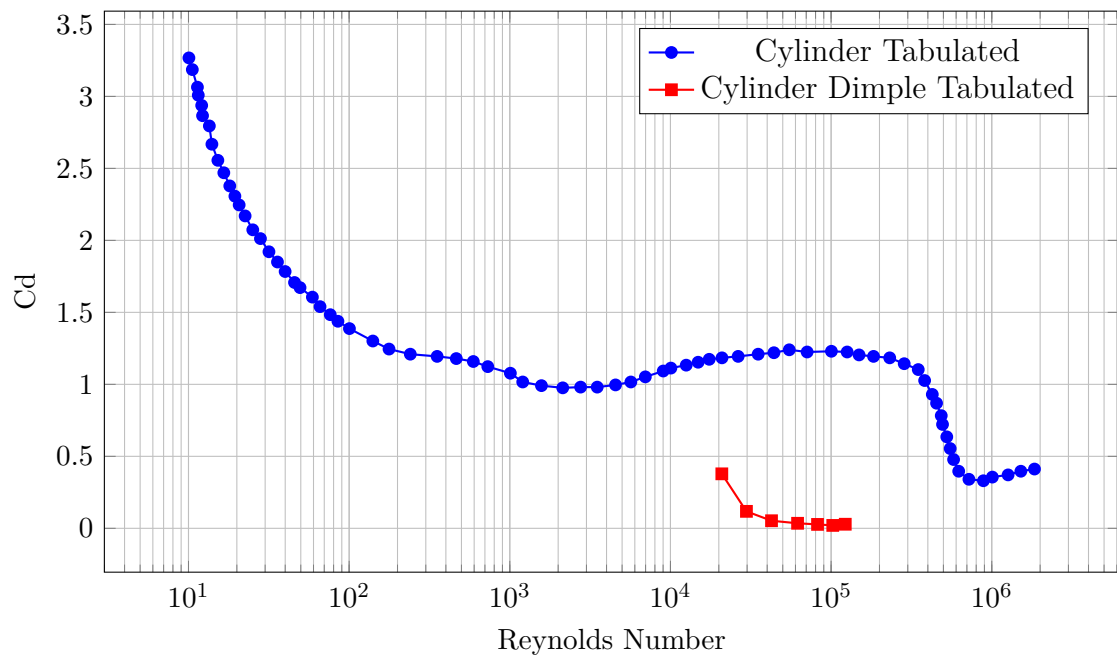
Figur A.1: Ackumulerad bidragande dragkraft (%) som en funktion av kabellängd för en Wing och Wing prototyp. Den streckade linjen markerar 50 % bidragspunkt.



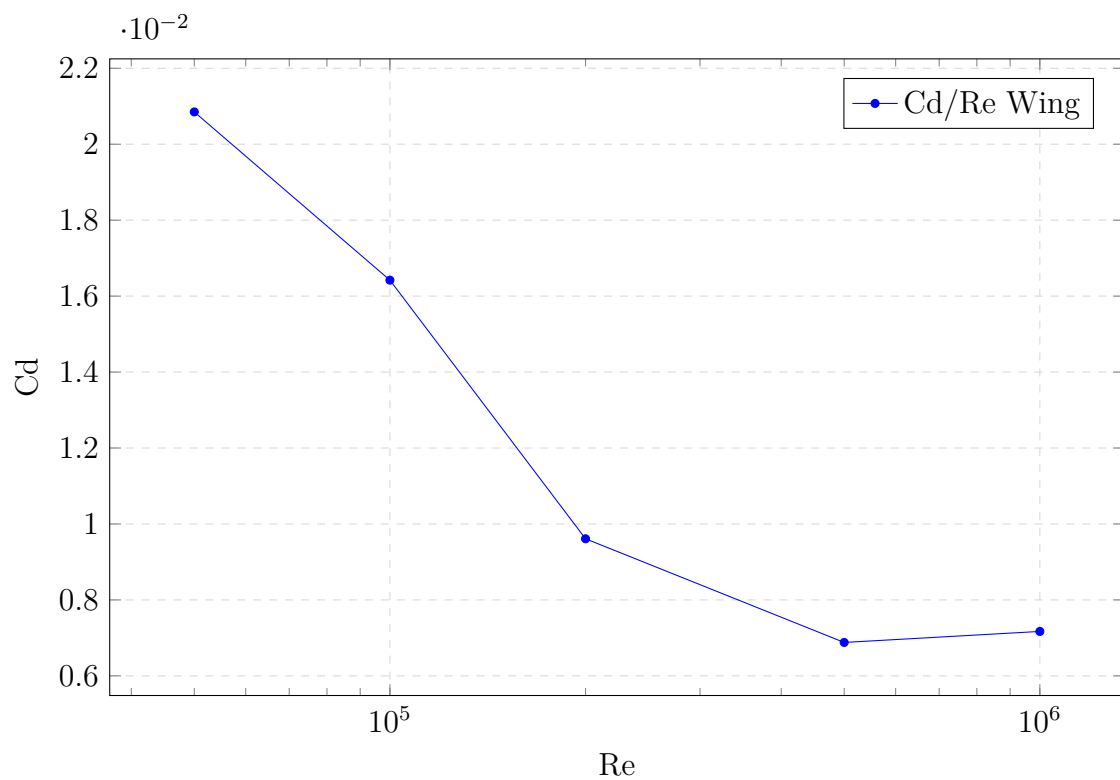
Figur A.2: Ackumulerad bidragande dragkraft (%) som funktion av kabellängd för en cylinder och en cylinderprototyp. Den streckade linjen markerar 50% bidragspunkt.



