



**HÖGSKOLAN
I GÄVLE**

INSTITUTIONEN FÖR TEKNIK OCH BYGGD MILJÖ

Vindkraftverk
Konstruktion av Vindkraftverk

Jonas Olsson

Juni 2009

Examensarbete, C-nivå, 15 högskolepoäng

Maskinteknik

**Maskiningenjörsprogrammet
Examinator & Handledare: Matz Lenner**

Abstract

An idée is awake, an idée of creating its own unique vertical wind power which shall benefit its customer who wants to save money on their electric consumption. This work will present to you some parts of a construction on a smaller vertical wind power and how they have been formed to match demands and desires from the orderer. This work started out with gathering information about wind power which gave knowledge of the upcoming parts of the work. Out of this information, product development, analyses and CAD models have been made to be able to create the parts.

Sammanfattning

En idé har väckts, en idé om att skapa sitt egna unika vertikala vindkraftverk som skall gynna intressenter som vill spara pengar på sin el förbrukning. I det här arbetet kommer ett mindre vertikalt vindkraftverks komponenter att presenteras och hur de har utarbetats gentemot beställarens krav och önskemål.

Arbetet startade med en informationsinsamling som gav information och kunskap om kommande delarna i arbetet. Denna information har sedan utarbetats inom produktutveckling, analyser och CAD modelleringar för att sedan kunna konstruera komponenterna.

Innehållsförteckning

| | | |
|-------|---|----|
| 1 | Introduktion..... | 1 |
| 1.1 | Syfte..... | 1 |
| 1.2 | Inledande frågeställningar | 1 |
| 1.3 | Mål..... | 1 |
| 1.4 | Avgränsningar..... | 1 |
| 1.5 | Förutsättningar | 2 |
| 1.5.1 | Produktutveckling | 2 |
| 1.5.2 | Hållfasthetslära..... | 2 |
| 1.5.3 | Strömningsteknik..... | 2 |
| 1.5.4 | Modellering | 2 |
| 2 | Problembeskrivning | 3 |
| 3 | Metoder | 5 |
| 3.1 | Informationsinsamling..... | 5 |
| 3.2 | Brainstorming | 5 |
| 3.3 | Gallerimetoden | 5 |
| 3.4 | Black-Box-modell..... | 6 |
| 3.5 | FMEA (Failure Modes and Effect Analysis)..... | 6 |
| 3.6 | Parvis jämförelse (PUGH)..... | 7 |
| 3.7 | Pro/Engineer | 7 |
| 3.8 | Finita Element Metoden | 7 |
| 3.9 | CAD..... | 7 |
| 3.10 | CES Edupack..... | 7 |
| 4 | Projektstart | 8 |
| 4.1 | Kravspecifikation..... | 8 |
| 4.2 | Informationsinsamling..... | 9 |
| 5 | Produktutveckling | 10 |
| 5.1 | Upplägg | 10 |
| 5.2 | Stöd för styrvinge | 10 |
| 5.3 | Black-Box-modellen..... | 11 |
| 5.4 | FMEA (Failure Modes and Effect Analysis)..... | 11 |
| 5.5 | Parvis jämförelse (PUGH)..... | 11 |
| 6 | Förstudie..... | 12 |
| 6.1 | Vindens uppkomst | 12 |
| 6.1.1 | Turbulens..... | 12 |

| | | |
|------|--------------------------------|----|
| 6.2 | Vindens energi och effekt..... | 13 |
| 6.3 | Energiomvandling..... | 14 |
| 7 | Konstruktion..... | 15 |
| 7.1 | Rotor..... | 15 |
| 7.2 | Stöd..... | 16 |
| 7.3 | Styrvinge..... | 17 |
| 7.4 | Stöd för styrvinge..... | 17 |
| 7.5 | Vridmekanism..... | 19 |
| 8 | Material..... | 20 |
| 8.1 | Materialsäkerhet..... | 20 |
| 9 | Slutlig Konstruktion..... | 21 |
| 9.1 | Stöd..... | 21 |
| 9.2 | Styrvinge..... | 22 |
| 9.3 | Rotor..... | 23 |
| 9.4 | Material..... | 24 |
| 9.5 | Vridmekanism..... | 24 |
| 9.6 | Styrsystem..... | 24 |
| 9.7 | Underhåll..... | 25 |
| 9.8 | Svetsar..... | 25 |
| 9.9 | Lager..... | 25 |
| 10 | Fortsatt arbete..... | 26 |
| 11 | Diskussion och slutsats..... | 27 |
| 12 | Referenser..... | 28 |
| 12.1 | Böcker..... | 28 |
| 12.2 | Artiklar..... | 28 |
| 12.3 | Internet..... | 28 |
| 12.4 | Personliga källor..... | 29 |

1 Introduktion

Ägaren för Teamab Miljö AB vill utveckla sin idé av ett vindkraftverk. I projektet ska studenten använda sig av kunskaper i hållfasthetslära, CAD modellering, strömningsteknik och mekanik för att konstruera ett vindkraftverk som skall klara de förhållandena och påfrestningarna som kan råda i en Europeisk miljö.

1.1 Syfte

Studenten skall få en insikt i vindkraftsindustrin och ge förslag på dimensioner för komponenter till en helt ny typ av vindkraftverk.

1.2 Inledande frågeställningar

- Vilken vinkel ska rotorbladen ha?
- Hur undviks turbulens?
- Vid vilken hastighet produceras elektricitet?
- Med hur stora krafter påverkar vinden vindkraftverket?
- Hur utformas rotorns axel och lagerhus på bästa sätt?

1.3 Mål

| | |
|------------|---|
| Processmål | Öka studentens kunskaper inom maskintekniska områden |
| Produktmål | Skapa ett vindkraftverk som uppfyller de överenskomna kravspecifikationerna |

1.4 Avgränsningar

- Rotor axel, blad och lagerhus kommer att ses över och bestämmas.
- Stödet som vindkraftverket vilar på beräknas och dimensioneras.
- Stöd för styrvingen utformas.

1.5 Förutsättningar

Vid konstruktionen av vindkraftverket har olika verktyg använts för att uppfylla vindkraftverkets krav samt uppfylla arbetets syfte.

1.5.1 Produktutveckling

Metoder inom produktutveckling kommer att användas för att lättare jämföra de förslag som uppkommer på olika delar i vindkraftverket samt analysera risker och prioriteringar.

1.5.2 Hållfasthetslära

Utmattnings-, materialkontrolls- och kraftanalyskunskaper inom hållfasthetsläran kommer att användas i arbetet för att lättare kunna dimensionera delarna.

1.5.3 Strömningsteknik

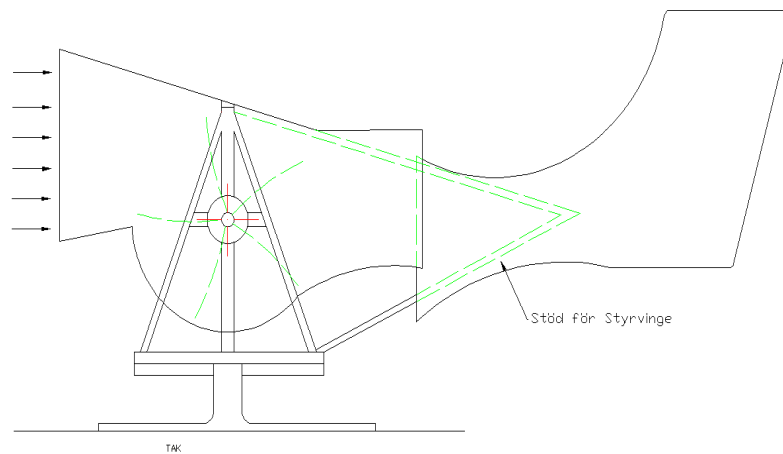
Kunskaper inom strömningsteknik kommer att användas för att beräkna energiomvandlingen från vindhastighet till mekaniskt arbete samt beräkna de påverkande krafter på vindkraftverket.

1.5.4 Modeller

Modeller och ritningar kommer att skapas för vindkraftverket i CAD alternativt Pro/Engineer. Modellen kan senare användas för hållfasthetsanalyser i FEM.

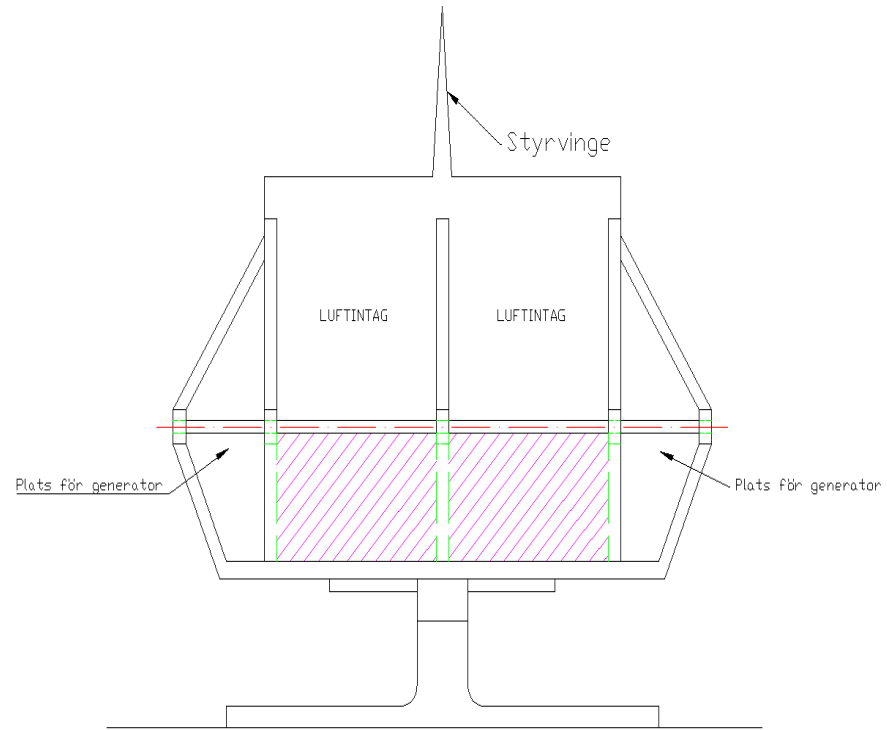
2 Problembeskrivning

Beställaren vill utforma ett helt nytt vertikalt vindkraftverk som ska sitta ca 10 m ovanför marken på ett hustak eller liknande. Det finns inga modeller eller prototyper på detta vindkraftverk men det har utgivits skisser och enklare ritningar så att det är lätt att få en uppfattning hur det ser ut. Figur 1 visar en sidovy skapad i CAD från de utgivna skisserna för att lättare få en syn på hur vindkraftverket skall utformas.



Figur 1 Sidovy sketch skapad i ritprogrammet CAD

Figur 2 på nästa sida visar en vy framifrån som också är skapad i CAD från utgivna skisser för att lättare kunna förstå hur vindkraftverket ser ut. Ingen av dessa skisser har några angivna mått eller är ritade skalenligt. Mått som finns, är förslagna mått på längd, bredd och höjd som inte måste följas utan är mer som riktlinjer. På sidorna finns det plats för lagerhus och generatorer. Rotorn är uppdelad på mitten så att den driver varsin generator, i mitten är det tänkt att sitta någon typ av lager som smörjer rotorn.



Figur 2 Sketch framifrån skapad i ritprogrammet CAD

3 Metoder

Metoder som produktutveckling, hållfasthetslära och modellering kommer att användas för att uppfylla kraven och syftet med detta arbete.

3.1 Informationsinsamling

I början av ett projekt gör man en s.k. informationssökning för att samla så mycket information som möjligt så man får en bra grund att stå på.

Informationssökningen ska försöka, om möjligt, svara på de inledande frågeställningarna. Information hämtas från böcker, Internet och eventuella studiebesök. Vid mer specifik informationssökning kommer personer som har god kunskap inom detta område att kontaktas.

3.2 Brainstorming

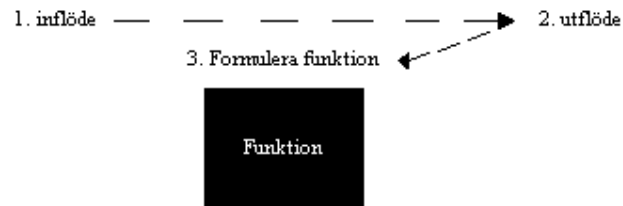
Vid uppstart, om det behövs, gör man en brainstorming. Brainstorming är en idé väckande metod där 5-15 personer sätter sig ner under 15-30 minuter och skissar på idéer och lösningar till problemet. Viktigt i denna metod är att ingen bedömning sker av det syftet att påverka resultatet negativt.

