

Utveckling av vertikalt vindkraftverk

Jonathan Finne

Examensarbete för ingenjör (YH)-examen

Produktionsekonomi

Vasa 2021



EXAMENSARBETE

Författare: Jonathan Finne

Utbildning och ort: Produktionsekonomi, Vasa

Handledare: Mikael Ehrs

Titel: Utveckling av vertikalt vindkraftverk

Datum: 6.5.2021

Sidantal: 59

Bilagor: 14

Abstrakt

På grund av ökande elpriser bör det finnas sätt för konsumenter att producera egen el. Syftet med arbetet var att skapa ett vindkraftverk som skulle vara lätt att bygga själv och som kunde vara mer lönsamt än att köpa ett vindkraftverk som finns på marknaden. Detta görs så att konsumenter kan bygga ett eget vindkraftverk och minska sitt beroende av köpt el.

En specifikation gjordes som var utformad så att syftet med arbetet kunde nås och den styrde mycket av besluten som togs om designen. För att göra en aerodynamisk design tog jag hjälp av andra arbeten och enligt de observationer som gjorts i dem gjordes en design enligt de önskemål jag hade. Detaljrutningar, sammanställningsrutningar och 3D-modeller gjordes i ett 3D-modelleringsprogram enligt de beräkningar som gjorts.

I arbetet blev det tydligt att det är möjligt att producera vindkraftverk själv och det går att göra utan dyra verktyg. Det kan bli billigare än att köpa ett färdigt på marknaden. Det blev också tydligt att materialkostnaderna är en liten del av ett vindkraftverks kostnader. Ett system där man laddar batterier är mer kostnadseffektivt under kraftverkets livstid än att sälja till elbolag. Återbetalningstiden på ett vindkraftverk varierar mycket beroende på medelvindstyrkan men är mellan 3–8 år om kraftverket har placerats på ett lämpligt ställe.

Språk: svenska

Nyckelord: vindkraftverk, elproduktion, 3D-modellering

BACHELOR'S THESIS

Author: Jonathan Finne

Degree Programme: Industrial Management and Engineering

Supervisor(s): Mikael Ehms

Title: Development of a Vertical Axis Wind Turbine

Date: 6.5.2021

Number of pages: 59

Appendices: 14

Abstract

Due to the increasing prices for the use of electricity, consumers should have the option to produce their own electricity. This resulted in the development of a wind turbine, which can aid those who choose to produce their own means of electricity. A cheaper, easier to build wind turbine was designed, to battle against the existing wind turbines on the market.

A specification was created to set goals, but also to help influence the decisions made during the development process. When creating the aerodynamical design, inspiration was sourced from studies. Therefore, findings were used to make a design that meets the goals set in the specification. Detailed drawings, assembly drawings and 3D models were made in accordance with the results derived from the mechanical analysis and calculations.

It is possible to form a wind turbine on your own with few tools, hence making it cheaper than a wind turbine on the market. While calculating costs it became evident that materials only make up a small fraction of the total costs.

The wind turbine can break even in around 3-8 years, however the average wind speed causes large fluctuations in the break even time. It was also found that a system that charges batteries was a better investment during the long term, in comparison to selling unused electricity to the grid.

Language: Swedish

Key words: wind power, electricity production, 3D-modelling

Innehållsförteckning

1	Bakgrundsinformation	1
1.1	Mål	1
1.2	Liknande arbeten	1
1.3	Metoder	2
1.4	Disposition.....	2
1.5	Avgränsning.....	3
2	Energisituationen i Finland	4
2.1	Elpriser	4
2.2	Förnybar energi.....	6
2.3	Möjligheter för privata elproducenter	7
3	Val av modell.....	8
3.1	Energi i vind.....	8
3.2	Betz's lag	9
3.3	Vindkraftstyper.....	9
3.4	Horisontella vindkraftverk.....	10
3.4.1	Fördelar.....	10
3.4.2	Nackdelar	10
3.5	Vertikala vindkraftverk	10
3.5.1	Fördelar.....	11
3.5.2	Nackdelar	11
3.6	Val	11
4	Produktutveckling	12
4.1	Vindkraftverk på marknaden.....	12
4.2	Produktspecificering.....	13
4.3	Funktionsanalys.....	14
4.4	Preliminär riskanalys	15
4.5	Tillstånd	16
5	Aerodynamisk design	17
5.1	Vertikala vindkraftsmodeller	17
5.2	Antal blad	18
5.3	Storlek	18
5.4	Tip Speed Ratio.....	19
5.5	Soliditet	19
5.6	Vingprofil.....	20
5.6.1	National Advisory Committee for Aeronautics	20

5.6.2	NACA 0021	21
5.6.3	Anfallsvinkel	21
5.7	Färdig design	22
6	Konstruktion.....	23
6.1	Krafter som verkar på en rotor.....	23
6.2	Material.....	24
6.2.1	Trä.....	24
6.2.2	Glasfiber.....	24
6.2.3	Aluminium.....	25
6.2.4	Stål	25
6.3	Blad	26
6.3.1	Krafter på bladet	26
6.3.2	Fästpunkter	28
6.3.3	Bladets konstruktion	29
6.4	Rotorns armar	30
6.4.1	Krafter som verkar på armarna.....	31
6.4.2	Armarnas konstruktion	31
6.5	Nav	32
6.5.1	Krafter som verkar på navet	32
6.5.2	Navets konstruktion.....	32
6.6	Tornet.....	33
6.6.1	Krafter som verkar på tornet	33
6.6.2	Tornets konstruktion.....	34
6.7	Elsystem	35
6.7.1	Generator.....	35
6.7.2	Kontrollsystem	36
6.7.3	Belastningsmotstånd	37
6.7.4	Inverter och batteri.....	38
6.8	Färdig konstruktion	39
7	Tillverkning.....	40
7.1	Blad	40
7.2	Armar	42
7.3	Nav	42
7.4	Torn.....	42
8	Kostnad.....	44
8.1	Material.....	44
8.2	Verktyg.....	47

8.3	Montering	48
8.4	Återbetalning.....	49
8.4.1	Medelvindhastighet	49
8.4.2	Kapacitetsfaktor	51
8.4.3	Slutliga kostnader och inkomster.....	52
9	Slutsatser	53
9.1	Problem.....	53
9.2	Vidareutveckling.....	54
9.3	Kommentarer	54
10	Referenser.....	55
	Bilagor	

1 Bakgrundsinformation

På grund av ökande elpriser och konsumtion finns det potential för en instabil elmarknad i framtiden. För att minska sitt beroende av elektricitet från elbolag och minska konsekvenserna av högre elpriser bör konsumenter se på andra alternativ att få sin el. Egen producerad el har potentialen att minska hushålls inköp av el. Det finns ett stort utbud av vindkraftverk på marknaden men för de som vill och kan borde det finnas ritningar och instruktioner för hur man ska göra för att tillverka ett eget vindkraftverk. För att möjliggöra det konstruerades ett vindkraftverk med det ändamålet att det ska vara lätt och billigt att tillverka själv och så ska det vara mer lönsamt än att köpa ett färdigt samt ha en kort återbetalningstid.

1.1 Mål

Målet med examensarbetet var att skapa ett litet vindkraftverk, från en idé till en produkt som skulle gå att tillverka. Målet var att identifiera varför någon kan ha nytta av ett vindkraftverk, om det är möjligt och om det lönar sig att bygga ett vindkraftverk själv. Målet var ett vindkraftverk som enkelt kunde tillverkas i mindre mängder med vanliga verktyg men ändå i bra kvalitet och prestanda, något som kunde jämföras med en serieproducerad version som går att köpa. För att uppnå målet skapades en 3D-modell och ritningar som kan användas för att tillverka ett vindkraftverk själv, ett som är säkert för användare och omgivning och som kan ha en relativt snabb återbetalningstid.