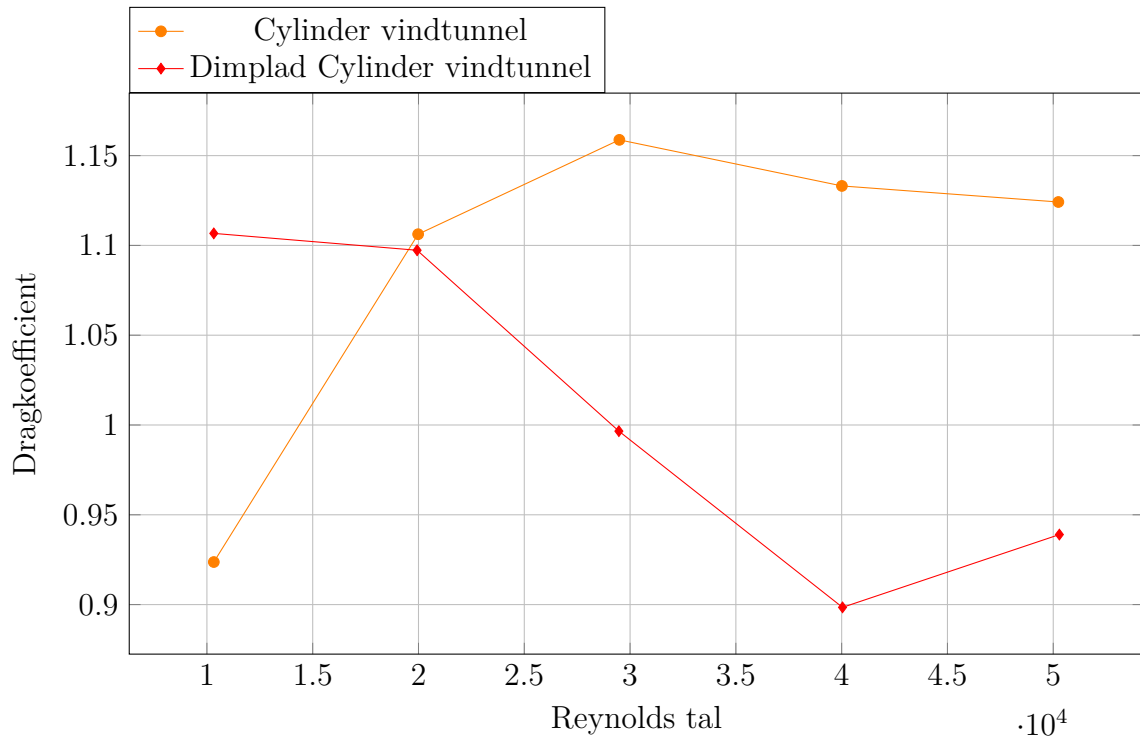
Figur A.3: Simulerad dragkoefficient (C_D) som funktion av Reynolds tal för en cylinder.



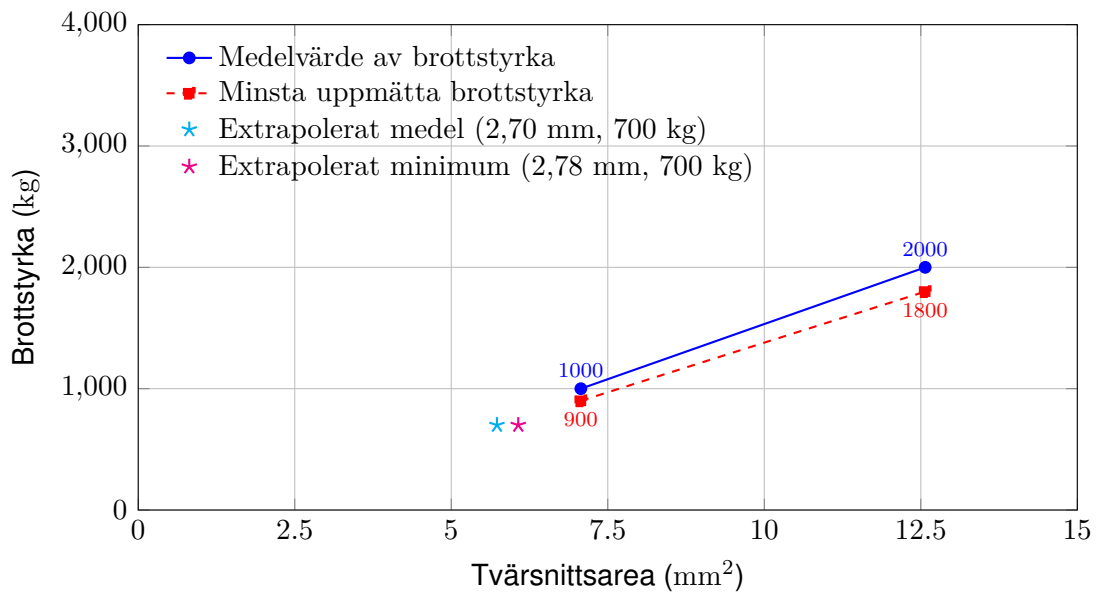
Figur A.4: Jämförelse av tabulerade C_D -värden för cylinder och cylinder med dimples.



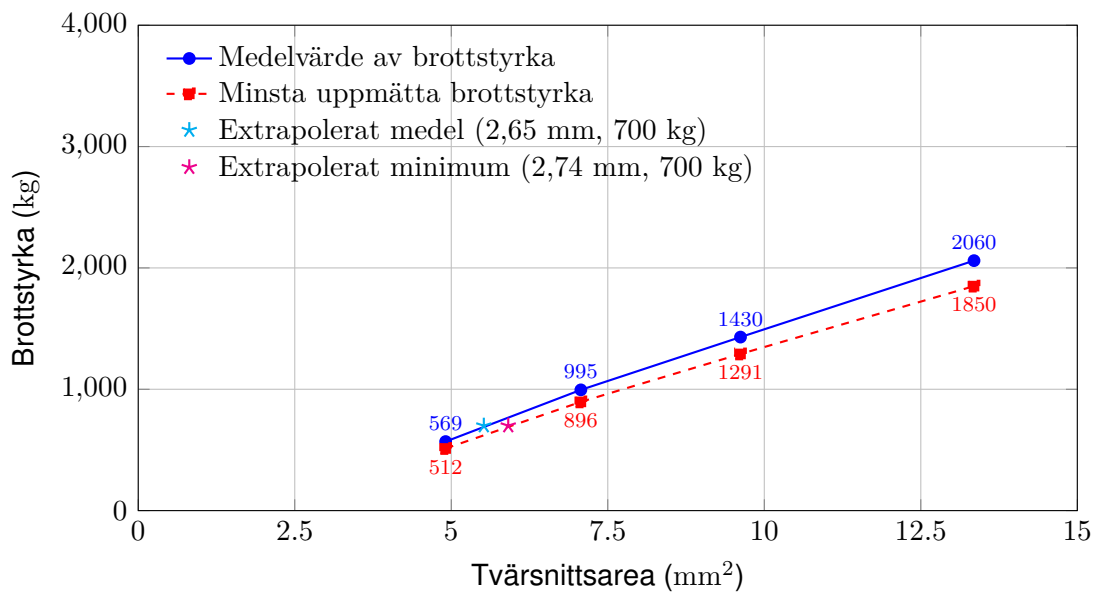
Figur A.5: Simulerad dragkoefficient (C_D) som funktion av Reynolds tal för en ving.