3.3 Gallerimetoden

Gallerimetoden är en uppföljning av brainstormingen. Här sammanställs skisserna och lösningar till ett galleri av bilder. Därefter görs en diskussion och bedömning av vilka förslag som är lämpliga.

3.4 Black-Box-modell

Black-Box-modellen försöker formulera en huvudfunktion som beskriver skillnaden mellan in- och utflödet i modellen. Dessa flöden kan vara signaler, material och energi. Figuren på nästa sida beskriver modellen lite enklare.



Figur 3 Black-Box-modellen

3.5 FMEA (Failure Modes and Effect Analysis)

En FMEA kommer att göras för att lättare analysera och bedöma riskerna med vindkraftverket och sedan komma med förslag på åtgärderna. En FMEA fungerar så att genom att hitta så många fel som möjligt och sedan göra en bedömning, på en skala mellan 1-10, av att dessa risker kan förekomma. Även åtgärderna bedöms via samma system.

Riskbedömning

O= Occurrence, sannolikheten att felet skulle ske

1= väldigt lågt ... 4-6=medium ... 9-10=mycket hög

S= Significance, följer för kunden

1= knappt... 4-6= ganska allvarliga... 9-10= mycket allvarliga

D= Detection, hur troligt det är att felet upptäckts i rätt tid.

1= högst troligt ... 6-8= kräver kvalificerad kontroll ...

9-10= omöjligt att upptäcka

RN= Risk Nummer, total riskbedömning som räknas ut enligt

$RN=O*S*D$

1-20 Låg risk, behövs inga åtgärder.

20-50 Justering och ny bedömning kan vara berättigad

50-125 Försök åtgärd problemet

125-100 Ej acceptabel konstruktion. Omarbeta säkerhet

3.6 Parvis jämförelse (PUGH)

För att veta var prioriteringen på vindkraftverket skulle läggas gjorde en parvis jämförelse. Här ställer man kriterierna parvis mot varandra för att sedan bedöma vilket kriterium som har högst prioritet. Därefter sammanställs betygen och kriterierna rangordnas där det högsta betyget är det man bör fokusera på i arbetet.

3.7 Pro/Engineer

Pro/Engineer är ett ritnings- och modelleringsprogram för att skapa modeller i 3D. Det kommer att användas för att skapa 3D-modeller och eventuella ritningar för arbetet.

3.8 Finita Element Metoden

Finita element metoden är ett hjälpmedel i ProEngineer som används för att erhålla hållfasthetsanalyser på bestämda komponenter eller ytor. Det fungerar så att programmet delar upp komponenten i massa olika små element, antalet element beror på hur stor och komplicerad geometrin är.

3.9 CAD

Ritningsprogrammet CAD (Computer Aided Design) kommer att användas för skisser och enklare modeller. Eventuella ritningar kommer också att skapas i CAD.

3.10 CES Edupack

CES Edupack är en databas som innehåller information om material och tillverkningsmetoder. Här kan man lätt hitta ett material och tillverkningsmetod genom att sätta upp olika kriterier på materialet. CES Edupack kommer att användas för att få en uppskattning av hur mycket vindkraftverket kommer att väga i färdig produkt samt hitta materials sträckgränser för mekanik beräkningar.

4 Projektstart

I inledningen av arbetet upprättades en projektspecifikation som låg till grund för hur arbetet utformas och planeras.

4.1 Kravspecifikation

En kravspecifikation upprättades utifrån de krav och önskemål som beställaren har på produkten. Kravspecifikationen kommer att vara styrande för konstruktionen.

| Rubrik: | | Målvärde | Enhet |
|----------------|----------------------|------------------|--------------|
| Planering: | Prototyp | Vindkraftverk | |
| Kostnad: | Material kostnad | $\leq 100'000$ | kr |
| Geometri: | Egenvikt | Lätt som möjligt | kg |
| | Längd | 4 - 7 | m |
| | Bredd | 7 - 9 | m |
| | Höjd | 4 - 6 | m |
| Användning: | Livslängd | 25 | år |
| | Effekt utvinning | 40'000 | kWh/år |
| | Starta alstra energi | 2 - 3 | m/s |
| | Sluta alstra energi | ≤ 20 | m/s |
| | | | |
| Kinematik: | Rotorhastighet | ≤ 200 | varv/min |
| Underhåll: | Tillgänglighet | 98 | % |
| Miljö: | Återvinning | 95-100 | % |

Säkerhet: Konstruktionen ska kunna klara vindar upp till 30 m/s
(Stormstyrka)

Underhåll: Smörjning ska kunna ske för rotoraxeln vid behov

Ytermiljö: Klara Europeisk miljö där temperaturskillnader på $\pm 30^{\circ}\text{C}$
förekommer

Funktion: Vindkraftverket skall styras utefter vindriktningen.

4.2 Informationsinsamling

För att få en bra grund att stå på inför arbetet gjordes en informationsinsamling där information hämtades ifrån böcker och Internetsidor. Denna insamling gav inte bara information om själva vindkraftverken och dess utbredning utan också mycket viktiga delar såsom vindkraftverkets uppbyggnad, energiomvandlingar, vindanalyser och tillverkningsstrategier.

Det finns 3 huvudtyper av vertikala vindkraftverk som dominerar marknaden idag. Ett av de vanligaste kan ses i bilden till höger som är en s.k. Giromill, de andra två är Savoniusturbinen samt Darrieusturbinen. Idag finns det företag som jobbar på att utveckla just sitt egna vertikala vindkraftverk¹. Främsta fördelen med vertikala vindkraftverk är att de inte behöver vridas efter vinden.



Figur 4 12kW prototyp designat av Vertical Wind.

¹ <http://www.verticalwind.se/SV/technology.html>

5 Produktutveckling

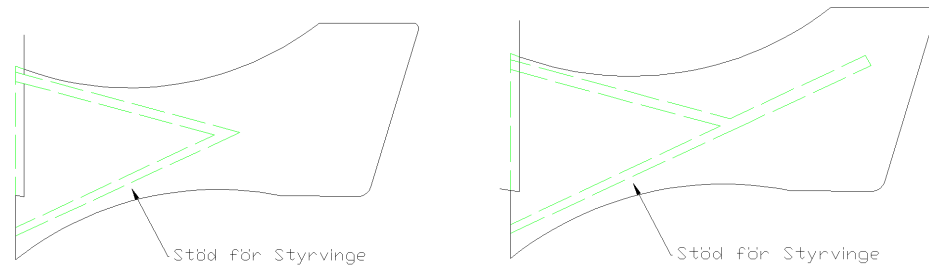
En produktutveckling gjordes för detta arbete för att hitta nya idéer och lösningar till vindkraftverket och analysera dess funktioner och brister.

5.1 Upplägg

Rotoraxel, rotorblad och lagerhus kommer inte att behöva läggas ned tid på att försöka utveckla, de standarddimensioner som redan finns fungerar. Däremot kommer de att dimensioneras. Produktutvecklingen kommer istället att inrikta sig på stödet för styrvingen samt att hitta brister på vindkraftverket och vad på vindkraftverket som är av extra vikt.

5.2 Stöd för styrvinge

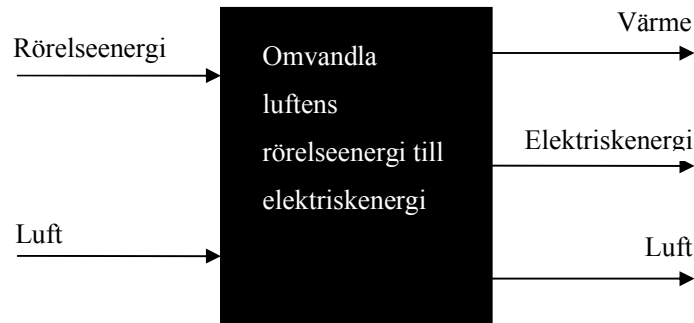
Vid utformningen av stödet för styrvingen gjordes först en brainstorming (Se bilaga 1) som resulterade i 3 förslag. Förslag 2 gallrades senare bort p.g.a. att den var för lik förslag 3 och att den kräver mer material. De andra två förslagen ska vidare analyseras i FEM.



Figur 5 De två förslag som har valts att gå vidare med

5.3 *Black-Box-modellen*

Figuren nedan beskriver vindkraftverkets inflöden, utflöden och dess huvudfunktion. Resultatet från black-box-modellen ger vilka delar som är viktigt att fortsätta analysera och studera.



5.4 *FMEA (Failure Modes and Effect Analysis)*

För att lättare kunna upptäcka fel och bedöma vindkraftverkets risker gjordes en FMEA som kan ses i bilaga II. I denna FMEA har risker som är de mest kritiska för vindkraftverket bedömts. Analysen gav att ett haveri p.g.a. utmattning är den största risken för vindkraftverket. Därefter är stödet som vindkraftverket vilar på den näst största risken.

5.5 *Parvis jämförelse (PUGH)*

För att lättare veta hur tiden skulle spenderas i arbetet har en parvis jämförelse gjorts där det högsta kriterium valdes att prioriteras. Den parvisa jämförelsen kan ses i bilaga III.

6 Förstudie

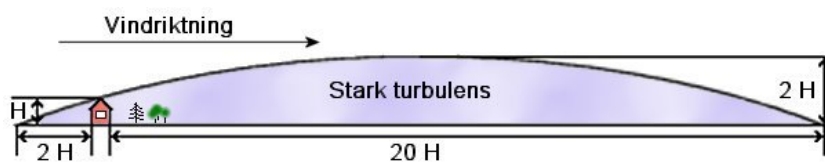
Vinden är en förnybar energi som vindkraften utnyttjar. Här kommer analyser som tidigare gjorts att presenteras, angående hur vinden beter sig på land, dess uppkomst och energin i vinden.

6.1 Vindens uppkomst

Vind kan enkelt beskrivas som luft i rörelse. När det blåser så är det lufttrycket som utjämnas från högtryck till lågtryck. Dessa tryckskillnader uppstår då faktorer som solen och havet påverkar jordens temperaturskillnader. Vindens rörelse beror alltså helt på vilken del av marken eller vattnet som värms upp förstast.

6.1.1 Turbulens

När vinden stöter på hinder i någon form på sin väg så uppstår luftvirvlar eller luftvågor. Dessa virvlar eller vågor anses som korta variationer i vindhastigheten, vilket vi kallar turbulens. En bild på hur turbulens kan uppstå kan ses i figur 6.



Figur 6 Turbulens har en stor utbredning bakom hinder. Turbulens kan förekomma uppemot 20 gånger höjden bakom hindret. Området varierar förstås med vindriktningen.

Hinder, såsom byggnader eller träd orsakar turbulens, vindkraftverk bör därför inte placeras bakom dessa. Även berg och dalar kan skapa turbulens, då dessa ökar eller minskar vindens hastighet. Enkel tumregel säger att hinder skapar stark turbulens till dess dubbla höjd. Detta måste iaktas då turbulens skapas när vinden blåser igenom vindkraftverkets rotor.

6.2 Vindens energi och effekt

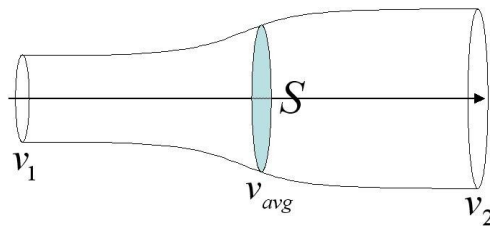
Energiinnehållet hos vinden anges i kilowattimmar (kWh) per kvadratmeter och år. Med andra ord hur mycket energi som passerar genom ett vertikalt tvärsnitt på en kvadratmeter under ett år. Begreppet energi definieras som effekt multiplicerat med den tid som effekten utnyttjar. Effekt definieras som energi per tidsenhet och anges i Watt (W). Vindens effekt är proportionerlig mot vindens hastighet i *kubik*, så när hastigheten fördubblas ökar effekten åtta gånger.² Även en större vind upptagnings yta ökar effekten. Blir ytan dubbelt så stor så fördubblas också effektuttaget.³ Att veta effekten och energiinnehållet hos vinden är till stor fördel, då man kan anpassa placeringen av ett vindkraftverk och samtidigt ta reda på hur stor effekt som kan omvandlas till elektrisk energi, värme eller mekaniskt arbete. Denna effekt i rotern kommer sedan att användas i en generator som omvandlar rotorns effekt till elektrisk energi.