1.2 Liknande arbeten

För att inte få ett för långt examensarbete och för att kunna gå djupare in på vissa områden har jag använt mig av liknande examensarbeten. Jag har gjort det för att lära mig om de aerodynamiska egenskaperna och hur jag kan välja de olika parametrarna för mina önskemål. Utan att studera andra arbeten hade jag blivit tvungen att göra omfattande aerodynamiska studier. De examensarbeten jag studerade hade fokus på de aerodynamiska egenskaperna, men gick inte in på djupet med konstruktionen.

Jag lade fokus på konstruktionen av kraftverket och kostnaderna. Jag gjorde en mer komplett produktutveckling än tidigare examensarbeten. Delvis för att det är mer enligt mina studier och för att en mer färdig produkt har verklig användningspotential i praktiken. Eftersom jag också såg på kostnader och hur det ska tillverkas i praktiken fick jag ett annorlunda resultat jämfört med om jag endast hade som mål att göra en modell med så hög verkningsgrad som möjligt. Med ritningar och kostnader kan man bestämma sig för om man vill tillverka ett vindkraftverk eller inte.

1.3 Metoder

Jag har använt mig av andra examensarbeten, vetenskapliga artiklar och information tillgänglig på internet samt min egen kunskap. Jag har motiverat alla beslut jag gjorde och använt källor för att visa var jag fått information ifrån. En del uträkningar har gjorts med matematiska formler i programmet Mathcad 3.1. En del uträkningar såsom balkars böjning har gjorts i Clearcalcs program som finns i webbläsare. Programmet räknar böjning och krafter för balkar och olika fästmetoder om man sätter in information som behövs, t.ex. materialets elasticitetsmodul, tröghetsmoment och tvärsnittsarea. Slutligen gjordes 3D-modelleringen och ritningar i Siemens NX 12.

1.4 Disposition

I kapitel två presenteras undersökningen av elpriserna och vad trenderna kan innebära för små konsumenter. Där presenteras också elmarknaden i Finland och hur trenderna ser ut främst inom förnybar energi och vindkraft. Jag undersökte också vilka möjligheter det finns för privat elproduktion och hur det går till med skatter och försäljning.

I kapitel tre förklaras hur ett vindkraftverk fungerar och central teori som finns. Genom att jämföra fördelar och nackdelar med de olika vindkraftstyperna kunde den lämpligaste modellen för mina önskemål väljas.

I kapitel fyra undersöker jag små vindkraftverk som finns på marknaden och gör sedan en produktspecifikation för ett eget vindkraftverk som ska utvecklas. I den preciseras önskemål och krav som jag har. För att säkerställa att det inte ska bli en fara för någon gör jag en preliminär riskanalys för att kunna motarbeta faror som kan finnas. Jag gjorde också en funktionsanalys och såg på vilka tillstånd och krav som kan ställas på vindkraftverk.

I kapitel fem presenteras den aerodynamiska designen med hjälp av andras arbeten och undersökningar, det för att kunna fokusera på de andra stegen under produktutvecklingen. De arbeten som jag har använt har varit mycket viktiga för att få en bra design att kunna vidareutveckla.

I kapitel sex presenteras konstruktionen för hela vindkraftverket. Den gjordes helt själv och uträkningarna har gjorts med datorprogram. Jag presenterar en 3D-modell av kraftverket samt av detaljer och beskriver de krafter som uppstår på de olika delarna och hur jag har byggt det för att klara av de krafterna.

I kapitel sju ger jag instruktioner för hur det vindkraftverk jag designat ska byggas i praktiken, jag övervägde olika metoder för att fästa delar såsom svetsning och limning. Jag motiverar också min design genom att beskriva hur delar kan köpas och hur man enkelt kan bygga det.

I kapitel åtta presenteras kostnaderna för att bygga ett vindkraftverk. Jag ser på allt från material till verktyg som kan krävas och hur montering ska ske. Jag presenterar kostnaderna i en tabell och sen också uträkningar på återbetalningstid med uppskattade årliga produktioner.

I kapitel nio sammanfattar jag resultatet och kommenterar arbetet samt ger förslag till fortsatt arbete och eventuella problem.

1.5 Avgränsning

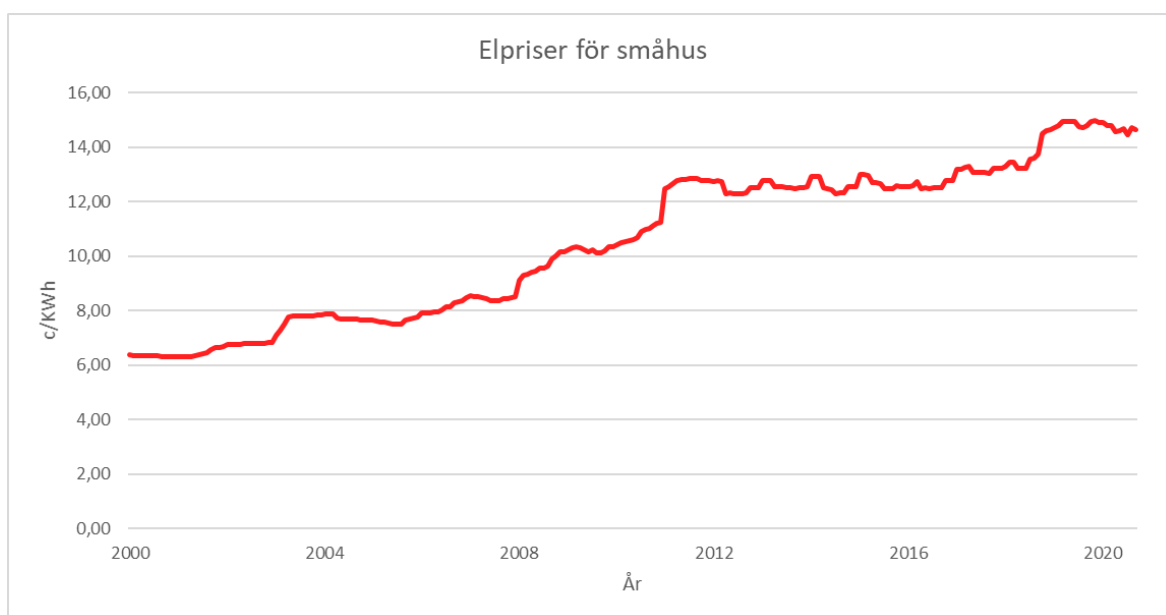
Eftersom en del saker inom designen inte alltid är lika var det inte möjligt att göra detaljerade ritningar över allting. Jag kan inte göra en exakt ritning över generatorns fastsättning eller storlek eftersom det kommer att spela roll vilken generator man har. Det samma gäller för kontrollsystem och inverter. Det kommer också spela roll var det monteras och om det ska användas till att ladda batterier eller inte. Eftersom det är så olika kommer jag endast att göra en förenklad modell av generatorn och elsystemets placering, utseende och funktion.

2 Energisituationen i Finland

Elpriserna stiger i Finland och har gjort det under en längre tid. Elpriser är en av de största orsakerna till att man ser på andra alternativ till ens elförsörjning. Miljövänlighet är modernt och förnybar energi får mer stöd hela tiden. Privat elproduktion kommer att ta fördel av det. Inom fordonsbranschen blir elbilar all mer populärt. Eftersom elpriser är höga och privatpersoners elkonsumtion stiger med en elbil finns det potential för att privat elproduktion kommer att bli allt mer lönsamt i framtiden.