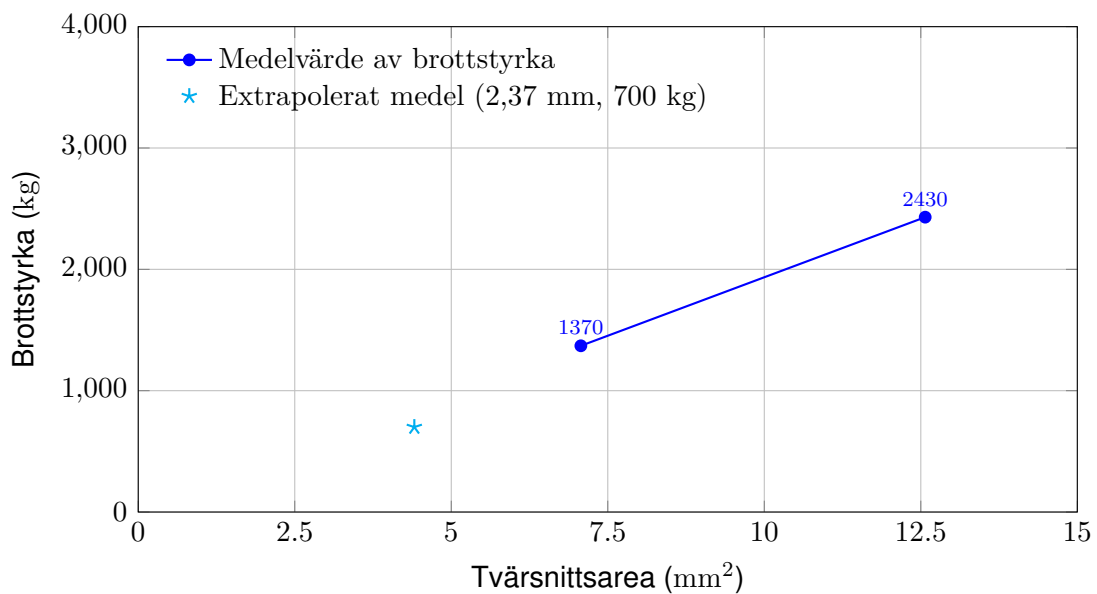
Figur A.6: Resultat från vindttunnel experiment för cylinder och dimplad cylinder.



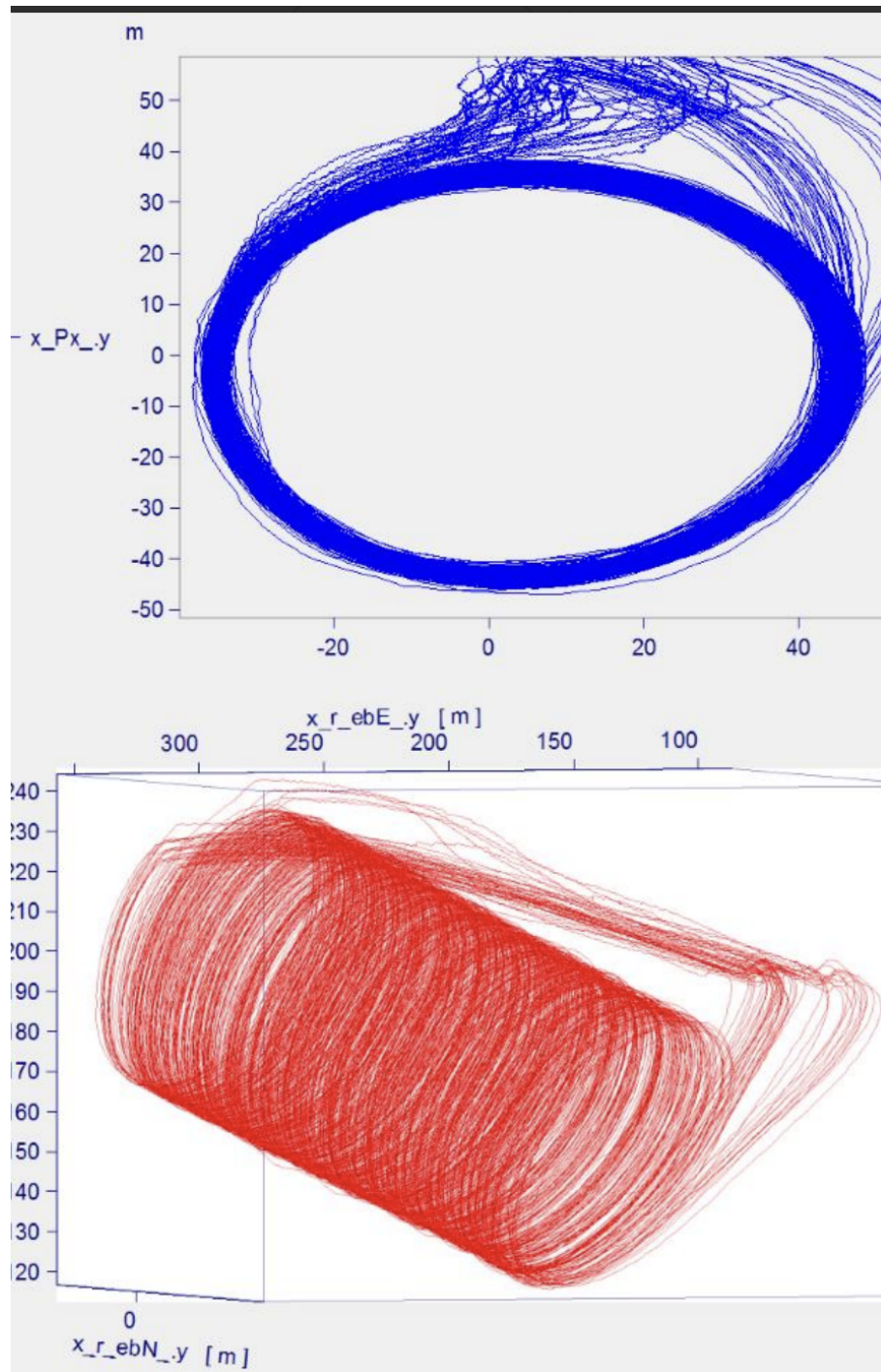
Figur A.7: Extrapolering av brottstyrka som funktion av tvärsnittsarea för SK75 (inzoomat: 0–15 mm^2)