² Wizelius, Tore, *Vindkraft i teori och praktik*, andra upplagan, sidan 67

³ Bokalders, Varis m.fl., *Solkraft, Vattenkraft, Vindkraft*, andra upplagan, sidan

6.3 Energiomvandling

När man omvandlar vindenergi gör man det för ett bestämt syfte. I en vindturbin omvandlas vindens rörelseenergi till mekaniskenergi som senare antingen lagras eller används direkt till elektriskenergi. För att kunna omvandla rörelseenergin måste man bromsa vinden eftersom energi inte kan skapas eller förstöras, utan bara omvandlas till andra former. Vill man omvandla all vindens rörelseenergi måste vinden bromsas upp helt. Detta är svårt då vinden måste kunna passera igenom rotorn annars tar den bara en annan väg förbi. Teorin om uppbromsningen gjordes av aerodynamikern Albert Betz som senare blev Betz lag⁴ där han bevisade att ca 59 % av vindens effekt kan tas till vara. (Se figur 7) Denna teori visade Betz med hjälp av Bernoullis ekvation.



Figur 7 Betz lag principen. Vindens hastighet bromsas upp vid ytan S. Då massflödet

($\dot{m} = Av\rho$) är densamma måste arean öka eftersom hastigheten minskar. Expansion sker då vinden bromsas.

⁴ <http://www.windpower.org/en/tour/wres/betz.htm>

7 Konstruktion

Konstruktionen av vindkraftverket kommer att inrikta sig på de avgränsningar som har gjorts d.v.s. rotoraxeln, stödet för styrvingen, stödet där hela vindkraftverket vilar på samt lagerhus. Kraften som hastigheten på vinden påverkar en yta med har legat till grund för hur krafterna har bestämts. Detta bestämdes till ett tryck på 563 Pascal som visas i bilaga IV.

7.1 Rotor

I början av arbetet var det oklart hur rotorn skulle vara utformad. Men efter ett möte med beställaren så framkom det en idé om rotorns utformning. Via artiklar⁵, utgivet från beställaren framkom dimensioner och data på både rotorn och rotorbladen som skulle ge en optimal verkningsgrad.

I kravspecifikationen kan man se att vindkraftverket skall klara vindhastigheter upp till 30 m/s (stormstyrka). Därför kontaktas Taghi Karimipannah, som är universitetslektor inom strömningsmaskiner på Högskolan i Gävle och på KTH, för information angående hur rotorbladen samt rotorn påverkas just när vinden träffar ett blad. En dimensionering av rotoraxel visas i bilaga V.

⁵ A. S. Grinspan, P. Suresh Kumar, U.K. Saha, P. Mahanta, D. V. Ratna Rao & G. Veda Bhanu, *Design, Development and testing of savonius wind turbine rotor with twisted blades*, Department of Mechanical Engineering, Indian Institute of Technology
Menet J.-L., Bourabaa N., *Increase in the savonius rotors efficiency via a parametric investigation*, ENSIAME, Université de Valenciennes

7.2 Stöd

Vid bestämning av stödet som hela vindkraftverket vilar på gjordes först en analys på vilka krafter som påverkar stödet. Där framkom det att böjspänningarna är de mest kritiska, vilket stödet dimensionerades mot dessa.

Det finns många faktorer och påfrestningar som påverkar det stöd som vindkraftverket vilar på. De olika påfrestningar som stödet måste klara för att kunna bära upp vindkraftverket är:

- **Böjspänningar**, som verkar då både vinden blåser på verket samt den egna tyngdkraften.
- **Tyngdkraft**, vindkraftverkets egen tyngdkraft.
- **Utmattning**, kommer inte att ses över eftersom de dynamiska krafter som påverkar är för klena.
- **Vridspänningar**, försummas då böjspänningen är den största faktorn.

Det kritiska för det stödet där verket vilar är alltså böjning. Därför kommer beräkningar kring böjning att vara betydande men även dimensionering mot vindkraftverkets tyngdkraft kommer att kontrolleras. Stödet är sedd som en cirkulär rundstång med jämntjock diameter.

7.3 Styrvinge

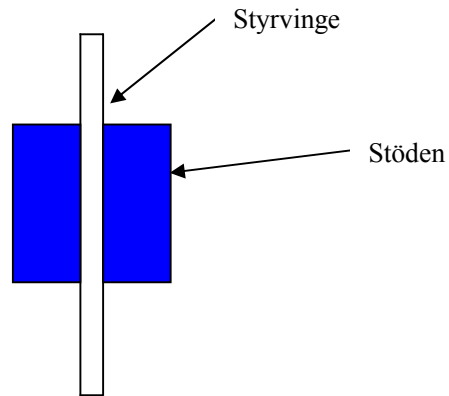
Styrvingen har sitt största syfte att fungera som ett hjälpmedel till att ställa vindkraftverket i rätt läge gentemot vinden så att vinden blåser in genom luftintagen. Med utgångspunkt från de enkla skisserna av beställaren där cirka mått på styrvingen angavs. Styrvingen skulle ha en dimension mellan 3-4 m hög och 4-5 m lång för att ha en så stor area som möjligt som gör det lättare för vindkraftverket att rotera. Samtidigt får styrvingen inte väga för mycket. Efter en modellering dimensionerades styrvingen till 4.0 m hög, 4.2 m lång vilket gav en total area på 10 m² som senare FEM analyserades för att bestämma tjockleken på styrvingen. (*se bilaga VII*)

7.4 Stöd för styrvinge

Efter FEM analysen på styrvingen framkom det att inte så stora spänningar och deformationer påverkar vingen, därför väljs det triangelformade stödet utan förlängningen. Men en ny FEM analys krävs för att bestämma stödets dimensioner då de ska dimensioneras mot styrvingens tyngdkraft. Dessa stöd kommer då att utsättas för böjspänningar. Se bilaga VIII för djupare tester och analyser.

Vid bestämning av stöden för styrvingen gjordes en FEM analys som en undersökning för att få en uppfattning om hur stora stöden kan tänkas behöva vara. Enligt bilaga 8 visades det att styrvingen hade god säkerhet gentemot de dynamiska krafterna. I och med det kan ju stöden bara va en hjälpande faktor i detta fall så därför görs ingen FEM analys i form av den dynamiska påverkan utan enbart den statiska påverkan. Den statiska påverkan är ju bara styrvingens tyngdkraft som påverkar stöden.

En gravitationslast lät påverka styrvingen i dess tyngdpunkt samt styrvingen låstes i dess vänstra kant i alla riktningar, (x-led, y-led och z-led) men alla riktningar är fri för rotation så den kan rotera fritt kring sina axlar. Stöden är rektangulära stänger med 50x20 mm som är fastsatta med största ytan nedåt på styrvingen som syns i nedan. Materialet i stöden är stål med en E-modul på 210 kN/mm^2 . Stöden är tänkta att sitta fast med någon sorts fästordning på fyra ställen på vardera sida om vingen.

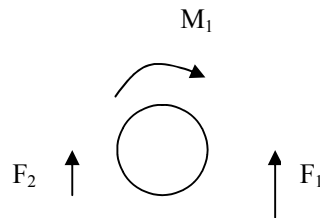


Figur 8 50 mm sidan sitter fast parallellt med styrvingen.

7.5 Vridmekanism

Ett kriterium för vindkraftverket var att det skulle vridas efter vinden med hjälp av styrvingen. För att vindkraftverket skall kunna rotera krävs det att kraften från vinden överstiger friktionen i vridmekanismen. Därmed uppkom idéer att ha en vridmekanism i form av glidlager och bussningar i toppen på stödet precis där vindkraftverket har sin grund. Problemet är att de kräver regelbunden smörjning för att fungera som önskat. Därför är det viktigt att veta vid vilken hastighet som kraftverket börjar rotera samt hur stor area styrvingen behöver ha för att vrida vindkraftverket vid en önskad vindhastighet.

För att verket skall kunna vrida sig så måste momentet kring centrum på stödet vara större än friktionskraften hos vridmekanismen⁶. En tydligare bild (sedd uppifrån på stödet) på hur det är tänkt kan ses nedan.



Figur 9 Vridmekanismen sedd uppifrån

Figur 9 visar hur två olika krafter F_1 och F_2 som uppkommer från vindens hastighet påverkar vindkraftverket och skapar var och en ett moment i varsin riktning. Detta moment som skapas av F_1 måste vara större än F_2 's moment plus friktionsmomentet i glidlagret för att verket skall vrida sig. Beräkningar för detta kan ses i bilaga IX

⁶ Hans Sellén, Universitetsadjunkt inom maskinteknik, Högskolan i Gävle

8 Material

De flesta vindkraftverkets grunder och torn konstrueras i stål, eller i aluminium. Dessa material är bra mot de statiska krafter som vindkraftverket påverkas av men är inte lika bra mot dynamiska krafter och utmattningar. Därför passar sig dessa material till stöden som vindkraftverket kommer att vila på och dess ställning.

Ställen där de dynamiska krafterna är de mest påverkande är inne i rotorn, på rotorbladen och på styrvingen. Dessa delar kommer att utformas med olika typer av glas- eller kolfiberarmerat material då dessa har en hög utmattningsgrad. I tabell 1 har en lista gjorts på material, taget från CES Edupack, som är av intresse för konstruktionen.

| Material | Densitet (kg/m ³) | Pris (kr/kg) | Flytgräns (N/mm ²) |
|--------------------------------------|---|-----------------|-----------------------------------|
| Aluminium (gjutet) | 2.67e ³ - 2.73e ³ | 15 - 17 | 68 - 82 |
| Stål (gjutet med 0.3 – 0.7% kolhalt) | 7.80e ³ - 7.90e ³ | 5 - 6 | 205 - 217 |
| Rostfritt Stål | 7.60e ³ - 8.10e ³ | 47 - 53 | 189 - 210 |
| Glasfiberarmerad plast (Allmän) | 1.13e ³ - 2.00e ³ | 20 - 70 | 2 - 48 |
| Glasfiberarmerad Polyester (30 %) | 1.44e ³ - 1.51e ³ | 24 - 27 | 5.36 - 5.84 |
| Glasfiberarmerad Epoxy | 1.50e ³ - 1.80e ³ | 29 - 32 | 14 - 28 |
| Aramid (Kevlar 29) | 1.43e ³ - 1.45e ³ | 197 - 328 | 62 - 80 |
| Kolfiber (HM, 5 micron) | 1.80e ³ - 1.85e ³ | 265 - 318 | 370 - 390 |
| Kolfiberarmerad Epoxy | 1.40e ³ - 1.70e ³ | 130 - 143 | 69 - 150 |

Tabell 1 Material med deras densitet, pris och flytgräns som är intressanta för vindkraftverket.

8.1 Materialsäkerhet

Vid konstruerandet av vindkraftverket har de delar som har behövt beräknats, har en materialsäkerhet mot materialets flytning använts. Den säkerhet som använts är 3 gånger mot flytgränsen eller ett antagande i tredubblad last. För speciella områden där annat anges kommer detta att anges och följas i beräkningarna.

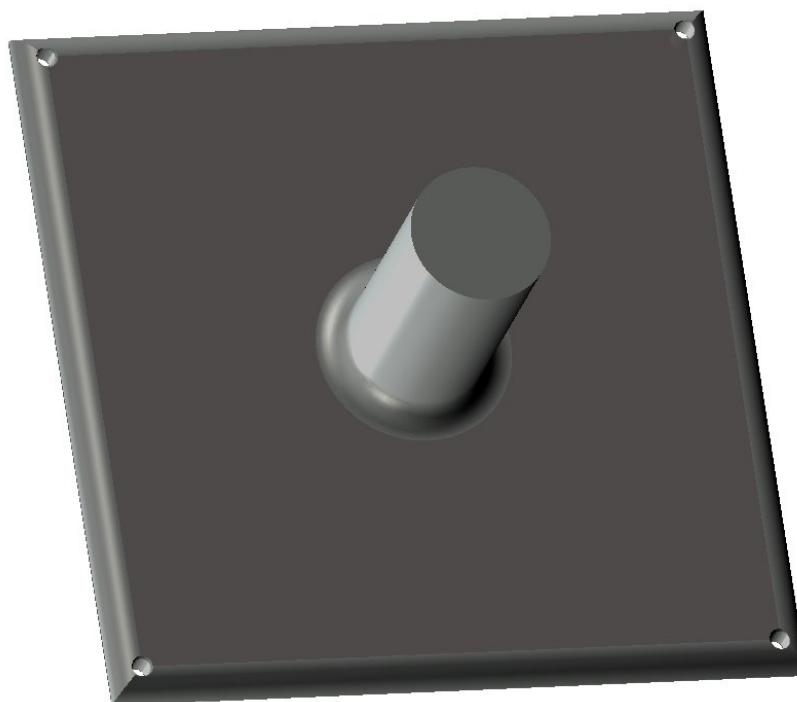
9 Slutlig Konstruktion

Vindkraftverket kommer att ha en längd på ca 8 m, en ca bredd 6.5 m, en höjd på ca 5 m och ha en uppskattad vikt på 250 kg beroende på materialval.