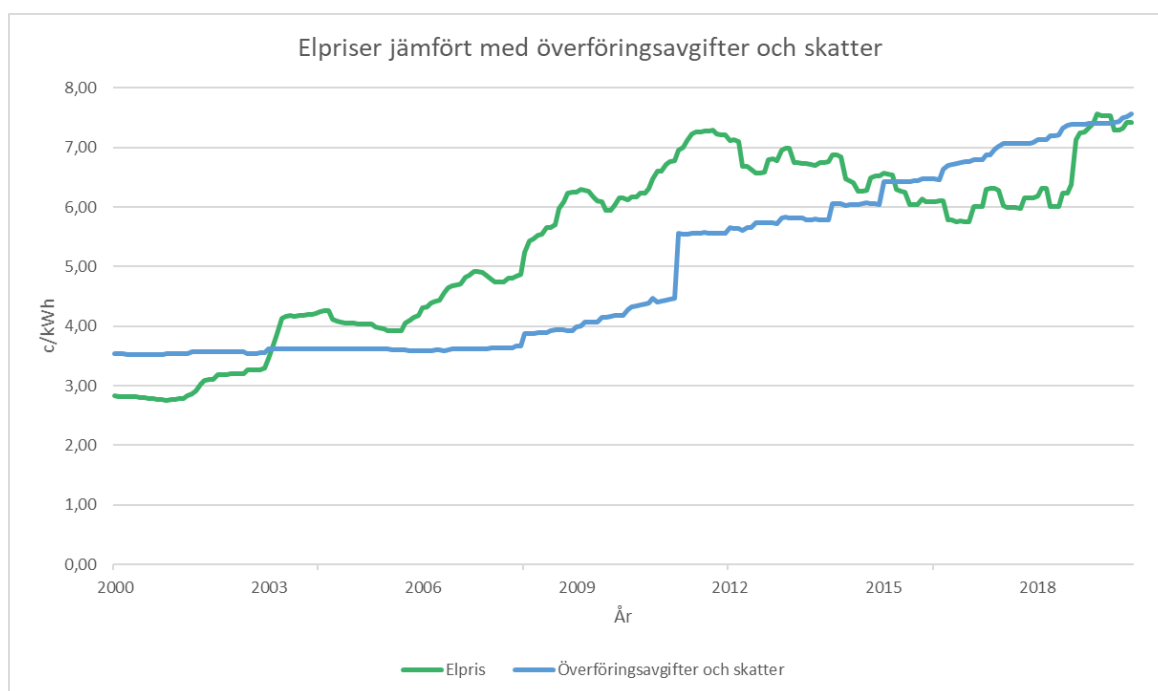
2.1 Elpriser

Elpriserna i Finland har för små konsumenter mer än fördubblats under 20 år. Grafen inkluderar elenergi, överföringsavgifter och skatter. Det är sannolikt att elpriserna stannar på en hög nivå i framtiden. Orsakerna till det kommer att presenteras. Eftersom det är sannolikt att elpriserna hålls höga kommer egen producerad elektricitet bli lönsam.



Figur 1. Elpriser med överföringsavgifter och skatter inräknade. (Statistikcentralen, u.d.a).

Om man jämför elpriser och överföringsavgifter med skatter kan man se att överföringsavgifter är en stor del av elpriset. Trenden för de avgifterna är att de stiger och det sker stabilt. Elpriser stiger också men det sker med mycket större variationer. Det är naturligt eftersom överföringsavgifter och skatter styrs politiskt och av företag medan elpriser är en komplicerad internationell handel som påverkas av konsumtion och väder. Eftersom överföringsavgifterna är hälften av det man betalar för sin elektricitet kommer man dra nytta av att kunna göra sin egen elektricitet och lagra den med batterier. Säljer man 1 kWh får man hälften av vad det kostar att köpa 1 kWh.

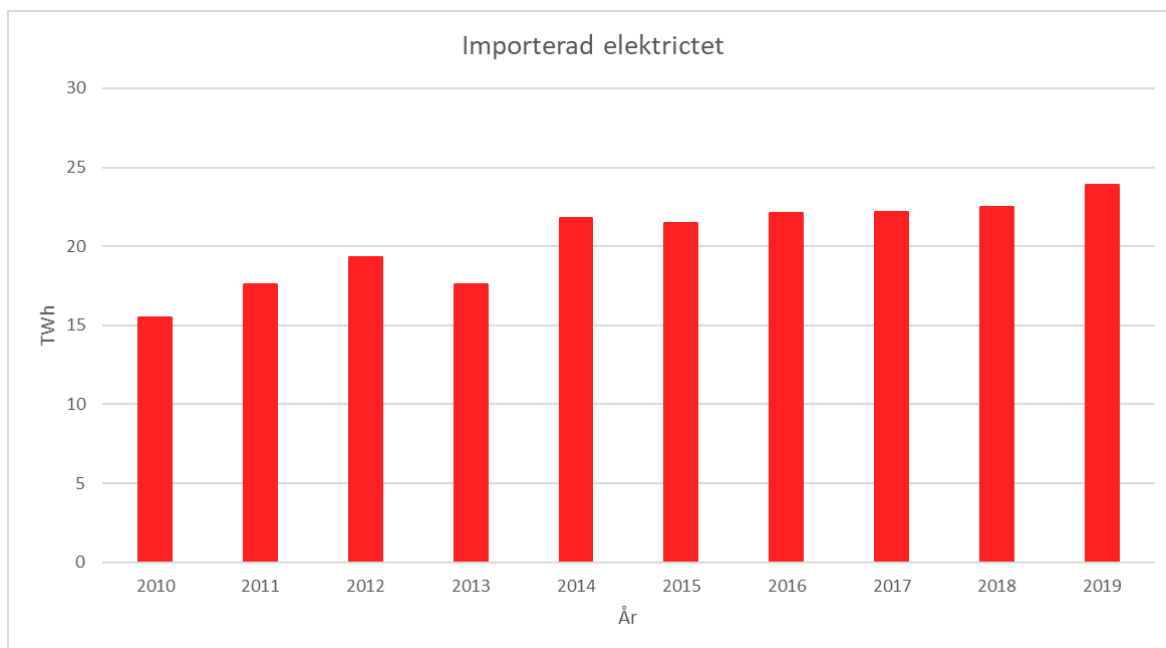


Figur 2. Jämförande av endast elpriser och överföringsavgifter med skatter. (Energiavirasto, u.d.).

Priserna är ett medeltal från elbolag från Finland. Från 1.1.2011 steg skatterna från 1,086 till 2,095 c/kWh vilket förklarar den drastiska ökningen. Vid slutet av 2019 var överföringsavgifterna 4,77 c/kWh och skatterna 2,80 c/kWh. Skatterna är i klass 1 som är vanliga konsumenter. Det finns klass 2 för företag som har en skatt på 0,872 c/kWh. (Energiavirasto, u.d.)