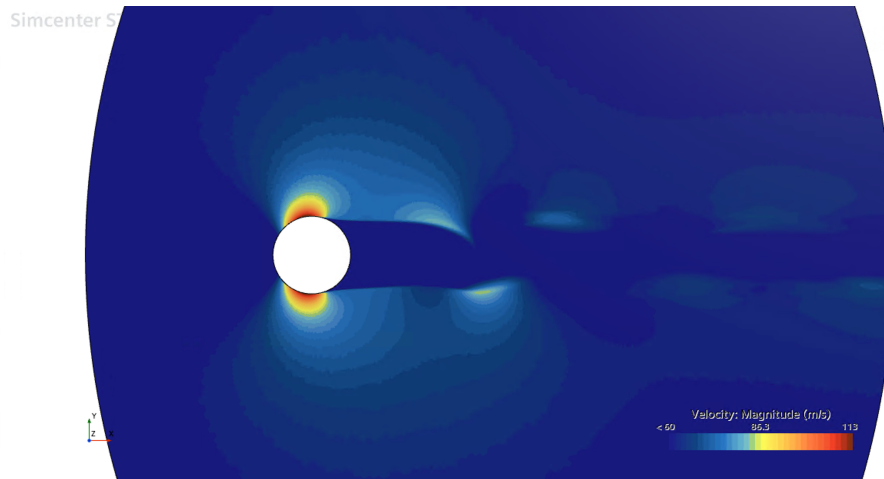
Figur A.8: Extrapolering av brottstyrka som funktion av tvärsnittsarea för SK78 (inzoomat: 0–15 mm²)



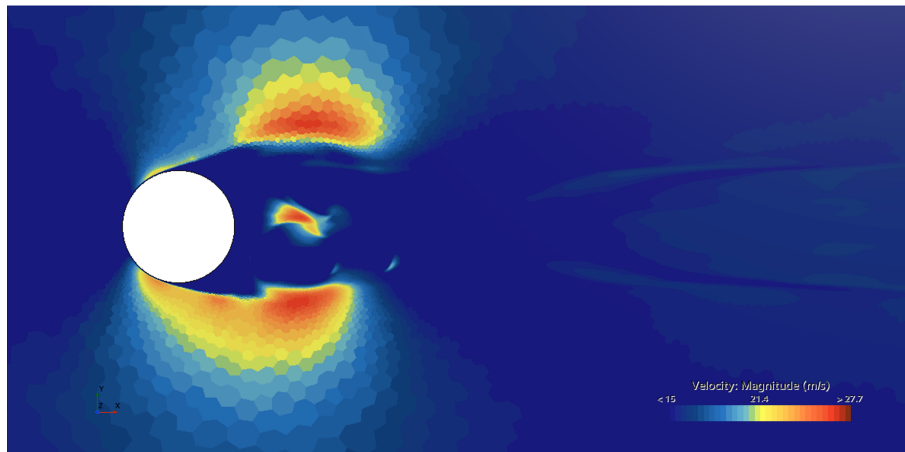
Figur A.9: Extrapolering av brottstyrka som funktion av tvärsnittsarea för DM20 (inzoomat: 0–15 mm²)



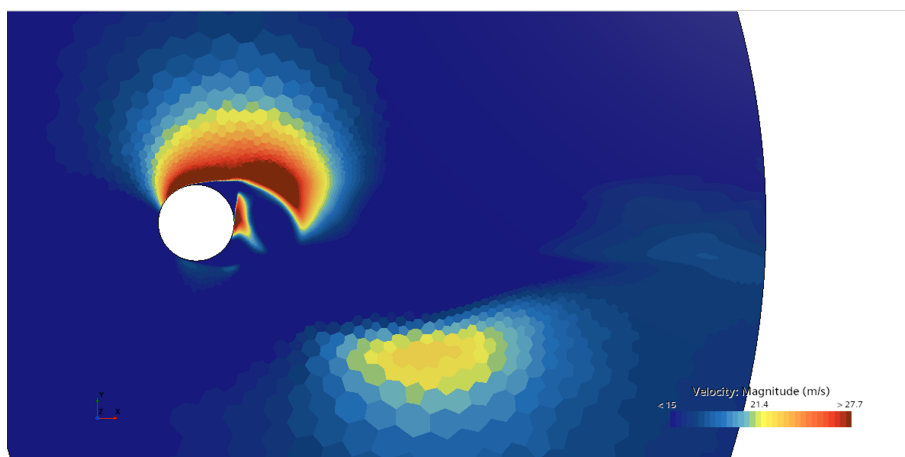
Figur A.10: Drakens rörelse



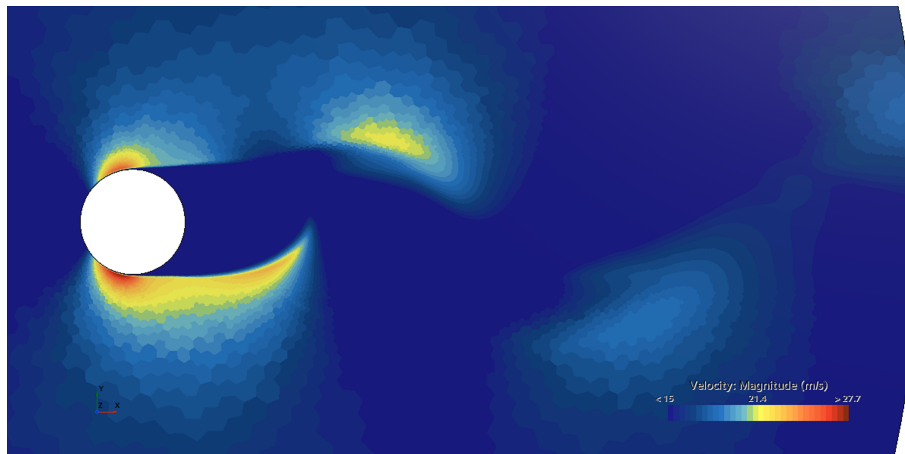
Figur A.11: Visualisering av cylinderns luftflöde vid 48184 Re, steady-state