9.1 Stöd

Vindkraftverket kommer att vila på en 200 mm tjock rundstång i stål som klarar de kritiska böjspänningar som stödet påverkas av från uträkningar och antaganden ur bilaga VI. Stödets längd är ännu oklart om hur lång den ska vara. Ett antagande i beräkningen av stödet var att tyngdpunkten för vindkraftverket låg 3 m från stödets botten så lämplig längd vore ca 1 m för stödet.

Rundstången kommer att stadgas av en botten platta som syns i figur 10. Bottenplattan har måtten 250x250 mm och är ca 20 mm tjock. Plattan kommer att fästas på taket med hjälp av 4st M10 10 × 20 – 8.8 skruvar i vartdera hörn. Rundstången kommer att källsvetsas fast på bottenplattans mitt. Slutligen skall ett lagerhus i form av ett radialglidlager och en vridmekanism, som kommer vara en girmotor, sitta mellan stödet och vindkraftverket.



Figur 10 Vindkraftverkets bottenplatta med stöd.

9.2 Styrvinge

Från FEM analysen av styrvingen framkom det att en 10 mm tjock styrvinge klarar de dynamiska påfrestningarna med god säkerhet. Figur 11 visar utformningen på styrvingen.

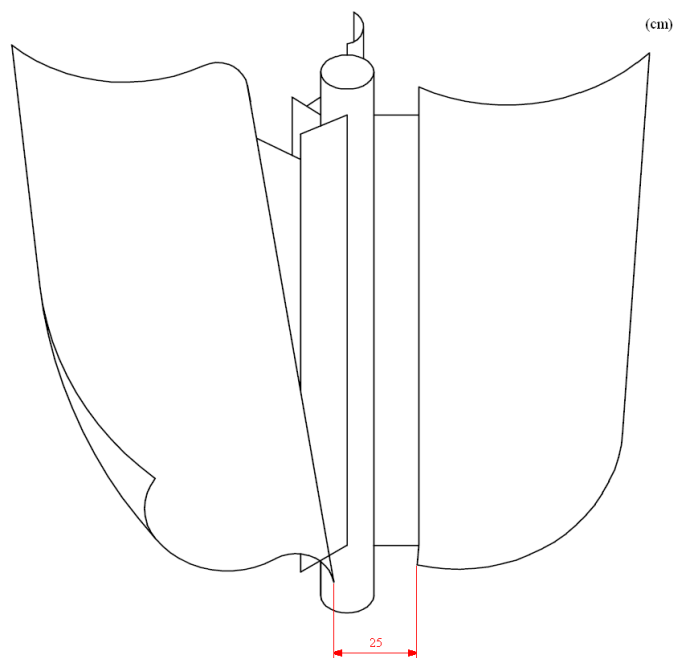
Enligt Pro/Engineer bestämdes styrvingens tyngdpunkt, från vingens mitt på dess vänstersida, i x-led till 2.37 m och i y-led till 0.755 m. Styrvingen är tänkt att vara fastsvetsad med en källsvets runt om dess vänstra kant till vindkraftverkets bakre del mellan de två luftintagen. Detta leder till att styrvingen inte kommer att störa luftflödet ut ur vindkraftverket. Vingen är 10 mm tjock. Dess låga vikt trots klen tjocklek gav gott resultat beträffande deformationen och spänningarna. Dessutom angriper de kritiska spänningarna för den 10 mm:s tjocka vingen vid låsningen där stödet kommer att sitta, så stödet kommer att fungera som en stabiliserare här. Den 10 mm tjocka vingen skulle väga ca 135 kg i kolfiberarmerat Epoxy.



Figur 11 Styrvingen till vindkraftverket sedd från sidan.

9.3 Rotor

Idén för rotorn var att se närmare på en Savonius rotor. Artiklar⁷ på tidigare tester som gjorts utgavs där det beskrevs hur en Savonius rotor kan utformas för att ge optimala verkningsgraden. Dessa artiklar har en person som beställaren har kontaktat forskat fram. Utifrån dessa artiklar framkom att rotorn bör vara dubbelt så hög som dess diameter. Med dess diameter menas avståndet mellan rotorbladens spetsar. Andra faktorer som bestämdes var att använda sig av 3st vridna rotorblad med 120° mellanrum och avståndet mellan rotorbladen bör vara 25 cm och dess vinkel vara 18° . För dessa data får rotorn ett C_p på 0.25 där C_p är en prestationskoefficient. Rotorn är tänkt att börja starta vid en vindhastighet på 2-3 m/s och sluta vid en hastighet på 20 m/s och får uppgå till max 200 varv/min.



Figur 12 Bild på rotorns utformning samt avståndet mellan bladen

⁷ A. S. Grinspan, P. Suresh Kumar, U.K. Saha, P. Mahanta, D. V. Ratna Rao & G. Veda Bhanu, *Design, Development and testing of savonius wind turbine rotor with twisted blades*, Department of Mechanical Engineering, Indian Institute of Technology

9.4 Material

Som tidigare nämnts kommer grundkonstruktionen av vindkraftverket konstrueras i stål alternativt aluminium eftersom de klarar de statiska påfrestningarna bra och båda är billiga material. För att exakt kunna bestämma material för styrvingen, rotorbladen, rotoraxeln bör utmattningstester i t.ex. en vindtunnel eller liknande göras för att vara 100 % säker på vilket material som håller. I uträkningarna har kolfiberarmerad Epoxy använts som har en E-modul mellan $57 - 91 \text{ kN/mm}^2$. Materialet har gett gott resultat hållfasthetsmässigt och en låg total vikt relativt till sitt dyra pris.

9.5 Vridmekanism

Med den arean som var antagit börjar vindkraftverket snurra vid en vindhastighet på 3 m/s. Detta är det optimala då vinden blåser direkt på arean. Man bör ta hänsyn till att vinden kommer blåsa med en vinkel på mellan $1-179^\circ$ där 90° ses som att vinden blåser direkt på arean.

9.6 Styrsystem

Vindkraftverket kommer att tillhanda hålla sig av styrsystem för att öka säkerheten då sensorer övervakar temperatur i generator och andra komponenter, vibrationer i rotor och nätspänning. Överskrider något värde sitt toleransvärde skall vindkraftverket vridas bort från vinden.

9.7 Underhåll

Tanken är att underhåll av verket ska vara så få som möjligt samt vara snabba och effektiva så att verket snabbt vara i bruk igen så effekt förlusten minskas.

Vindkraftverket behöver en årlig uppsyn på:

- Svetsar och rostskydd.
- Sprickbildning eller andra defekter som uppstår via utmattnig.
- Generatorernas kapacitet och livslängd
- Kontroll av styrsystemet

Samtidigt krävs det smörjning kring de rörliga delarna på vindkraftverket.

Rotorn kommer att utrustas med trycksmörjning. Girmotorn som styr vindkraftverket kommer radiallager att användas som smörjs regelbundet.

9.8 Svetsar

Där svetsar förekommer eller behövs kommer källsvetsar att dominera svetstypen om inget annat anges eller krävs. Svetsar som utsätts för böjning för komplicerade profiler kommer ett a-mått som motsvarar $0.64 \cdot$ godstjockleken vid intilliggande liv eller fläns⁸. För svetsar som utsätts för en statisk belastning bör inte svetslängden vid en kraftöverföring överstiga $10 \cdot$ a-måttet och vid fleraxligt spänningstillstånd får inte jämförelsespänningen överstiga $1.1 \cdot \sigma_{ill}$ ⁹.

9.9 Lager

För axiella leder som vid stödet där vindkraftverket vilar samt för rotoraxeln är radialglidlager av stort intresse. Är rotorn konstruerad i något annat material än icke-metalliskt är ett radialglidlager inte lämpligt. Radiallager kommer därför att väljas till stödet eftersom ett radiallager fungerar på ett sådant sätt som är bra för den här konstruktionen.

⁸ Dahlvig, Gunnar, *Konstruktionselement och maskinbyggnad*, sid 1:19-1:20

⁹ Dahlvig, Gunnar, *Konstruktionselement och maskinbyggnad*, sid 1:11-1:12

10 Fortsatt arbete

Detaljer, analyser och beräkningar som fortfarande är kvar att göra i arbetet är:

- Se över utmattning på hela vindkraftverket och dess komponenter.
- Egensvängningar för hela vindkraftverket men främst hos de rörliga delarna som rotoraxel och rotorblad.
- Noggrannare beräkningar och analyser på rotoraxeln.
- Ritningar för hela vindkraftverket med dess komponenter.
- Vindkraftverket modellerat i 3D.
- En analys på stöden för styrvingen samt styrvingen då de dynamiska plus de statiska krafter påverkar.
- Utformning av stöden som fästes mellan rotoraxeln och rotorbladen.
- Utveckla och bestämma typ av girmotor för vridmekanismen.
- Bestämma dimension och typ för lagerhus.

11 Diskussion och slutsats

Arbetet startade med att samla så mycket information som möjligt inom vindkraft. Utan den rätta informationen var det mycket som kunde fel senare för konstruktionen. Förstudien och informationsinsamlingen var väldigt viktiga då utan rätt information kunde onödigt arbete, som att undersöka utmattning för rotorblad och rotor, undvikas då man behöver exaktare resurser för sådant. Dessutom underlättade det vid konstruktionen eftersom grundläggande beräkningsformler och synsätt gav en tydligare uppfattning på problemet. Samtidigt var det svårt att hitta idéer till lösningar på problemen då det inte fanns tillräcklig information för det här specifika vindkraftverket. Hela vindkraftsindustrin är fortfarande i ett utvecklingsstadium där nya produkter dyker upp på marknaden. Alla vindkraftverk har ju sina egna egenskaper och med alla dess små komponenter och detaljer gör det svårt att avgränsa sig eftersom en liten detalj påverkar en annan o.s.v. till slut är hela verket involverat. Det har blivit mycket antaganden inom arbetet, vilket kan vara fel antaganden som kan leda till att analyser och beräkningar som gjorts är felaktiga, men de har ändå gett en uppfattning om hur stora dimensioner som krävs.

Finns fortfarande mycket kvar att jobba med för att kunna konstruera detta vindkraftverk då för många uppgifter åtog under denna korta tid som angivits. Resultatet av det var ju att saker inte hann utvecklas djupare.

12 Referenser

12.1 Böcker

Wizelius, Tore, *Vindkraft i teori och praktik*, Studentlitteratur, 2007, andra upplagan

Bokalders Varis & Nittve Bengt & Hedblom Lennart & Dahlkild Birgitta, *Solkraft, Vattenkraft, Vindkraft, By och Bygd*, 1978, andra reviderade upplagan

Forsman, Daniel, *Konstruera med Pro/ENGINEER Wildfire 3.0*, Studentlitteratur, 2006

Björk, Karl, *Formler och Tabeller för Mekanisk Konstruktion*, Mekanik och Hållfasthetslära, sjätte upplagan

Björk, Lars-Eric m.fl., *Formler och Tabeller från Natur och Kultur*, Bokförlaget Natur o Kultur, Stockholm

Dahlvig, Gunnar, *Konstruktionselement och maskinbyggnad*, Liber, 2003, sjätte upplagan

12.2 Artiklar

A. S. Grinspan, P. Suresh Kumar, U.K. Saha, P. Mahanta, D. V. Ratna Rao & G. Veda Bhanu, *Design, Development and testing of savonius wind turbine rotor with twisted blades*, Department of Mechanical Engineering, Indian Institute of Technology

Menet J.-L., Bourabaa N., *Increase in the savonius rotors efficiency via a parametric investigation*, ENSIAME, Université de Valenciennes

12.3 Internet

Samtliga Internetsidor var tillgängliga juni 2009.