Finland importerar allt mer elektricitet. I figur 3 kan man notera att importen har ökat från 15,5 TWh år 2010 till 23,9 TWh år 2019. På grund av avvecklingen av kolkraft och torv kan importen öka ännu mer. Elektricitet konsumtionen kommer att öka kraftigt främst på grund av mer elbilar som ska laddas. Elektricitet konsumtionen kommer öka i grannländerna där

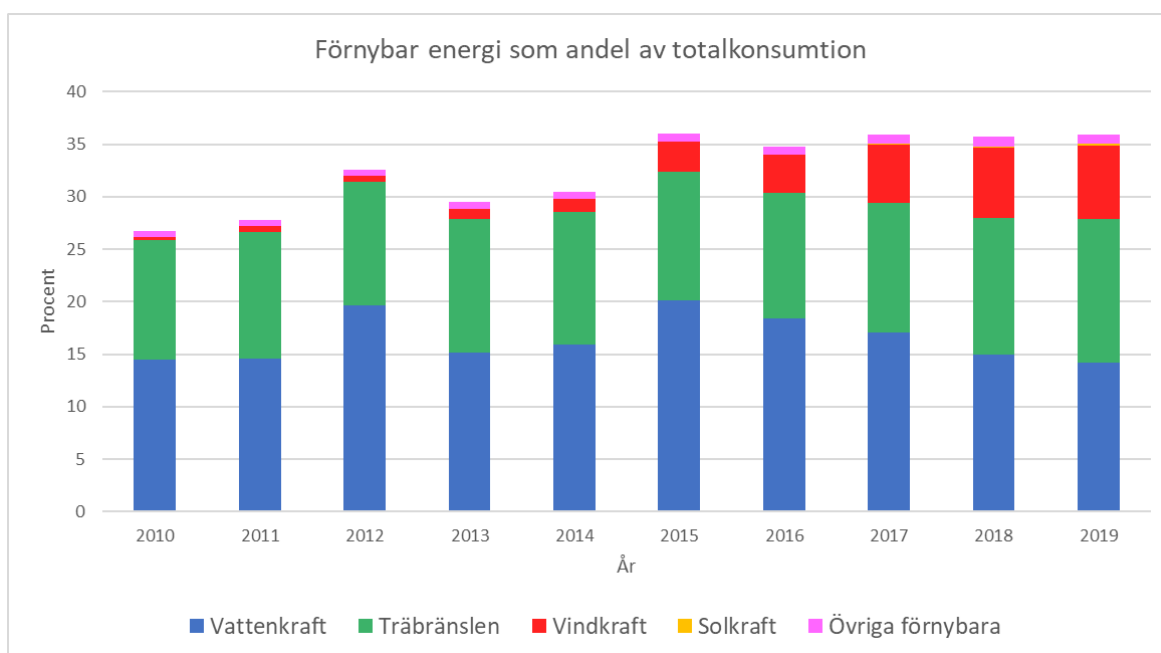
Finland importerar ifrån av samma orsaker. Om Finland inte har tillräckligt med elektricitet i framtiden och med de varierande mängderna elektricitet som förnybar energi producerar kan det leda till att det ibland finns ett stort underskott av elektricitet som inte regleringskraftverk kan klara av. Det kan i värsta fall leda till tillfällig brist på elektricitet eller elpriser som stiger. Det finns en osäkerhet inom elmarknaden i framtiden. Att kunna självständigt producera en del av sin elektricitet är en trygghetsfaktor som kan ge små privata kraftverk en fördel.



Figur 3. Importerade elektricitet till Finland. (Statistikcentralen, u.d.b).

2.2 Förnybar energi

I Finland har andelen förnybar energi ökat något under senaste årtiondet från 26,7% år 2010 till 35,9 % år 2019. Man kan se att vindkraften ökar snabbt, speciellt de senaste åren. År 2018 byggdes ingen ny vindkraft i Finland så tillväxten stannade av det året men fortsatte igen åren efter det (Suomen Tuulivoimayhdistys, 2020a). Vindkraften ökar inte enbart för att förnybar energi generellt ökar utan i stället håller vindkraften på att bli så konkurrenskraftigt att den vinner marknadsandelar. År 2020 fanns det planer på 18500 MW vindkraft i Finland. 7000 MW har redan markanvändningsplaner eller byggtillstånd (Suomen Tuulivoimayhdistys, u.d.b).



Figur 4. Förnybar energi i Finland. (Statistikcentralen, u.d.c).

2.3 Möjligheter för privata elproducenter

I Finland får vem som helst producera sin egen el med solceller, vindkraftverk eller en annan småskalig enhet, om produktionen är liten och främst för att ge elektricitet åt eget hushåll. Man kan också sälja sin överskottsdel till elnätet, antingen så sker det så att elleverantören betalar för det, eller så dras det av när man igen köper el, eller så förs överskottsdelarna gratis till elnätet. Orsaken till att man kan ha möjlighet till det är för att produktionen och konsumtionen inte alltid matchar varandra. Målet med privat elproduktion är dock att minska på kostnaderna och konsumtionen av elektricitet, inte att sälja så mycket som möjligt till elnätet.

När elproduktionen är mindre än man konsumerar så är man inte skatteskyldig för det man producerar. När elproduktionen överstiger konsumtionen och man säljer elen till elnätet är det en skattepliktig inkomst. Man är skatteskyldig oberoende om elen betalas kontant eller dras av från elräkningen. Dessutom kan man avskriva kostnader som uppstått i anskaffningen och underhållet av produktionsenheten. Man kan också få skattefria stöd från elbolag i form av hjälp med installationer eller tillstånd. Slutligen kan man få hushållsavdrag för installationer av den producerande enhet om produktionen är under hälften av konsumtionen. (Skatteförvaltningen, 2020).

3 Val av modell

För att kunna välja en modell och för att få en förståelse i hur vindkraft fungerar undersöktes de modeller som finns, hur de delas in och hur det går till när vindenergi blir till elektricitet.

3.1 Energi i vind

Den tillgängliga energin i vinden kan härledas från formeln för kinetisk energi. Vindenergi är vind som rör sig, alltså det har en kinetisk energi. Formeln för kinetisk energi ser ut på följande sätt:

$$E_k = \frac{1}{2}mv^2 \quad (1)$$

Eftersom massa är svårt att räkna för luft i rörelse måste man skriva om formeln. Massa är densitet gånger volym och volym är en area gånger en längd. Massa kan skrivas med formeln:

$$m = \rho * A * l \quad (2)$$

Kinetisk energi kan då omskrivas på ett mer förståeligt sätt för vind i rörelse:

$$E_k = \frac{1}{2} * \rho * A * l * v^2 \quad (3)$$

Effekt är energi genom tid, så för att få vindens effekt måste man dela energin med tiden:

$$P = \frac{E_k}{t} = \frac{\frac{1}{2} * \rho * A * l * v^2}{t} \quad (4)$$

Hastighet är längd genom tid. Genom att förenkla får man formeln för att räkna vindens effekt, men i verkligheten måste man också räkna med en faktor för verkningsgraden:

$$P = \frac{1}{2} * \rho * A * v^3 \quad (5)$$

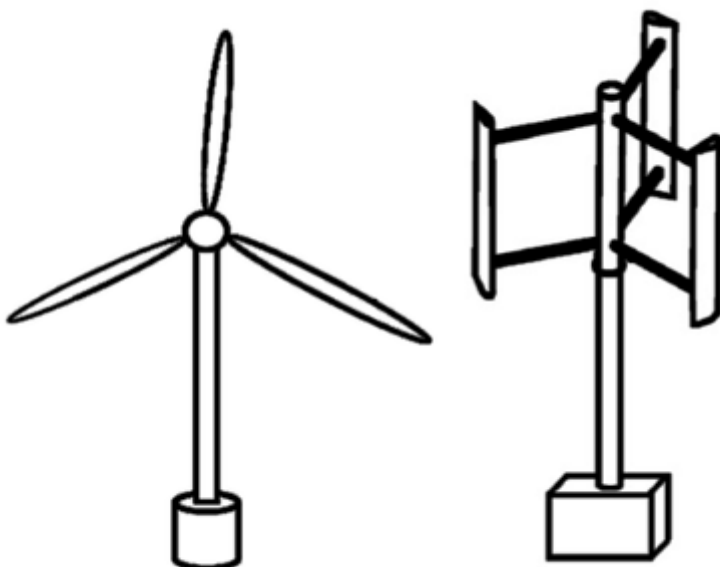
En intressant iakttagelse man kan göra är att vindens hastighet är mycket viktigare än vindkraftverkets area. För att få den effekt man önskar sig bör man fundera hur man kan placera vindkraftverket så att det får så hög vindhastighet som möjligt.