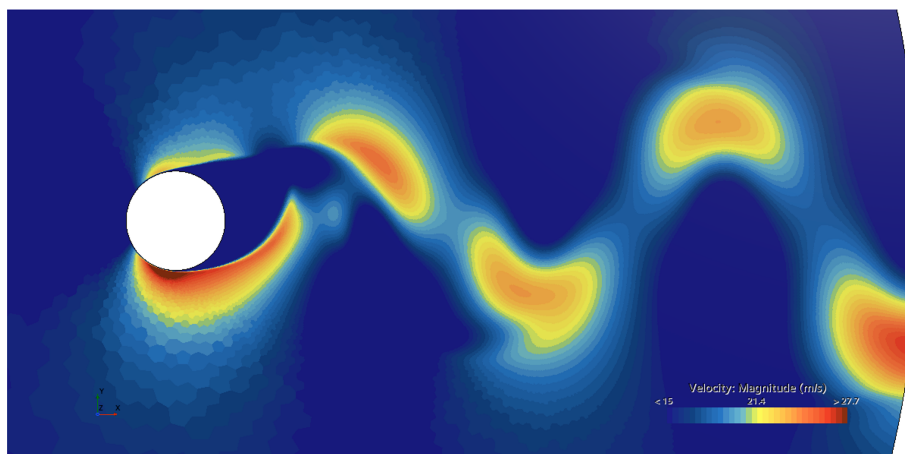
Figur A.12: Visualisering av cylinderns luftflöde vid 12046 Re, laminar



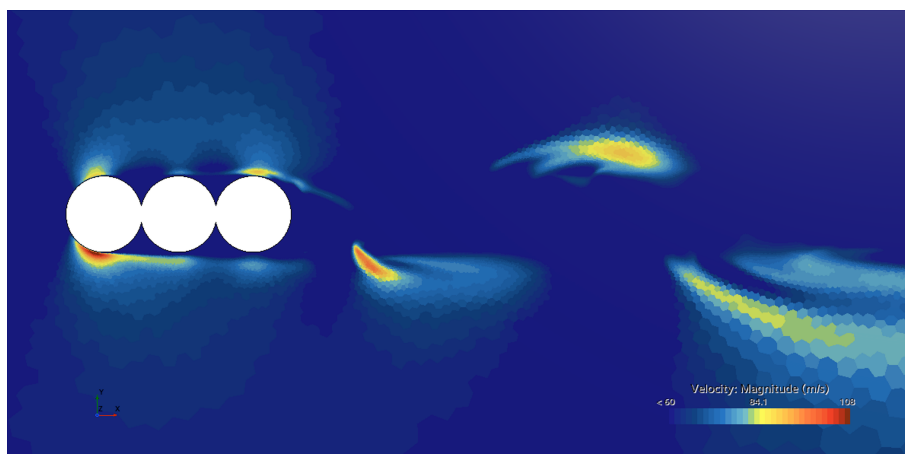
Figur A.13: Visualisering av cylinderns luftflöde vid 12046 Re, URANS, försök 1



Figur A.14: Visualisering av cylinderns luftflöde vid 12046 Re, URANS, försök 2



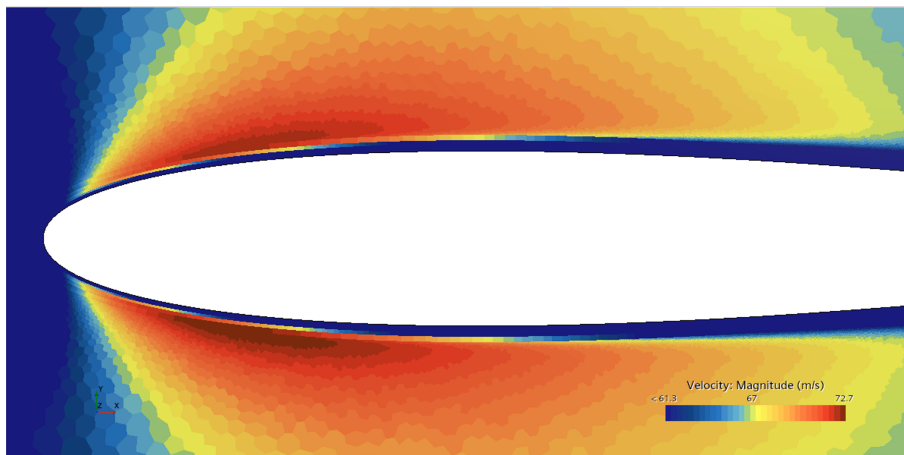
Figur A.15: Visualisering av cylinderns luftflöde vid 12046 Re, URANS, försök 3



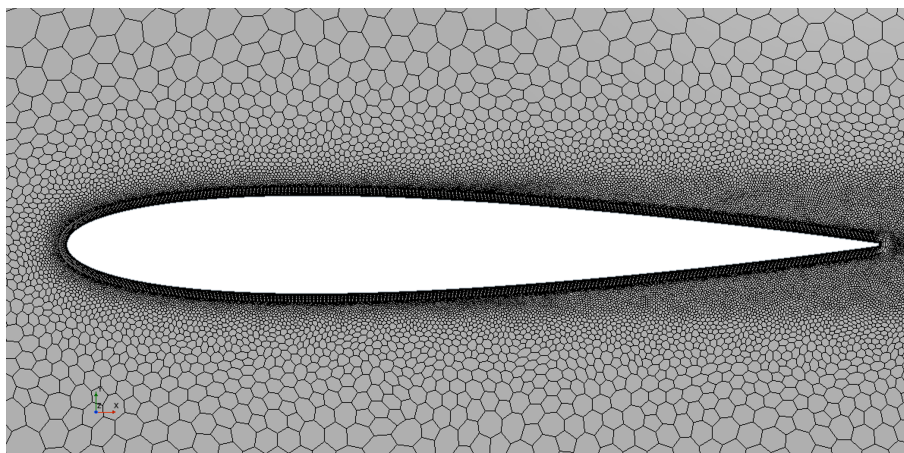
Figur A.16: Visualisering av luftflödet för tre cylindrar vid 20960 Re