<http://www.verticalwind.se/SV/technology.html>

<http://www.windpower.org/>

<http://24volt.eu/index.php>

12.4 Personliga källor

Sellén, Hans, *Universitetsadjunkt*, Institutionen för Energi- och maskinteknik, Högskolan i Gävle

Karimipannah, Taghi, *Universitetslektor*, Institutionen för Energi- och maskinteknik, Högskolan i Gävle

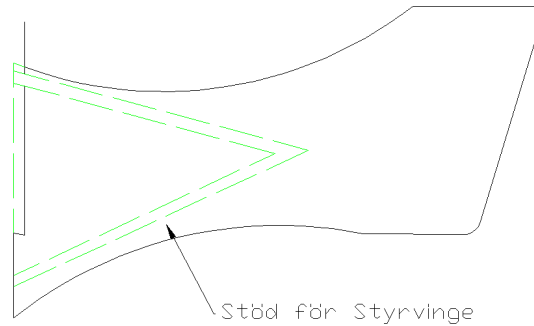
Blomqvist, Per, *Assistent*, Institutionen för Energi- och maskinteknik, Högskolan i Gävle

Bilagor

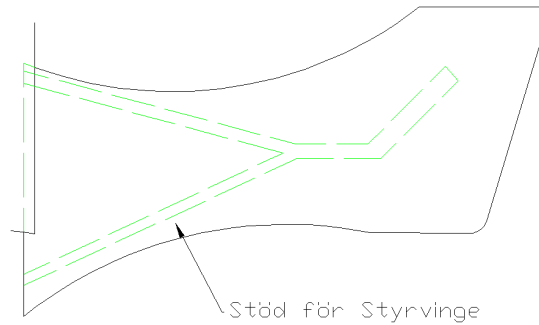
| | | |
|-------------|--|-------|
| Bilaga I | Brainstormning av stöd för styrvinge | I |
| Bilaga II | FMEA | II |
| Bilaga III | Parvis jämförelse (PUGH) | III |
| Bilaga IV | Beräkningar av angripande krafter | IV |
| Bilaga V | Dimensionering av rotoraxel | VI |
| Bilaga VI | Beräkningar för angripande krafter på stödet | VII |
| Bilaga VII | FEM - analys av styrvinge | XIII |
| Bilaga VIII | Utformning av stöd för styrvingen | XIX |
| Bilaga IX | Vridningsmekanism mot vinden | XXIII |

Bilaga I Brainstormning av stöd för styrvinge

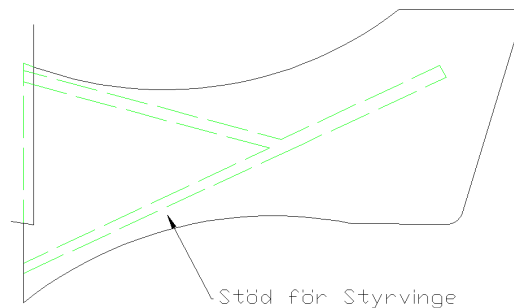
Vid en brainstorming av stödet för styrvingen uppkom det 3 förslag. Kriterierna för stödet är att det ska kunna hålla kvar styrvingen då vindhastigheter upp till orkan styrka påverkar vindkraftverket samt styrvingens tyngd. Dessa 3 förslag ses i figurena nedan.



Figur 1. Förslag 1, stöden bildar en triangel



Figur 2. Förslag 2, stöden bildar en triangel som går ut till ett extra stöd



Figur 3. Förslag 3, stöden bildar en triangel där ena balken är förläng

Bilaga II FMEA

| FMEA för Vindkraftverk | | | | | | | | Sida: 1 (1) | Datum: 2009-05-30 | | | |
|---------------------------|------------------------------------|-------------------------------|--|------------------|---|---|-----|--|----------------------|---|---|----|
| Plats för felet | Felets typ | Konsekvens | Felets orsak | Riskuppskattning | | | | Förslag till åtgärder | Riskuppskattning | | | |
| | | | | O | S | D | RN | | O | S | D | RN |
| Hela Vindkraft- verket | Egensvängning | Obrukbar | Sprickor uppkommer p.g.a. svängningar | 3 | 5 | 7 | 105 | <ul style="list-style-type: none"> Att göra noggranna beräkningar och tester i t.ex. en vindtunnel | 3 | 2 | 4 | 24 |
| Luftintagen | Luftintagen för små | Ingen elektrisk energi skapas | Otillräcklig mängd luft startar inte rotorn | 1 | 3 | 1 | 3 | <ul style="list-style-type: none"> Göra tester i t.ex. en vindtunnel. Utöka arean för luftintaget | 2 | 5 | 1 | 10 |
| Girmotor | Verket vrider sig inte emot vinden | Ingen elektrisk energi skapas | För liten vindhastighet eller för liten area på styrvingen | 7 | 6 | 1 | 42 | <ul style="list-style-type: none"> Låg friktion hos girmotorn. Smörjning då friktionen börjar bli för stor. Utöka arean för styrvingen. | 4 | 6 | 1 | 24 |
| Stödet | Spricker | Obrukbar | Stötar, slag | 4 | 5 | 6 | 120 | <ul style="list-style-type: none"> Avrunda kanter Stabilisera med en bottenplatta | 3 | 5 | 3 | 45 |

Bilaga III Parvis jämförelse (PUGH)

Kriterier

De framtagna kriterierna är hämtade dels från beställarens önskemål men även från kravspecifikationen.

| | |
|---|--------------------|
| A | Lång livslängd |
| B | Låg vikt |
| C | Lätt servad |
| D | Enkel tillverkning |
| E | Pris |
| F | Standarddetaljer |
| G | Säkerhet |

Tabell 1. Kriterier

Rangordning (Parvis jämförelse)

Här är kriterierna jämförda gentemot varandra. Den som är viktigare än den andra har fått en "1" således en "0" till den mindre viktiga.

| | A | B | C | D | E | F | G | Totalt |
|---|---|---|---|---|---|---|---|--------|
| A | | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 6 |
| B | 0 | | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 4 |
| C | 0 | 0 | | 1 | 0 | 1 | 0 | 2 |
| D | 0 | 0 | 0 | | 0 | 1 | 0 | 1 |
| E | 0 | 0 | 0 | 1 | | 1 | 1 | 3 |
| F | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | | 0 | 0 |
| G | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | | 4 |

Tabell 2. Rangordning

Rangordnade kriterier

Vid sammanställning blev resultatet följande

| | |
|---|--------------------|
| 1 | Lång livslängd |
| 2 | Låg vikt |
| 3 | Säkerhet |
| 4 | Pris |
| 5 | Lätt servad |
| 6 | Enkel tillverkning |
| 7 | Standarddetaljer |

Tabell 3. Sammanställt resultat

Bilaga IV Beräkningar av angripande krafter

Då vinden blåser på ett stående objekt, t.ex. en vattenflaska kan det vid tillräckligt hög hastighet på vinden blåsa omkull vattenflaskan. Med dessa beräkningar ska en påverkande kraft, F bestämmas för vindens hastighet och hur den påverkar styrvingen och vindkraftverket som helhet.

Vindens effekt beräknas med:

$$P = \frac{1}{2} \cdot \dot{m} \cdot v^2 \quad (1)$$

där

P = kinetisk energi (W)

\dot{m} står för massflödet; $\dot{m} = \rho \cdot A \cdot v$ (kg/s)

ρ = luftens densitet (kg/m³)

A = Arean (m²)

v = vindens hastighet (m/s)

Vid beräkningar för luftens densitet används normalt luft vid havsytan (1 bar) och temperaturen 9°C; 1.25 kg/m³.

Effekt definieras också som:

$$P = F_s \cdot v \quad (2)$$

där

F_s = kraftens komponent i rörelseriktningen (N)

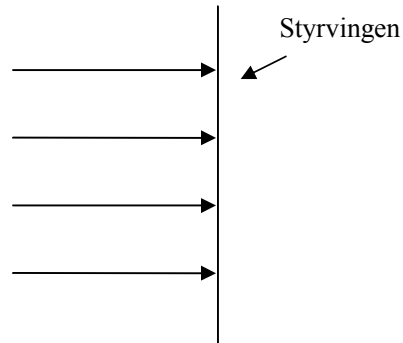
v = hastigheten (m/s)

Slår man ihop formlerna (1) och (2) och löser ut F_s får man:

$$\boxed{F_s = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^2} \quad (3)$$

Kraft och tryck på styrvinge

Denna beräkning beskriver det värsta scenariot av krafter som styrvingen påverkas med då vinden blåser med stormstyrka. Projektion från sidan på styrvingen kan ses i bilden nedan för att se hur vinden påverkar styrvingen.



Vid beräkningen av kraften på styrvingen sattes respektive data in i (3).

$$\rho = 1.25 \text{ kg/m}^3$$

$A = 10\text{m}^2$ (från den uppritade styrvingen i Pro/Engineer)

$v = 30 \text{ m/s}$ (stormstyrka)

Detta ger kraften, $F = 5.63 \text{ kN}$ (kan försummas så att den angriper vid tyngdpunkten)

Trycket som påverkar styrvingen definieras som:

$$P = \frac{F}{A}$$

Det påverkande trycket, P blir då 563 N/m^2 vilket motsvarar 563 pascal (Pa).

Bilaga V Dimensionering av rotoraxel

Vid dimensioneringen har formler och information från de utgivna artiklarna¹⁰ använts. Rotordiametern bestämdes av beställaren till 1 m vilket ger längden på rotoraxeln till 2m. I artikeln beskrevs det att vridmomentet hos rotoraxeln kan beräknas med:

$$M_{\max} = C_m \cdot \rho \cdot R^2 \cdot H \cdot U^2$$

där

$$\rho, \text{ vindens densitet} = 1.25 \text{ kg/m}^3$$

$$R, \text{ avståndet från centrum till rotorbladets spets} = 0.5 \text{ m}$$

$$H, \text{ längden på rotoraxeln} = 2 \text{ m}$$

$$U, \text{ hastigheten för vinden,} = 30 \text{ m/s}$$

$$C_m, \text{ momentkoefficient} = 0.33$$

Det är inte meningen att rotorn skall utsättas för en vindhastighet på 30 m/s men det kan finnas chans att detta händer. Så då kommer rotoraxeln att dimensioneras mot det värsta scenariot. Värdet på C_m förklaras närmare i den utgivna artikeln.

Kritiska spänningar som uppkommer på rotorn är vridspänningar vilket rotorn kommer att utformas emot. Även utmattning påverkar rotorn men en utmattnings beräkning och analys kräver bättre dataprogram och mer vetenskap om hur det fungerar så detta kommer inte att göras. Material som kommer att användas för beräkningar är den kolfiberarmerade Epoxy med en flytgräns på 100 N/mm^2 . En säkerhet på 3 gånger mot flytning av materialet används. Rotoraxeln kommer att dimensioneras i form som en cirkulär rundstång.

Formeln för vridning för att beräkna vridspänningar är:

$$\sigma_{\max} = \frac{M_{\max}}{W_{\max}}$$

där

$$\sigma_{\max} = 100 \text{ N/mm}^2 \text{ med } n = 3 \text{ så blir } \sigma_{\text{till}} = 33 \text{ N/mm}^2$$

¹⁰ Menet J.-L., Bourabaa N., *Increase in the savonius rotors efficiency via a parametric investigation*, ENSIAME, Université de Valenciennes

$$W_{\max} = \frac{\pi \cdot d^3}{16}$$

Brytes sedan diametern, d ut så kan vi bestämma hur stor den ska vara.

$$d = \sqrt[3]{\frac{M_{\max} \cdot 16}{\pi \cdot \sigma_{ill}}} \approx 30.3 \text{ mm}$$

Rotoraxel med diameter 31 mm och grövre kan användas.

Bilaga VI Beräkningar för angripande krafter på stödet

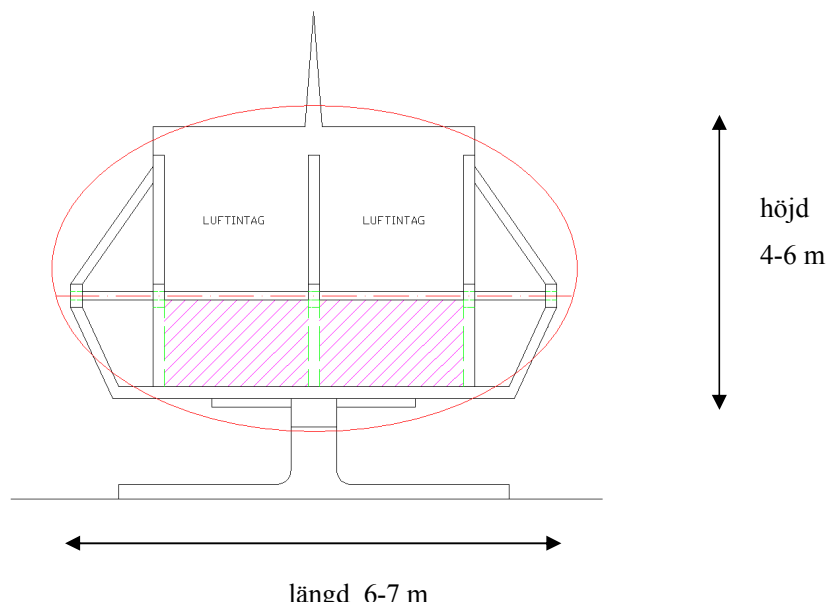
Böjning (1:a scenariot)

Stödets diameter kommer att dimensioneras mot det värsta scenariot. När det gäller då vinden blåser på vindkraftverket är det dess area som är den bestämmande faktorn, ju större area desto större kraft enligt bilaga 5.