3.2 Betz's lag

Betz's lag som blev formulerad av tysken Albert Betz innebär att en rotor inte kan ta tillvara all vindenergi som flödar igenom den. En rotor kan endast ta tillvara 59,3% av tillgängliga vindenergin. Det är inte möjligt eftersom vinden måste ha kinetisk energi när den lämnat rotorn så att den kan flytta på sig och ge rum för ny luft att flöda igenom rotorn. Det här är endast en teoretisk gräns, i verkligheten kommer inte en rotor i närheten av den här gränsen. Verkningsgraden minskar av aerodynamiska och mekaniska egenskaper och mekaniska förluster i generatoren och lager. En realistisk verkningsgrad under ideala omständigheter är 0,35–0,45. (Royal Academy of Engineering).

3.3 Vindkraftstyper

Vindkraftverk kan delas in i olika kategorier. Indelningen sker baserat på vilken riktning vindkraftverket roterar i jämförelse med vinden. Rotorn kan placeras horisontellt med vinden eller vertikalt. Horisontella kraftverk är mer etablerade och finns i mycket större modeller än vertikala. För att kunna bestämma vilken typ av vindkraftverk jag ska utveckla undersöker jag fördelarna och nackdelarna med de båda modellerna och funderar på vad som är viktigt för mitt ändamål.



Figur 5. Horisontellt och vertikalt vindkraftverk. (Kozak , 2014).

3.4 Horisontella vindkraftverk

Horisontella vindkraftverk är etablerade och finns i små och stora modeller. De första vindkraftverken för elektricitet produktion byggdes 1887 (Nixon, 2008). De fungerar så att en rotor placeras rakt mot vinden, den roterande axeln är då horisontell. Generatoren måste placeras uppe i tornet på horisontella kraftverk. De måste också vändas mot vinden för att kunna generera elektricitet.

3.4.1 Fördelar

Fördelarna med horisontella vindkraftverk är att de är etablerade, välprövade och pålitliga. De är också väldigt effektiva, tål höga vindstyrkor och tack vare det kan de ge höga effekter. De krafter som verkar på horisontella vindkraftverk är också mer jämna vilket gör att de har lång livslängd och lite underhåll. Det finns också väldigt många modeller redan på marknaden vilket antyder att de fungerar bra och är kostnadseffektiva. De kan också göras väldigt stora till skillnad från vertikala vindkraftverk, vilket möjliggör mer effekt ur ett vindkraftverk. (Luvside, 2020c).

3.4.2 Nackdelar

Största nackdelarna med horisontella vindkraftverk är att de bör ha en mekanism för att svängas mot vinden. Den kan vara ett roder eller en elmotor som roterar hela tornet. I små kraftverk är det oftast ett roder. En annan nackdel är också att generatoren placeras uppe i tornet så det blir svårare att underhålla, och så blir tornet också mer komplicerat när kablar och liknande ska ner till marken och tornet ska gärna vara högre. Har man fler vindkraftverk bör man ha längre avstånd mellan dem för att de inte ska störa varandra. (Linqip, 2020).

3.5 Vertikala vindkraftverk

Vertikala vindkraftverk kan se väldigt olika ut, det beror mycket på att teknologin utvecklas ännu medan horisontella är väldigt etablerade. Vertikala vindkraftverk fungerar så att rotorblad placeras stående, vertikalt mot vinden. Den roterande axeln är då vertikal och kan gå enda ner till marken. De behöver inte heller placeras mot vinden utan de roterar oberoende vindriktning. Vertikala vindkraftverk finns både som luftmotståndsbaserade och lyftkraftbaserade. De flesta vertikala vindkraftverk är små.

3.5.1 Fördelar

Fördelar med vertikala vindkraftverk är att de är enklare att konstruera i små modeller. Bladprofiler kan tillverkas med samma form över hela bladet. Ingen sensor eller komponent för att känna vindriktning behövs eftersom vertikala vindkraftverk alltid är svängda mot vinden. Varierande vind som byter riktning ofta spelar inte så stor roll som med ett horisontellt vindkraftverk. Generatorer och eventuella växellådor kan placeras vid marken, Det minskar underhållskostnader, gör montering lättare och ger möjlighet för en enklare konstruktion vid rotern. Rotationshastigheten är också lägre vid spetsen av bladen vilket leder till att ljudnivåer är lägre. (Luvside, 2020a).

3.5.2 Nackdelar

Några nackdelar med vertikala vindkraftverk är att de kan vara väldigt aerodynamiskt komplicerade och ha lägre verkningsgrad än horisontella kraftverk. Eftersom inte alla blad genererar en lyftkraft hela tiden som horisontella kraftverk gör så får de en lägre verkningsgrad. Vertikala kraftverk påverkas av mer vibrationer vilket kan leda till att komponenter slits snabbare och att man kan bli tvungen att göra service oftare eller konstruera starkare delar. Det här problemet kan motarbetas genom att skapa en design så rotern går långsammare. Självstartande egenskaperna är också ett problem med vertikala vindkraftverk och vissa modeller har en mekanism för att hjälpa rotern att starta. (Luvside, 2020b).

3.6 Val

Efter att ha undersökt fördelar och nackdelar med de olika typerna valde jag att undersöka vertikala vindkraftverk mera. Det på grund av att fördelarna med horisontella vindkraftverk är främst till fördel i stor skala. De är komplicerade i små skala, främst bladen och att rotern ska svängas mot vinden. Jag är intresserad av mindre kraftverk i små skala som ska vara lätta att tillverka. Fördelarna med vertikala vindkraftverk ser lovande ut för mitt ändamål. I små skala är de vertikala vindkraftverkens nackdelar inte så stora eftersom krafterna är mindre på små kraftverk. Genom att i design skedet motarbeta de problem vertikala vindkraftverk har kan nackdelarna minskas.

4 Produktutveckling

För att enklare kunna gå vidare görs några vanliga steg som görs i produktutveckling. Noggrannare mål och produktspecificeringar gjordes och en funktionsanalys för att kunna se exakt vad som vindkraftverket borde göra. För att kraftverket ska vara säkert och för att förutspå eventuella fel som kan ske gjordes en

4.1 Vindkraftverk på marknaden

För att kunna veta vad man konkurrerar mot så undersökte jag andra modeller som redan finns på marknaden. Där kan man också göra lite brainstorming och hitta inspiration till design för egen turbin, se hur de har löst problemen, kritisera dem och göra bättre. För att det ska vara någon idé med eget vindkraftverk ska det vara bättre och gärna billigare än något man köper. Därför har jag letat efter modeller som finns att köpa och sett på deras specifikationer och priser. I tabellen nedan presenteras några modeller och deras specifikationer. Det fanns inte alltid tillgängligt priser, men om det fanns har det växlats till euro 9 april 2021. Priserna varierar med tillbehör och innehåller inte fraktkostnader.

Tabell 1. Specifikationer för vertikala vindkraftverk på marknaden.