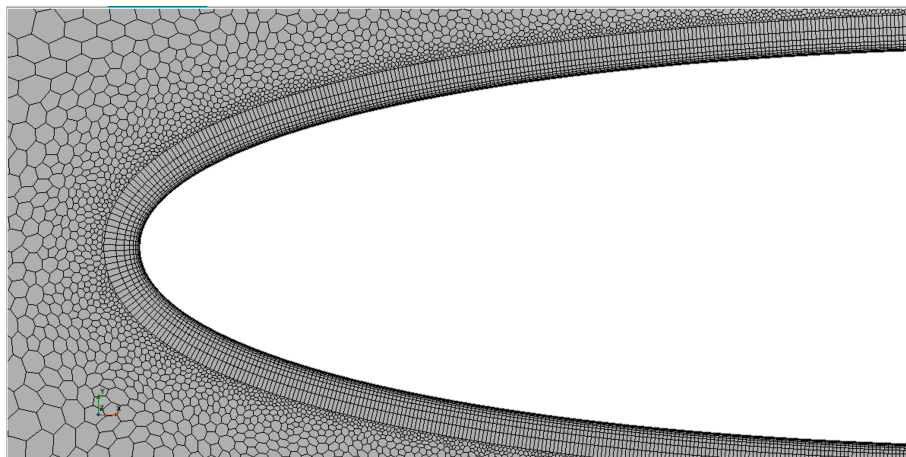
Figur A.17: Visualisering av luftflödet för vingen vid 37222 Re



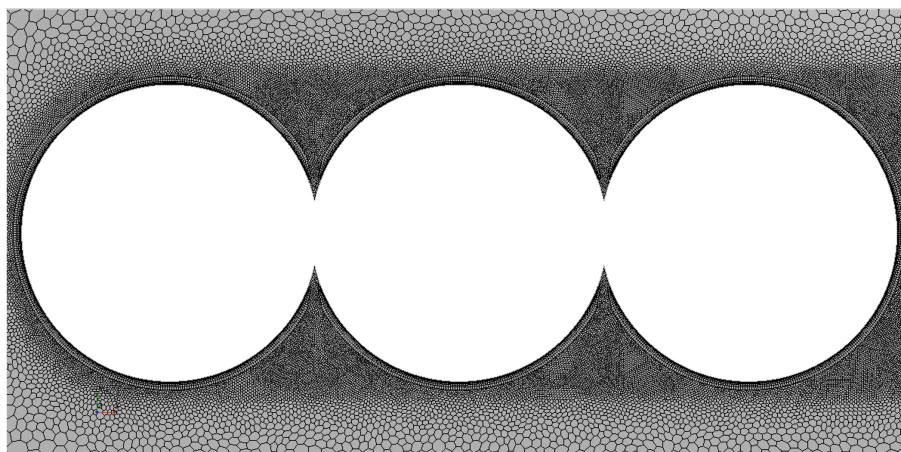
Figur A.18: Visualisering av luftflödet för vingen vid 37222 Re



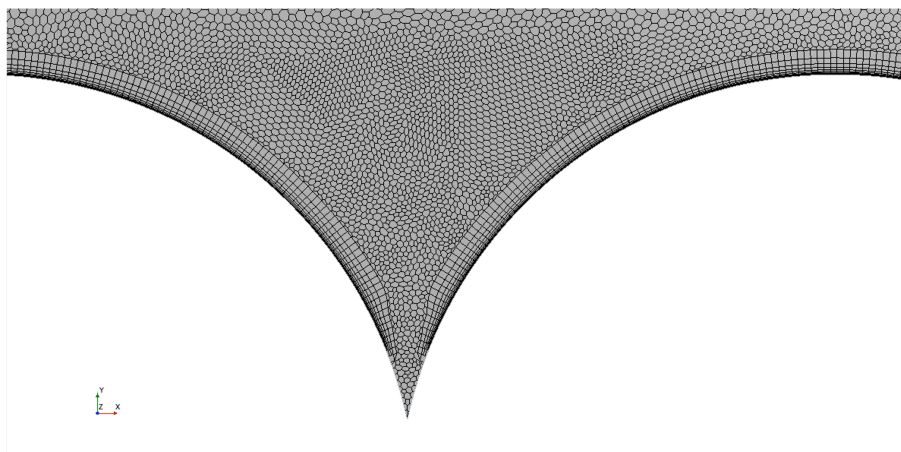
Figur A.19: Visualisering av mesh för vinge



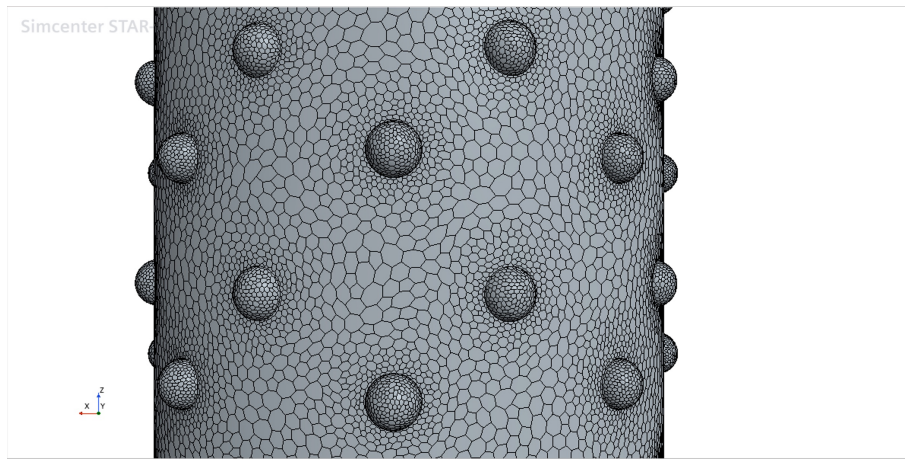
Figur A.20: Visualisering av mesh för vinge