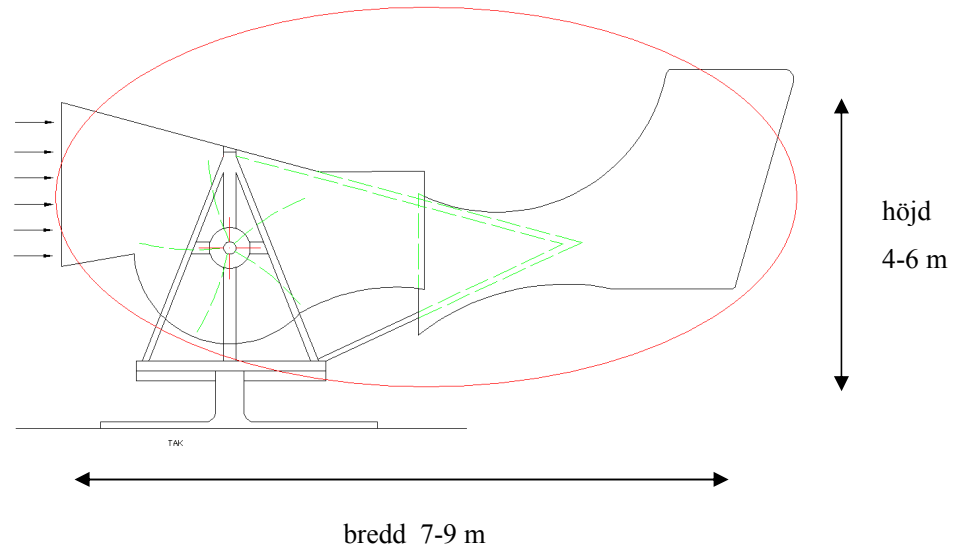
De två fall som kommer beaktas är när vinden blåser framifrån (igenom luftintagen) och från sidan. Dessa ställen anses arean vara störst på.

I figurerna på nästa sida, visar det omringande området arean som kommer att antas för beräkningarna.

Framifrån



Från sidan



På sidovyn ser det ut som att arean är störst. Men efter utritning av styrvingen i Pro/Engineer (där den blev ca 4 m lång och 4 m bred) så blev styrvingen bara 10 m². Då det inte finns några tidigare uträkningar på verket antar jag att det resterande av verket är ca 15 m². Totalt blir det 25 m².

Som tidigare nämnt finns det inga tidigare uträkningar på verket eller bestämda dimensioner. Så på vyn framifrån antas vindkraftverket ses som en 6 m lång och 5 m hög rektangel. Det blir en total area på 30 m². Därför är vyn framifrån det värsta scenariot i detta fall.

Kraften som anbringas på vindkraftverket sett framifrån då det blåser stormstyrka (30 m/s) kan beräknas med formel (3) i bilaga 5.

$$F = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^2 = \frac{1}{2} \cdot 1.25 \cdot 30 \cdot 30^2 \approx 17 \text{ kN}$$

När man dimensionerar diametern på stödet med tanke på böjning används följande formler:

$$\sigma_{\max} = \frac{M_{\max}}{W_{\max}}$$

där

$$\sigma_{\max} = 210 \text{ N/mm}^2 \text{ (Flytgräns för stål)}$$

$$M_{\max} = F \cdot L \text{ (L är avståndet från stödets botten till vindkraftverkets tyngdpunkt i höjdled)}$$

$$W_{\max} = \frac{\pi \cdot d^3}{32} \quad (\text{d är stödets diameter})$$

Antar att höjden från stödets botten till tyngdpunkten är 3m (värsta scenariot) sedan väljs en materialsäkerhet på 3gångar mot flytning. Detta ger att $\sigma_{\max} = 70 \text{ N/mm}^2$.

Med formlerna ovan kan diametern, d brytas ut och bestämmas:

$$d = \sqrt[3]{\frac{17000 \cdot 3000 \cdot 32}{70 \cdot \pi}} \approx 195 \text{ mm}$$

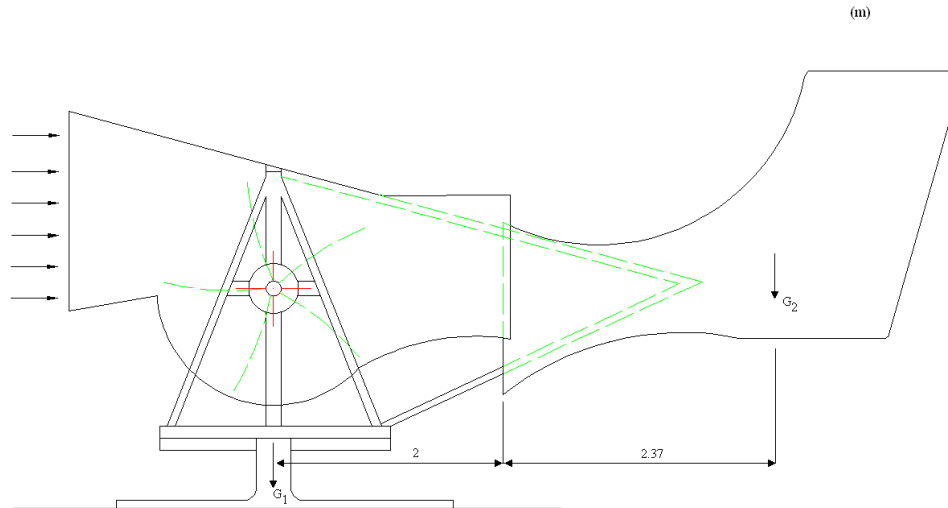
En diameter med 200 mm kan användas.

Böjning (2:a scenariot)

Även vindkraftverkets egentyngd med dess komponenter påverkar stödet för böjning. Tyngdpunkten i x-led är också en påverkande faktor för böjningen i stödet. Tyngdpunkten på vyn framifrån antas vara på mitten men tyngdpunkten på sidovyn är allt annat än på mitten. I sidovy figuren kan man tydligt se att tyngdpunkten bör vara förskjuten till höger. Vi vet enligt uträknat i Pro/Engineer att tyngdpunkten i x-led för styrvingen är lokaliserat 2.37 m från dess vänstra kant.

Antar vi att vindkraftverket(utan styrvingen) har sin absoluta tyngdpunkt, G_1 (i x-led) precis i centrum på stödet så kan vindkraftverkets egentyngd försummas.

Detta ger att styrvingens tyngd, G_2 multiplicerat med gravitationen och hävarmen ger det kritiska momentet, se figur nästa sida.



Avståndet från styrvingens vänstra kant till centrum för stödet är en uppskattad längd till 2m. Med formlerna och materialsäkerheten från föregående böjningsberäkning kan denna utböjning bestämmas:

$$M = F \cdot L$$

där

$$F = m_{styr} \cdot g \text{ (gravitationen, } g \text{ är } 10 \text{ vid dessa beräkningar)}$$

$$d = \sqrt[3]{\frac{1350 \cdot 4370 \cdot 32}{70 \cdot \pi}} \approx 95 \text{ mm}$$

Denna diameter är mindre än den som bestämdes för det första scenariot.

Dimensionering mot tyngdkraft

Stödet påverkas ju även av en tyngdkraft från vindkraftverket. Denna tyngdkraft fördelar sig på stödets area. Även här används en materialsäkerhet 3 ggr mot flytning för stål. Stödets diameter bestäms då med hjälp av:

$$\sigma_{iull} = \frac{F}{A}$$

där

$$\sigma_{stål} = 210 \text{ N} / \text{mm}^2$$

$F = m \cdot g$, m är hela vindkraftverkets massa och g är gravitationen (N)

$A = \pi \cdot r^2$, stödets area (mm^2)

Ett antagande på vikten för hela verket uppskattas till 250 kg plus 10 kg snö som kan förekomma.

Genom att bryta ut radien, r i de ovanstående formlerna kan stödets diameter bestämmas:

$$r = \sqrt{\frac{260 \cdot 10}{70 \cdot \pi}} \approx 3.5 \text{ mm}$$

Detta ger en diameter på 7mm.

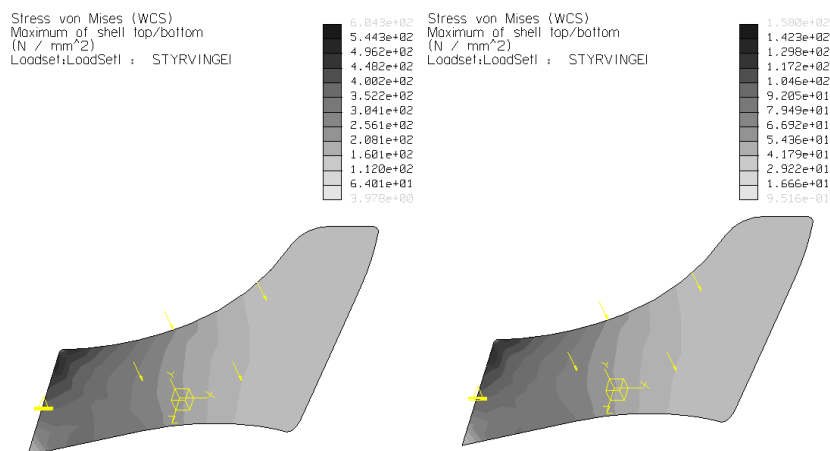
Bilaga VII FEM - analys av styrvinge

Denna analys gjordes för att få en uppfattning om hur stora deformationer och spänningar det blir på styrvingen då den utsätts för de olika krafter som uppkommer vid stormvindar (30 m/s). Detta ska leda till en enklare bestämning av stödet för styrvingen. Styrvingen är utsatt för ett tryck på 563 Pa (riktat mot papperet) vilket är uträknat i bilaga 5. Vingen är låst i dess vänstra sida i alla riktningar förutom för rotation i X & Y led.

Materialen som används är ett kolfiberarmerad Epoxy med E-modul på 100 kN/mm². Detta material användes p.g.a. dess höga E-modul relativt till ett lågt pris. Det använda koordinatsystemet är det som syns i den statiska analysen.

Här följer resultat på statiska och dynamiska tester som har gjorts. Även ett resultat av rotationen ses över för att få en bild på hur mycket den roterar. Utmatningstest kommer inte att göras då FEM inte har den exaktheten som krävs för att generera bästa möjliga resultat.

En statisk analys gjord på 10 mm respektive 20 mm tjock vinge. I den vänstra visas den 10 mm tjocka vingen där spänningen uppgår till 600 N/mm². I den högra, som är den 20 mm tjocka vingen, blir spänningen inte lika hög. Den når upp till 150 N/mm².

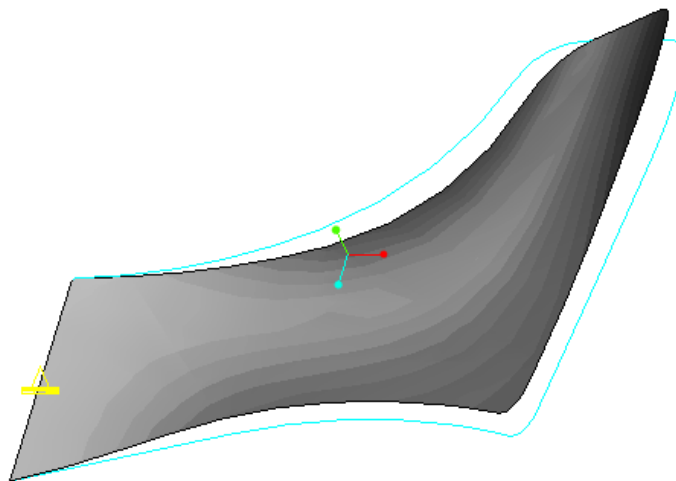
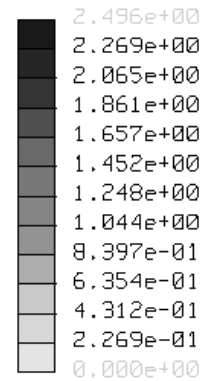


Första testet

I den första analysen testades styrvingen med en tjocklek på 10 mm för ett dynamiskt tryck. Resultaten är som följer nedan.