Modell	Höjd (m)	Bredd (m)	Effekt (W)	Vid vindhastighet (m/s)	Max vind (m/s)	Kostnad (€)	Källa
Aiboat	0,8	0,6	800	10	25	1200	(ebay, u.d.a)
windspire	9	1,5	2000	-	18,7	5000	(Windspire, 2021)
Aeolos	2,8	2	1000	10	-	-	(Aeolos, 2021)
GREEF	3,7	2,6	2000	10	25	4000	(Made-in-China, 2021)
GREEF	2,6	1,8	1000	10	25	1000	(Made-in-China, 2021)
SunSurf	3	4	3000	10	25	8000	(SunSurf, 2021)
SAWT	2	1,8	1000	12	25	-	(SAWT, 2021)
NTECH	1,65	0,4	1000	10	25	-	(windsolar-products, 2021)
Rexco	2,2	1,7	1000	12	-	700	(Alibaba, u.d.a)

Det finns förstås mycket olika vindkraftverk på marknaden i alla möjliga prisklasser. Det kan man notera efter att ha letat, priset är absolut inte proportionellt med effekten, det finns stora variationer. Det man också kan notera är att de flesta vindkraftverk ger sin effekt vid 10 m/s och har 25 m/s som högsta vindhastighet vid drift. Höjd och breddförhållanden varierar också mycket men man kan konstatera att det oftast är högre än det är brett.

4.2 Produktspecificering

En produktspecificering görs för att ha mål man ska försöka nå under design skedet. Utan det kan det vara svårt att komma vidare. Det görs i ett tidigt skede för att man ska kunna göra specifikationerna till verklighet. Specifikationerna kommer att styra resten av besluten som tas om designen eller konstruktionen. En produktspecification är klar med vad målen är och det skapar kritiskt tänkande i ett tidigt skede. (ProductPlan, 2021).

Specifikationerna har grupperats och markerats med K för krav och Ö för önskemål. En del specifikationer har gjorts med tanke på säkerhet och en del för prestanda. Något som styrt specifikationerna mycket är att det ska vara enkelt och billigt att tillverka och montera. Det har varit största orsaken till att ett vertikalt vindkraftverk med direkt drift har valts.

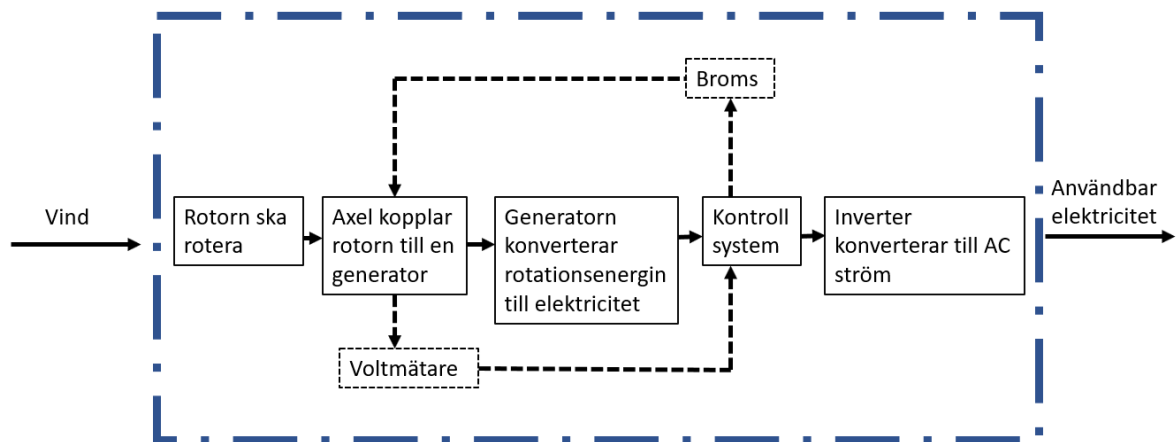
Tabell 2. Kravlista för vindkraftverket som ska utvecklas.

Vindkraftverk		Kravlista	12.03.2021
Ändringar	K Ö	Krav	Ansvarig
		1. Geometriska krav	Jonathan Finne
	K	Vertikalt vindkraftverk	
	K	3 m högt torn	
	K	2 m hög rotor	
		2. Krafter	
	K	Ska klara av 25 m/s vind vid gång	
	K	Ska klara av 35 m/s vind stillastående	
	Ö	Låga varvtal	
		3. Energi	
	Ö	Över 30% verkningsgrad	
	Ö	1 kW effekt vid 10 m/s	
	K	Direkt drift till generatoren	
		4. Material	
	Ö	Lätt tillgängliga material	
	Ö	Låg vikt	
	K	Starka material	
		5. Säkerhet	
	Ö	Broms mot för höga hastigheter	
	Ö	Vindmätare	
		6. Produktion	
	Ö	Minimalt med svetsning	
	K	Lätt att producera	
		7. Montering	
	K	Ingen lyftkran	
	K	Monteras på plats med bultar	
	K	Individuella delar ska gå att byta	
	K	Generator på marknivå	
		8. Kostnader	
	Ö	Inga dyra verktyg	
	Ö	Billiga material	

4.3 Funktionsanalys

Nedan redogörs de huvudsakliga funktionerna och delfunktionerna i vindkraftverket. Allting startar från vinden, kinetiska energi i vinden omvandlas till mekanisk rotationsenergi i rotorn. Rotorn sitter fast i en axel som går rakt till en generator som omvandlar rotationsenergin till elektricitet. På axeln måste det finnas ett sätt att stoppa rotorn från att rotera. Det på grund av säkerhetsorsaker både för att skydda kraftverket och omgivningen vid hög vindstyrka. Bromsen får signal från ett kontrollsystem som i sin tur får signal från en voltmätare som får för hög spänning vid höga vindstyrkor.

För att få användbar ström måste DC strömmen från batterier omvandlas till AC ström med rätt spänning. Man kan enbart ladda batterier, använda elektriciteten direkt, föra elektriciteten till elnätet eller allt det nämnda. Det finns inverters som kan sköta strömfördelningen så man kan både ladda batterier och använda elektriciteten (Inverterbutiken, 2021). Hur man gör här beror helt på vad man använder kraftverket till vilket betyder att skedet efter kontrollsystemet kan se olika ut men alla lösningar har en inverter.



Figur 6. Funktionsanalys över vindkraftverket.

4.4 Preliminär riskanalys

För att i ett tidigt skede kunna identifiera eventuella fel som kan orsaka skador för kraftverket, personer eller omgivningen görs en preliminär riskanalys. Den görs före det finns möjlighet för att man utsätts för de riskerna. När felet har identifierats kan man tidigt komma på lösningar för att förhindra sannolikheten eller allvarligheten för felet. PRA-analysen tas i beaktande under kraftverkets design skede. En PRA-analys är inte en komplett riskanalys utan i stället är det en hjälp så man vet vad man ska fokusera på. (ComplianceBridge, 2020).

Nedan presenteras eventuella risker som kan uppstå. Ett tal mellan 1 och 3 ges för sannolikheten och allvarligheten. Ett risktal räknas genom att multiplicera hur sannolikt något är med hur allvarligt det är. 1–2 är liten risk och konsekvens, 3–4 är värt att ta i beaktande och förhindra och 6–9 är allvarligt, sannolikt och måste förhindras när man designar kraftverket.

Tabell 3. Preliminär riskanalys för vindkraftverket.