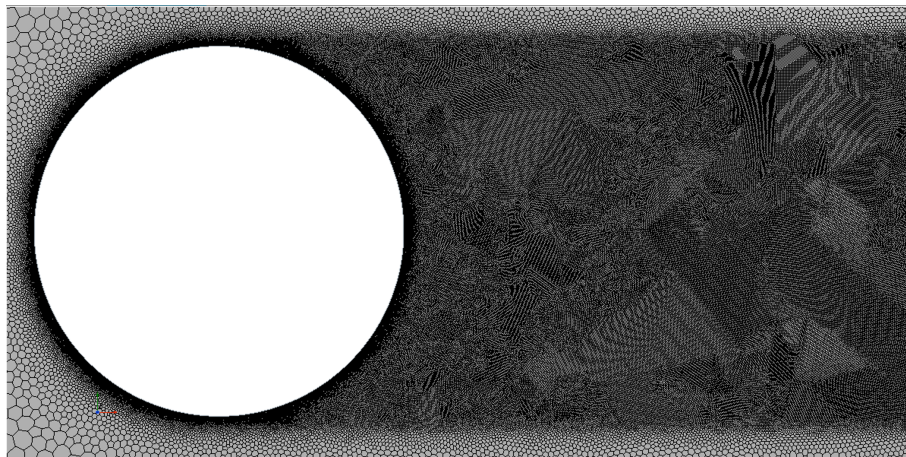
Figur A.21: Visualisering av mesh för tre cylindrar



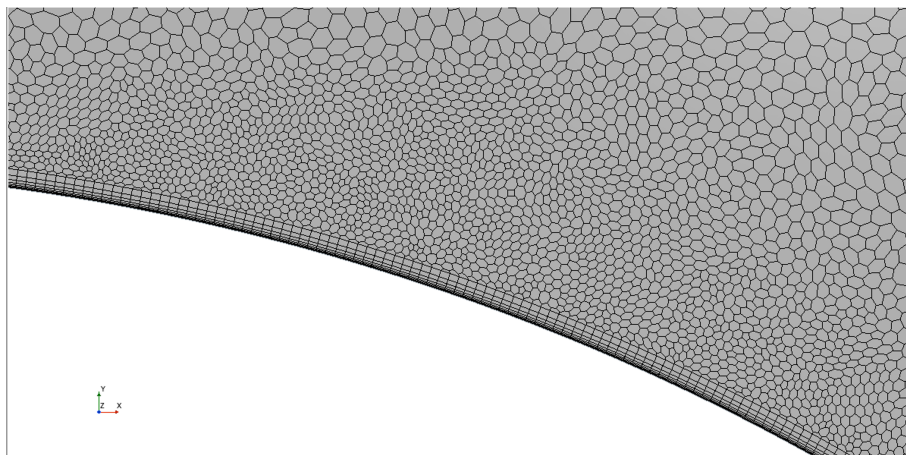
Figur A.22: Visualisering av mesh för tre cylindrar



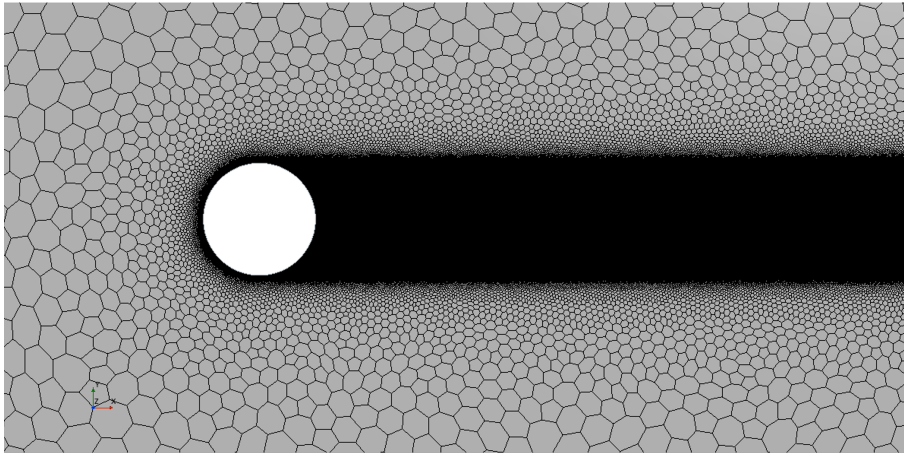
Figur A.23: Visualisering av mesh för dimplad cylinder



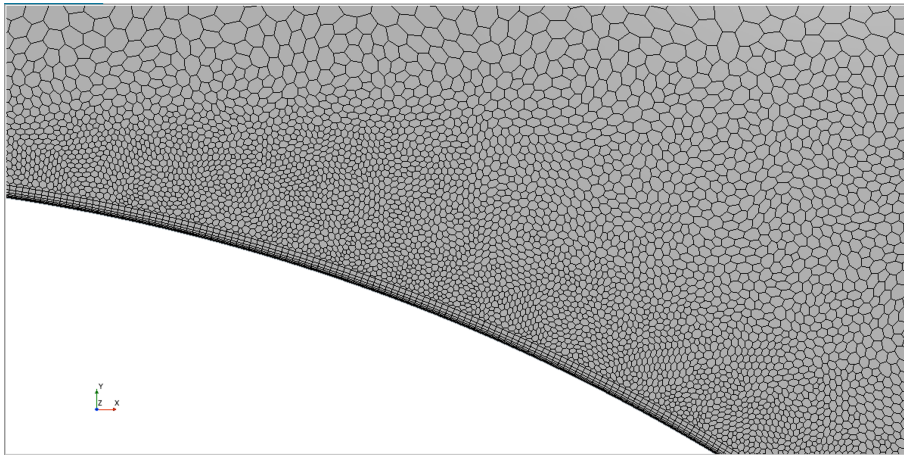
Figur A.24: Visualisering av mesh för cylinder



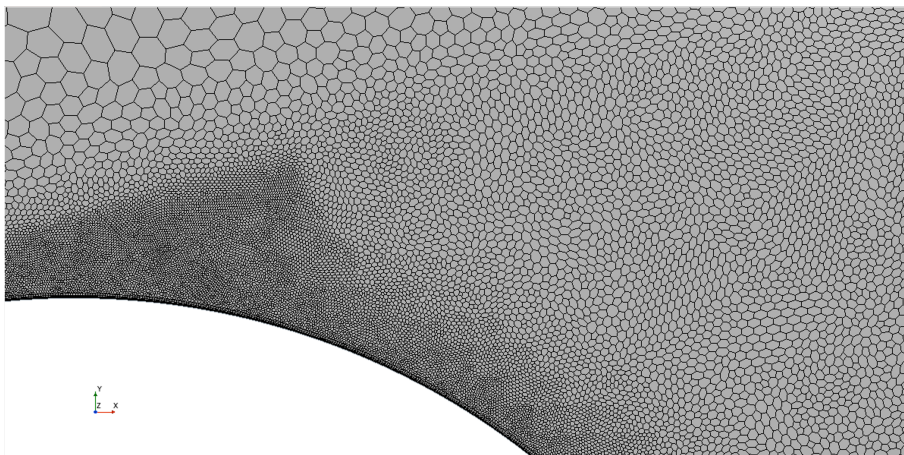
Figur A.25: Visualisering av mesh för cylinder