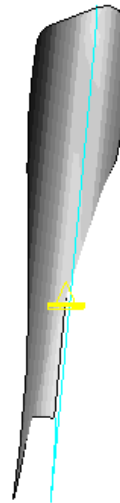
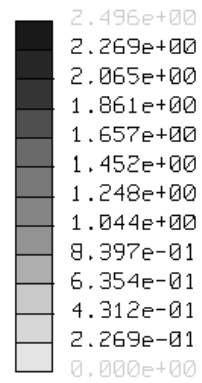
Deformationen på styrvingen då den utsätts för det dynamiska trycket på 563 Pa. Vi ser att den maximala utböjningen är 2.5 mm och är högst upp på vingen.

Displacement Mag (WCS)
(mm)
Deformed
Max Disp +2.4964E+00
Scale 1.6905E+02
Mode Combination



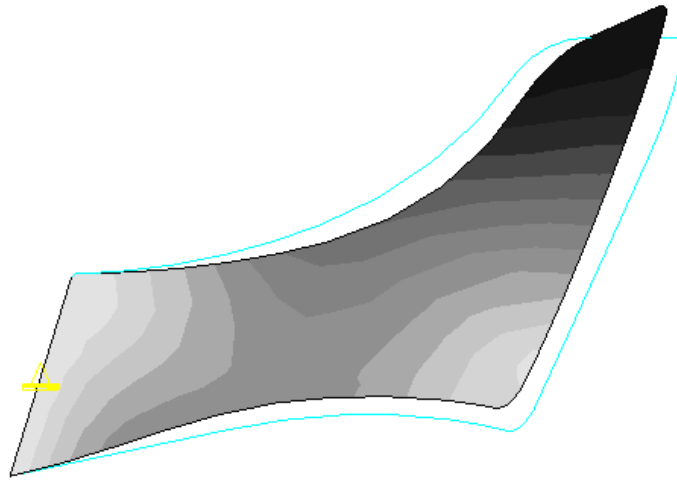
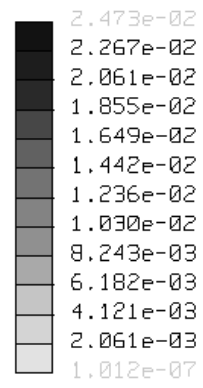
Här ser vi vingen bakifrån för att ge en tydligare vy hur vingen deformeras.

Displacement Mag (WCS)
(mm)
Deformed
Max Disp +2.4964E+00
Scale 1.6905E+02
Mode Combination

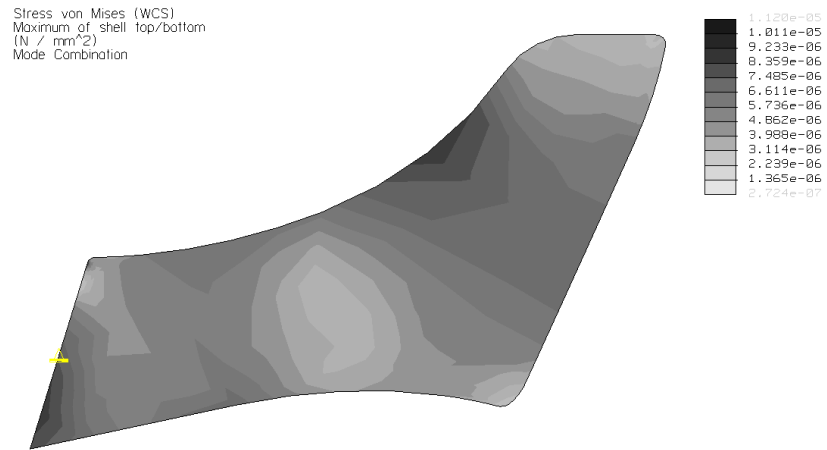


För en kontroll på hur mycket vingen skulle vrida sig gjordes också en rotations test där det syns att vingen har vridit sig $2.47e^{-02}$ radianer vilket motsvarar 1.42° .

Rotation Mag (WCS)
(rad)
Deformed
Scale 1.7190E+04
Mode Combination



Här syns en bild på spänningarna som uppkommer på den 10 mm tjocka styrvingen då den utsätts för det dynamiska trycket. Den maximala spänningen uppgår till $1.01e^{-5}$ N/mm² vilket är nere vid låsningen(hela vingens vänstersida) och på vingens mittsektion till vänster.

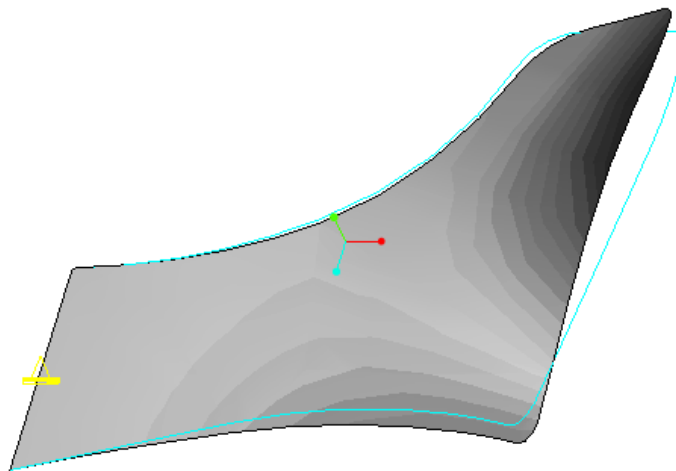
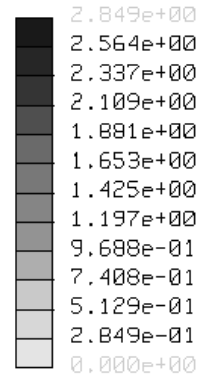


Andra testet

Den andra analysen testades med en 20 mm tjock styrvinge för det dynamiska trycket. Denna analys gjordes för att se om det är någon märkbar skillnad i deformation och spänning jämfört med den 10 mm tjocka vingen.

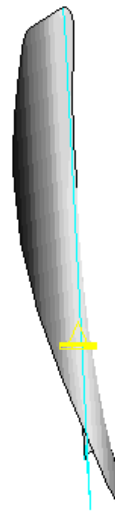
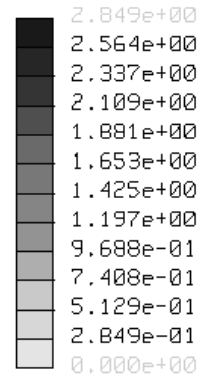
Maximala deformationen hos styrvingen ligger på ca 2.85 mm vilket är lokaliserat vid vingens övre del.

Displacement Mag (WCS)
(mm)
Deformed
Max Disp +2.8494E+00
Scale 1.4811E+02
Mode Combination



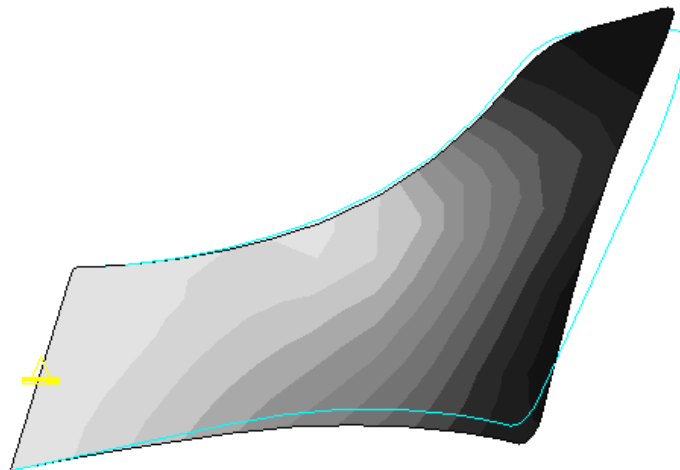
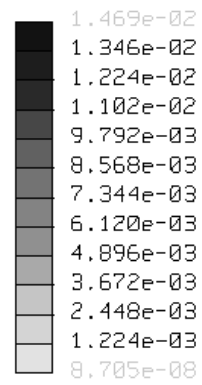
Även här har en bild tagits från vingens baksida för att ge en tydligare vy på deformationen.

Displacement Mag (WCS)
(mm)
Deformed
Max Disp +2.8494E+00
Scale 1.4811E+02
Mode Combination

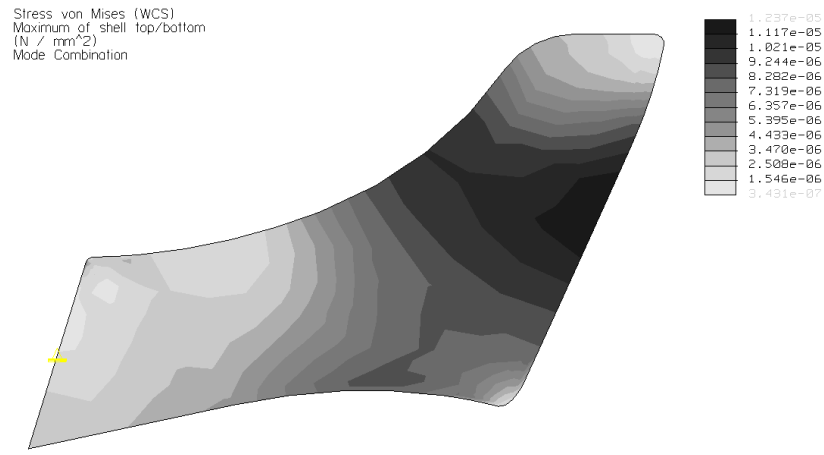


En kontroll på rotationen gjordes även här vilket resultera i $1.47e^{-2}$ radianer som motsvarar 0.84° . Rotationen är som värst uppe på toppen på vingen.

Rotation Mag (WCS)
(rad)
Deformed
Scale 1.4811E+02
Mode Combination



Slutligen de angripande spänningarna på vingen. Den maximala spänningen uppgår till $1.2e^{-5}$ N/mm² som angriper i mitten på vingen som man tydligt kan se på bilden.



Kommentar på FEM analysen

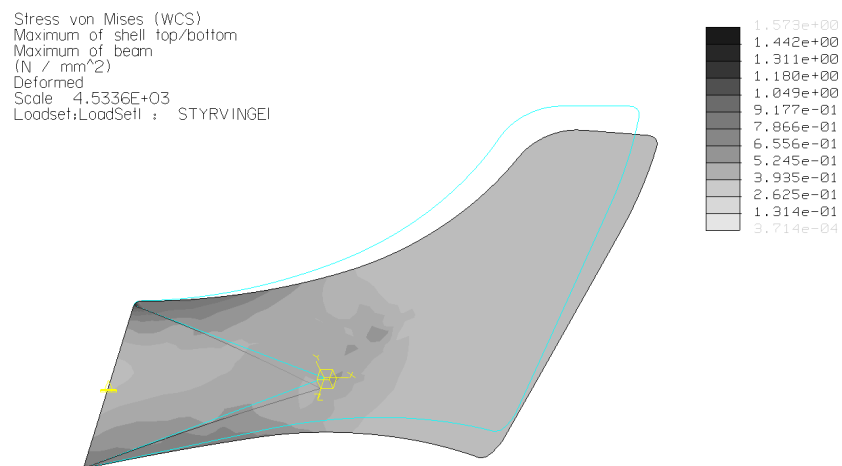
Ett tredje test med 30 mm tjocklek var inte aktuellt då styrvingen skulle väga för mycket. Redan vid 20 mm tjocklek väger vingen 270 kg i kolfiberarmerad Epoxy som har en densitet på $1.4e^3 \text{ kg/m}^3$.

Det statiska testet är inte av intresse vid denna utformning eftersom vindförhållanden är det aldrig en konstant last som påverkar.

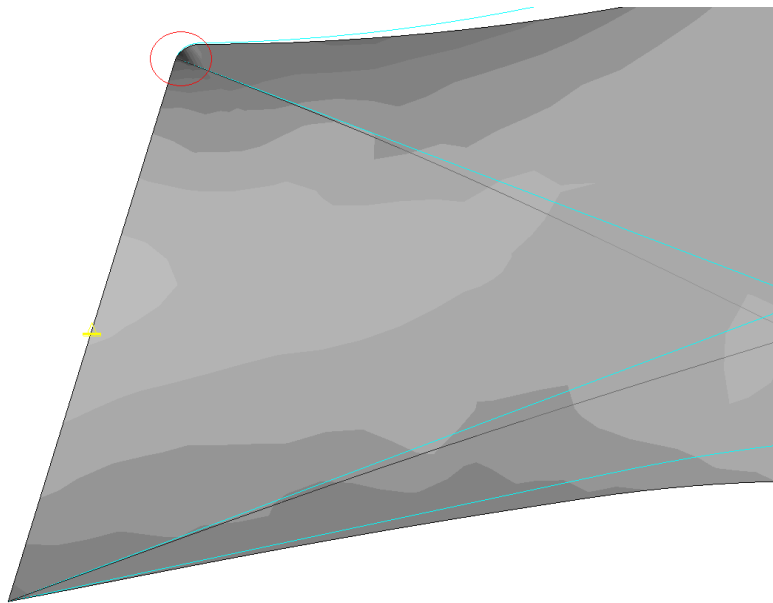
Bilaga VIII Utformning av stöd för styrvingen

Första testet

I det första testet testades stöden gentemot de statiska krafterna från styrvingens tyngd. Stöden är ritade som en triangelform som går ihop ca 500 mm från vingens vänstra kant där den är låst. Bilden nedan visar spänningarna som uppkommer på stöden och vingen. Notera att i bilderna är vingen och stöden deformerade och de ljusblå strecken visar den ursprungliga formen. Som synes i bilden uppgår inte spänningen till mer än 1.4 N/mm^2 vilket är väldigt liten spänning.