Nummer	Felmöjlighet	Konsekvenser	Orsaker	Sannolikhet	Allvarlighet	Risktal	Åtgärder
	<i>Vad kan gå fel?</i>	<i>Vad kan hända om det inträffar?</i>	<i>Vad kan orsaka att det händer?</i>	<i>Vad är sannolikheten att det inträffar (1-3)</i>	<i>Hur allvarlig är skadan (1-3)</i>		<i>Vad kan göras för att minska sannolikheten eller allvarligheten?</i>
1	Rotorblad kan gå av	Omgivningen eller personer skadas	För höga varvtal, utmattning	1	3	3	En mätare som känner igen för höga varvtal och bromsar
2	Någon kan träffas av rotorn under gång	Personer skadas	Rotorn för nära marken, dålig säkerhetsmärkning	2	3	6	Varningar på kraftverket, rotorn tillräckligt högt över marken
3	Brand i generator eller kontrollsystem	Delar förstörs, branden sprider sig	Generator eller broms överhettad, kortslutning i elektronik	1	3	3	Inga brännbara material runt generator och broms, ventilation
4	Kraftverket har mycket ljud	Störande för omgivningen	För lite underhåll	2	1	2	Regelbunden smörjning av rörliga delar
5	Någon skär sig på delar	Man börjar blöda	Vassa kanter	2	1	2	Måla allting, slipa kanter
6	Tornet går av	Rotorn går sönder, omgivning skadas	För svag konstruktion	1	2	2	Stor säkerhetsfaktor

Som man kan se finns det saker som kan orsaka ganska allvarliga faror och som kan vara sannolika. Det allvarligaste är om någon träffas av rotorn när den roterar. Den har en hel del massa och kan rotera snabbt. Det är en fara både för människor och djur. För att minska på sannolikheten kommer rotorn att placeras på ett 3 m högt torn. Det gör att rotorn är på en säker nivå. Varningsmärken kan också placeras på rotorn eller marken för att varna människor.

Några andra saker som är värt att förhindra är att rotorbladen går av. De roterar snabbt och kan flyga in i någonting eller någon om de går av. Det är väldigt osannolikt och förhindras med en broms och stor säkerhetsfaktor. Brand i kontrollsystem eller generator är också en möjlighet men den branden kommer att begränsas till det tekniska utrymmet genom att inte ha brännbara material där, också ventilation för att leda bort värme kan förhindra det.

4.5 Tillstånd

När man bygger ett vindkraftverk måste man oftast ha något tillstånd. Vilket tillstånd man behöver kan variera mellan olika kommuner och städer. Genom att se i kommunens byggnadsordning kan man hitta information om vad som gäller där man vill bygga. I en byggnadsordning kan man t.ex. läsa att ett vindkraftverk lägre än en viss höjd eller som har mindre än en specifik effekt kräver en ansökan om åtgärd eller åtgärdstillstånd. Det beror på var man bor, om det är ett planområde eller inte. Men som regel kan man utgå från att ett åtgärdstillstånd krävs för små vindkraft liksom för solpaneler. Söker man åtgärdstillstånd ska man ha grannars godkännande i enlighet med markanvändnings- och bygglagen 133 §.

I markanvändnings- och bygglagen 126 § står det att ett åtgärdstillstånd kan sökas för uppförande och placering av sådana konstruktioner eller anläggningar som inte betraktas som byggnader, om åtgärden inverkar på naturförhållandena, markanvändningen på det omgivande området eller stads- eller landskapsbilden. (Markanvändnings- och bygglag 126 §, 2012).

5 Aerodynamisk design

Det finns mycket olika parametrar som ska optimeras för att få en färdig design. Det kan vara väldigt svårt och mycket tidskrävande. Därför gick jag inte in så djupt i den aerodynamiska delen av designen. Jag studerade andra undersökningar och forskning som gjorts om de olika design parametrarna och utgående från dem gjorde jag min egen design baserat på de önskemål jag hade om turbinens egenskaper.

Jag har baserat mycket på tre olika arbeten om vertikala vindkraftverk. Det arbete jag tagit mycket ifrån är ett examensarbete av Javier Castillo, där han har gjort en aerodynamisk design av ett vertikalt vindkraftverk. Från det arbetet har jag fått värdefull information om TSR, radier och soliditet. Något som är nära relaterat till varandra. I det arbetet finns grafer över olika värden och när de presterar som bäst, då kunde jag enligt mina önskemål se vad jag borde ha för parametrar på mitt vindkraftverk. (Castillo, 2011).

Ett annat examensarbeten jag sett mycket på är ett av Mats Wahl som handlar om designen av ett vertikalt vindkraftverk till en forskningsstation på Antarktis. I det arbetet görs allting från aerodynamisk studie till konstruktion av det som bär upp hela kraftverket. Jag har främst haft det som stöd när jag valde antal blad och soliditet. (Wahl, 2007).

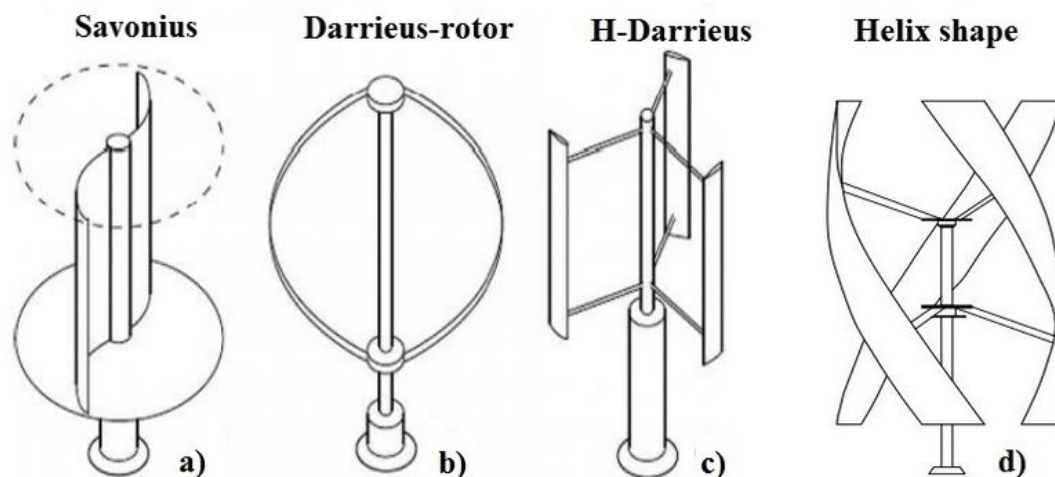
En examensarbete av Peter Kozak var till stor hjälp när jag valde anfallsvinkel för min vingprofil. Det fanns en omfattande studie av den ideala anfallsvinkeln för vertikala vindkraftverk med fast anfallsvinkel. Grafer med moment enligt en full rotation hjälpte till att motivera varför jag valde just den anfallsvinkeln. (Kozak , 2014).

5.1 Vertikala vindkraftsmodeller

Vertikala vindkraftverk kan delas in i två kategorier. Savonius modeller som baseras på att en yta skapar ett luftmotstånd och Darrieus modeller som baseras på att vingar skapar lyftkraft. Savonius modeller är enklare att konstruera. De består oftast av två böjda blad som fångar vinden. En stor fördel är att de startar enklare tack vare högre vridmoment men de har lägre verkningsgrad. Darrieus modeller kan se olika ut men fungerar enligt samma princip. Flera blad, vanligtvis mellan två och fem, skapar en lyftkraft som får den mittersta axeln att rotera. I figur 7 kan man se de tre vanligaste typerna av Darrieus modeller. Helix formen är den mest komplicerade modellen som också ger jämnaste lastvariationer tack

vare de böjda bladen. Den äggformade modellen kräver inga extra armar som går ut till bladen eftersom de böjs direkt från den roterande axeln. (Castellani, o.a., 2019).

En H-rotor väljs eftersom de raka vingarna är enkla att konstruera. Eftersom målet med arbetet är att få en konstruktion som ska vara lätt att tillverka är det här ett väldigt övertygande argument att använda en H-rotor. Designen är välprövad och finns med flera olika mängder blad och vingprofiler.



Figur 7. Vertikala vindkraftsmodeller: a) Savonius, b) Darrieus, c) H-typ, d) Helix. (Castellani, o.a., 2019).