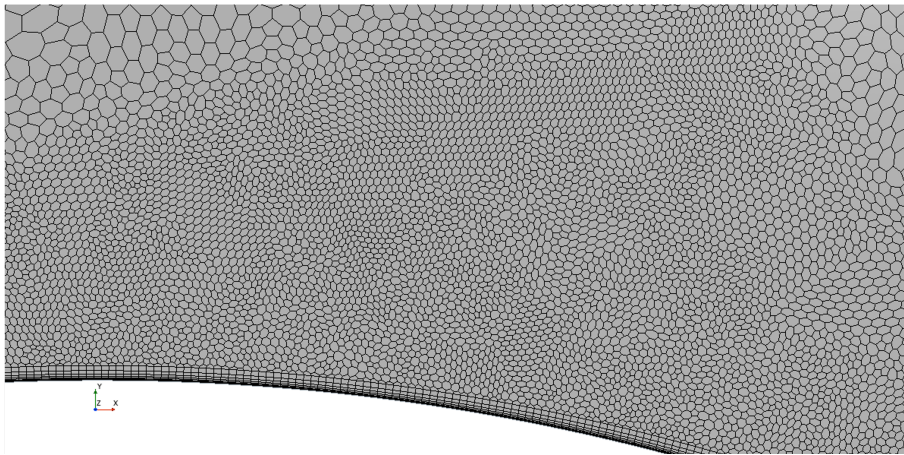
Figur A.26: Visualisering av mesh för cylinder, URANS försök 2



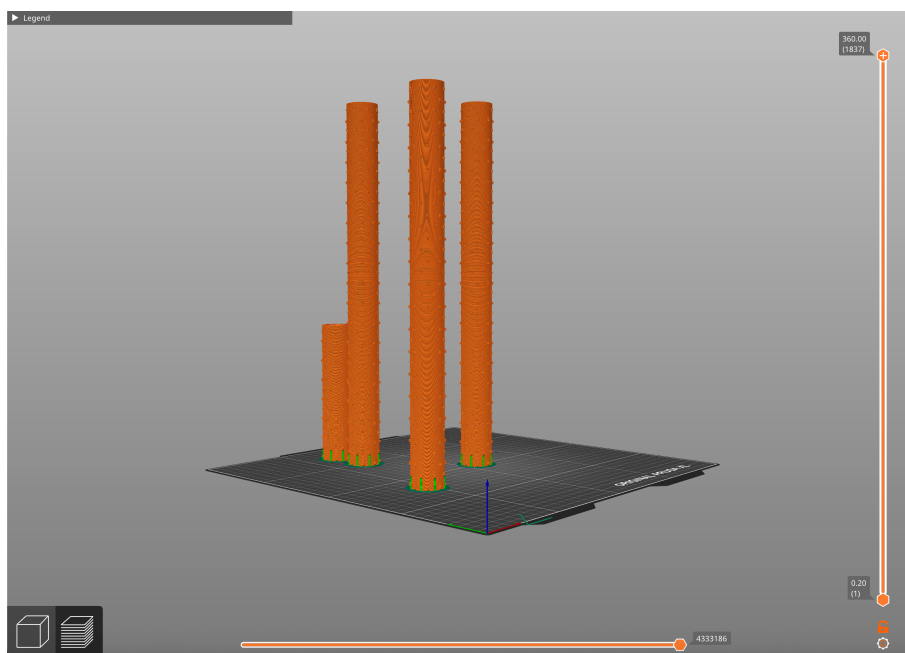
Figur A.27: Visualisering av mesh för cylinder, URANS försök 2



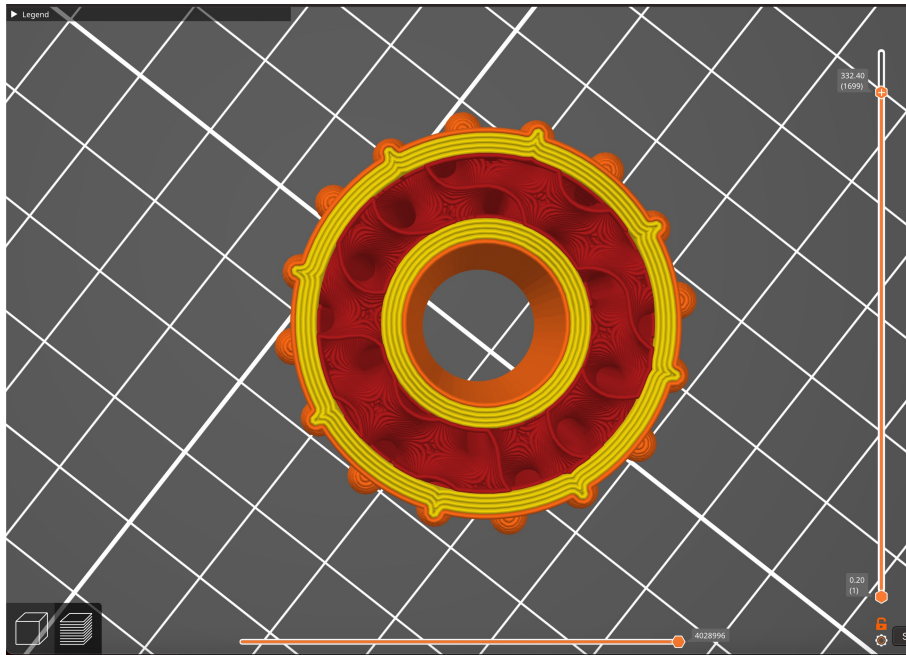
Figur A.28: Visualisering av mesh för cylinder, URANS försök 3



Figur A.29: Visualisering av mesh för cylinder, URANS försök 3



Figur A.30



Figur A.31: 3D-print miljö, hämtat från programmet PrusaSlicer

INSTITUTIONEN FÖR MEKANIK OCH MARITIMA VETENSKAPER
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA

Göteborg, Sverige 2025

www.chalmers.se



CHALMERS