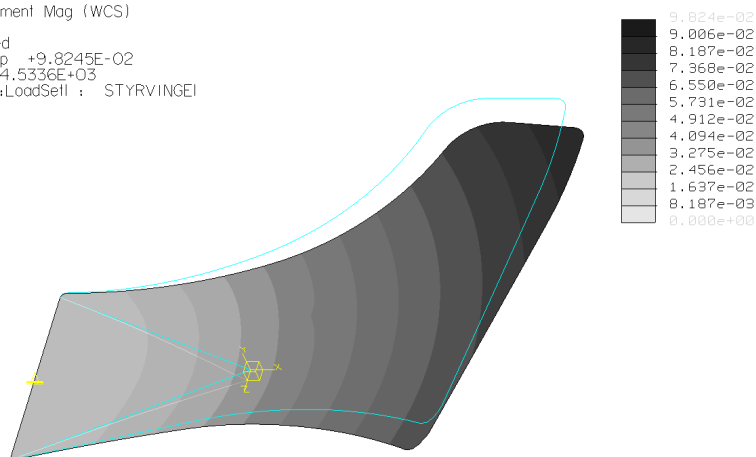


Här visas en förstoring av styrvingens vänstra sida för att lättare se var de kritiska spänningarna angriper. Som synes i bilden angriper spänningarna i hörnet samt på de tillagda stöden.



En bild på hur mycket styrvingen böjer sig är också av intresse vid denna studie. Som synes i bilden nedan är den maximala deformationen mindre än 1mm på vingens topp. Detta är ju ett gott resultat.

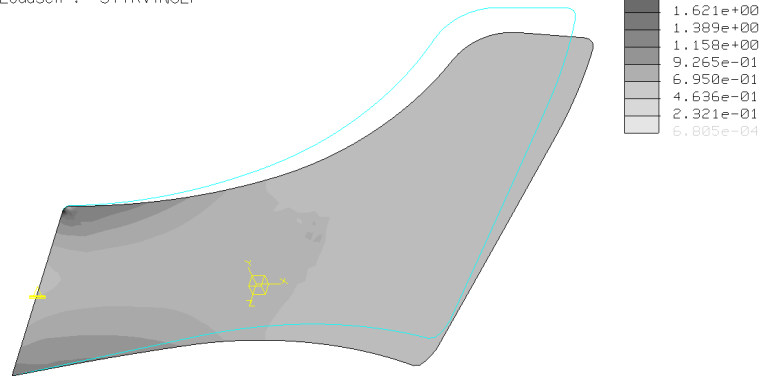
Displacement Mag (WCS)
 (mm)
 Deformed
 Max Disp +9.8245E-02
 Scale 4.5336E+03
 Loadset:LoadSet1 : STYRVINGEI



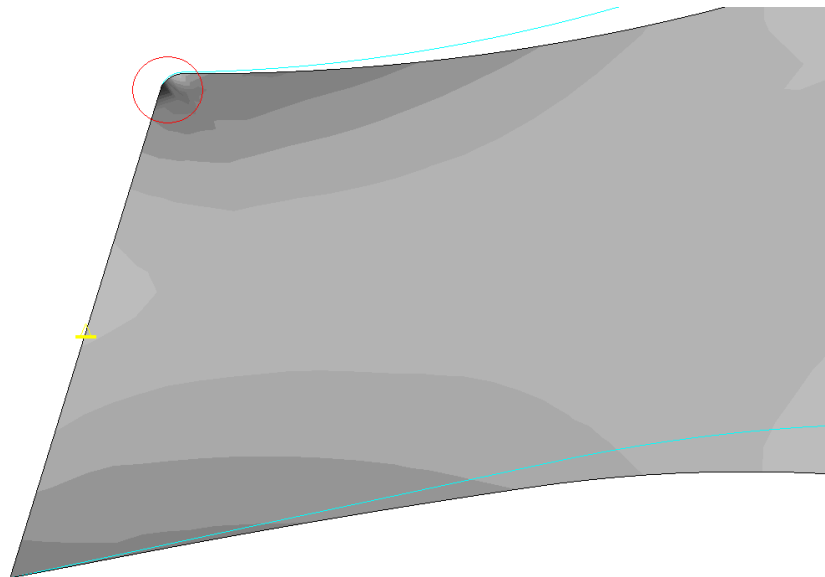
Andra testet

Det andra testet gjordes för att se skillnaden mellan då styrvingen är fri från stöden och då den har hjälp av stöden. Som synes i bilden nedan blir spänningarna nästan dubbelt så stora och angriper på samma ställe. Övrigt är den ingen större påfrestning på vingen.

Stress von Mises (WCS)
Maximum of shell top/bottom
(N / mm²)
Deformed
Scale 3,3660E+03
Loadset:LoadSet1 : STYRVINGE1

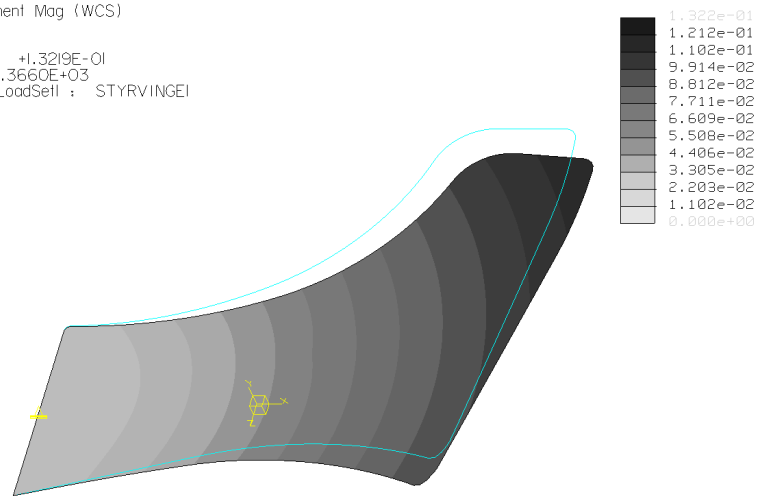


Bilden nedan visar en förstoring av den föregående bilden för att tydligare visa var de kritiska spänningarna uppkommer.



Till sist en bild på deformationen på vingen. Utböjningen har ju inte ökat märkbart utan ligger fortfarande under 1mm och på vingens topp. Tyder på att styrvingen klarar sin egentyngd bra.

Displacement Mag (WCS)
(mm)
Deformed
Max Disp +1.3219E-01
Scale 3.3660E+03
Loadset:LoadSet1 : STYRVINGE1

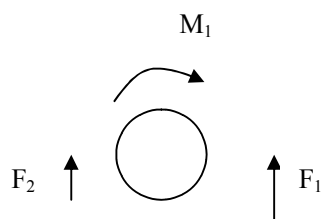


Kommentar

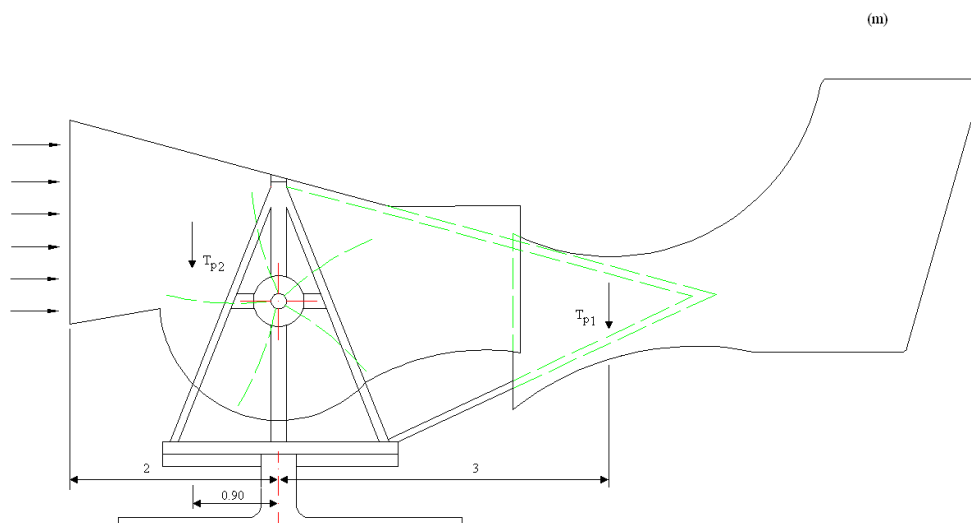
Då den statiska jämföringen inte gav något ansenligare resultat i varken spänningar eller deformation bör man kanske tänka på ifall stödet till styrvingen är nödvändig. Samtidigt bör mer exakta uträkningar göras inom detta område samt se över fästansordningen för styrvingen. Det kan vara så att aluminium kan användas istället för stål eller något annat material som är lättare.

Bilaga IX Vridningsmekanism mot vinden

Ett krav på vindkraftverket är att den skall kunna vrida sig emot vinden. Därmed uppkom idéer att ha en vridmekanism i form av glidlager och bussningar i toppen på stödet precis där vindkraftverket har sin grund. För att verket skall kunna vrida sig så måste momentet kring centrum på stödet vara större än friktionskraften hos vridmekanismen¹¹. En tydligare bild (sedd uppifrån på stödet) på hur det är tänkt kan ses nedan.



Här är M_1 vridmomentet i glidlagret, F_1 & F_2 är den totala kraften från vinden försummat till varsin tyngdpunkt i x-led på vardera sida om stödet. Även här är areorna och längderna till vardera tyngdpunkter uppskattade mot det värsta scenariot. Tyngdpunkterna i x-led som uppskattats kan ses i figuren nedan.



¹¹ Hans Sellén, Universitetsadjunkt inom maskinteknik, Högskolan i Gävle

En jämviktsekvation ger:

$$M_1 - M_2 - \text{vridmoment} = 0 \quad (1)$$

där

$$M = F \cdot L \quad (2)$$

$$F = \frac{1}{2} \cdot A \cdot \rho \cdot v^2 \quad (3)$$

$$\text{vridmoment} = (m + C) \cdot g \cdot \mu \quad (4)$$

där

m = hela verkets massa (250 kg)

C = konstant, denna konstant kommer att användas för 10 kg snö

g = gravitationen (10 m/s²)

μ = friktionstalet för stål mot stål smord yta. (0.1)

Arean, A_1 på vänster sidan om stödet antas till 4 m² och på A_2 till 16 m²

Med dessa antaganden kan hastigheten beräknas då vindkraftverket ska till att börja vrida sig. Då formlerna (2), (3) och (4) sätts in i (1) erhålls:

$$\left(\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A_1 \cdot v^2 \cdot L_1\right) - \left(\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A_2 \cdot v^2 \cdot L_2\right) - ((m + C) \cdot g \cdot \mu) = 0$$

$$v = \sqrt{\frac{(m + C) \cdot g \cdot \mu}{\left(\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A_1 \cdot L_1\right) - \left(\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A_2 \cdot L_2\right)}} \approx 3 \text{ m/s}$$

Vill man istället att vindkraftverket ska snurra vid en hastighet på vinden vid 2 m/s måste man veta hur stor A_1 bör vara för att uppfylla detta. Detta kan enkelt göras med att kasta om formeln och sätta in värdet för hastigheten (v).

$$A_1 = \frac{((m + C) \cdot g \cdot \mu) + \left(\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A_2 \cdot L_2 \cdot v^2\right)}{\left(\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \cdot L_1\right)} \approx 36 \text{ m}^2$$

Resultat

Med den arean som var antagit börjar vindkraftverket snurra vid en vindhastighet på 3 m/s. Detta är det optimala då vinden blåser direkt på arean. Man bör ta hänsyn till att vinden kommer blåsa med en vinkel på mellan 1-179° där 90° ses som att vinden blåser direkt på arean.