5.2 Antal blad

Färre blad betyder att det är längre mellanrum från ett blad till det nästa, det leder till att luften blir mindre turbulent och därför fungerar vingprofilerna effektivare. Mer blad ger jämnare lastvariationer och är mer stabil. Fler blad kostar också mer och väger mer. En modell med tre blad är mest använd och en välprövad kompromiss mellan alla faktorer. Jag anser att tre blad är den bästa kompromissen enligt de önskemål jag har.

5.3 Storlek

De här parametrarna kan väljas ganska fritt. Det som styr storleken är vilken effekt man har som mål. Storleken kan räknas om man vet vilken effekt man vill ha. Jag vill ha ca 1 kW i effekt vid 10 m/s. Med en realistisk verkningsgrad på 30% krävs arean 5 m² enligt ekvation 5. Förhållandet mellan höjd och radie påverkar verkningsgraden så att större radie och lägre blad är bättre, det är också strukturellt bättre att ha lägre blad (Brusca, Lanzafame, &

Messina, 2014). Jag väljer förhållandet 1,6 så radien blir 1,25 m och höjden på bladen 2 m. Arean blir då 5 m² vilket krävdes. En rotor med radien 1,25 m presterar bra moment vid TSR 2,8 (Castillo, 2011).

5.4 Tip Speed Ratio

Tip speed ratio på engelska eller tipp hastighetsförhållandet på svenska visar hastigheten för spetsen på ett vindkraftsblad jämfört med vindhastigheten som blåser på kraftverket. En för låg TSR kan leda till att rotorn släpper igenom för mycket luft eller att vingprofilen inte fungerar som den ska eftersom luften flödar för sakta och separerar från vingprofilen och inte längre genererar lyftkraft. En för hög TSR leder till att luften blir turbulent vilket leder till att vingprofilerna inte kan arbeta optimalt. Högre TSR betyder att vindkraftverket roterar snabbare, det har andra konsekvenser såsom mer vibrationer, högre ljudnivåer och potential för mer omfattande mekaniska fel. (Ragheb & Ragheb, 2011).

Generellt så påverkas den optimala TSR av hur många blad man har. Mer blad möjliggör lägre TSR. Vertikala vindkraftverk har vanligtvis mellan 0,5 och 4 i TSR. TSR kommer att vara beroende av vinden så att hårdare vind orsakar högre TSR. En optimal lösning vore att kunna kontrollera och sänka TSR om det går över önskat tal eftersom verkningsgraden då kunde hållas högre. En optimal TSR för de parametrar jag har är 2,8 (Castillo, 2011).

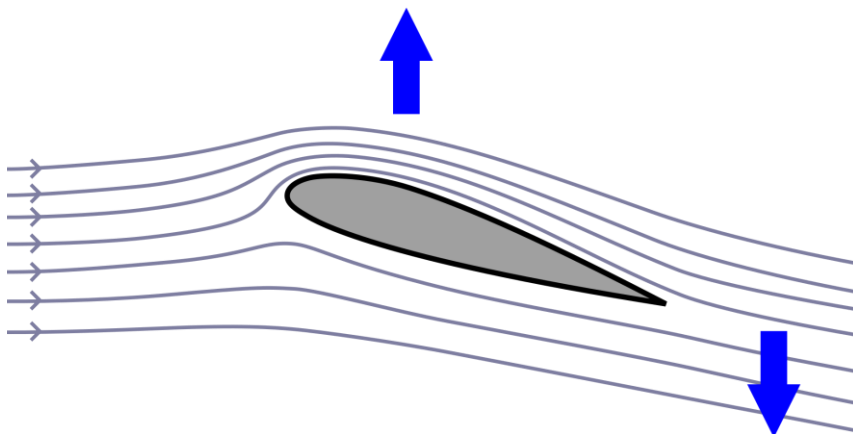
5.5 Soliditet

Soliditeten beskriver hur stor del av rotorns area mot vinden som tas upp av bladen. Längden på vingprofilen, antal blad och radien för rotorn bestämmer soliditeten. En högre soliditet ger en längre vingprofil, starkare konstruktion och bättre egenskaper vid lägre varvtal (Wahl, 2007). En lägre soliditet kräver högre TSR för att ge bäst moment och kan ha sämre självstartande egenskaper. Däremot kan de ha högre verkningsgrad vid höga varvtal och mindre turbulens. En av nackdelarna för vertikala vindkraftverk var de vibrationer som kan uppstå vid höga varv, de motarbetades nu genom att välja en design som är optimal vid lägre varvtal.

En soliditet på 0,30 valdes eftersom det är den bästa kompromissen och ger bäst optimalt användningsområde för den här rotorn. 0,30 ger högsta momentet och verkningsgraden vid 2,8 TSR. De självstartande egenskaperna med högre soliditet motiverar ytterligare valet. (Castillo, 2011).

5.6 Vingprofil

En vingprofil genererar en lyftkraft genom att skapa ett högre tryck vid spetsen på vingprofilen. Det högre trycket gör att luftpartiklar följer vingprofilens form. Genom att forma en vingprofil så att den styr luften nedåt, eller genom att ha en symmetrisk profil som är vinklad, så kan man styra luften nedåt. Newtons 3:e lag säger att det måste finnas en lika stor och motsatt riktad kraft, det är lyftkraften. Luften som flödar över en vinge delas in i två komponenter. En lyftkraft vinkelrätt mot den flödande luften och ett luftmotstånd i samma riktning som luften. Som man ser på linjerna i figur 8 som representerar luftflödet kan man med hjälp av en symmetrisk vingprofil styra luften nedåt och skapa en lyftkraft. Desto större vinkel man har desto mer neråt kan man styra luften och generera mer lyftkraft, tills luften inte längre kan hållas kvar på vingens övre sida. Då försvinner lyftkraften. (Learn Engineering, 2016).



Figur 8. Luftflöde över en vinge. (Paetzold, 2018).

5.6.1 National Advisory Committee for Aeronautics

Under 1920 och 1930-talet utvecklade NACA (National Advisory Committee for Aeronautics) en serie noggrant testade vingprofiler. Dessa vingprofiler fick namn enligt de aerodynamiska egenskaper de hade. De betecknades med ett antal siffror, man kan då läsa

vilka egenskaper en vingprofil har enbart från namnet. I en vingprofil med fyra siffror kan man läsa hur stor cambern är, var den är som störst och hur tjock vingprofilen är. T.ex. NACA 0021 är en symmetrisk vingprofil där tjockaste stället är 21% av längden. (Allen, 2017)

5.6.2 NACA 0021

Valet av vingprofil påverkar hur mycket lyftkraft och turbulens som genereras och vid vilka hastigheter de fungerar bäst. De självstartande egenskaperna påverkas också mycket och denna egenskap väger stort vid valet av vingprofil. Eftersom vertikala vindkraftverk lider av startproblem så väljs en vingprofil med goda start egenskaper.

En tjockare vingprofil har bättre självstartande egenskaper. Fördelar med tjockare vingprofiler är också att de är mer stabila och har bättre möjligheter för fästnanordningar. De har också bättre egenskaper vid låga TSR som denna rotor är anpassad för. Tunnare vingprofiler har högre verkningsgrad vid deras optimala varvtal men de passar inte för denna rotor. Fördelarna med en tjockare vingprofil fick mig att välja NACA 0021. (Chi-Cong, Tran, & Thi-Hong-Hieu, 2015)

Det finns verktyg där man kan rita formen för vingprofiler, det enda man behöver är längden på vingprofilen (Airfoil Tools, u.d.a). Längden på min vingprofil räknades ut från formeln:

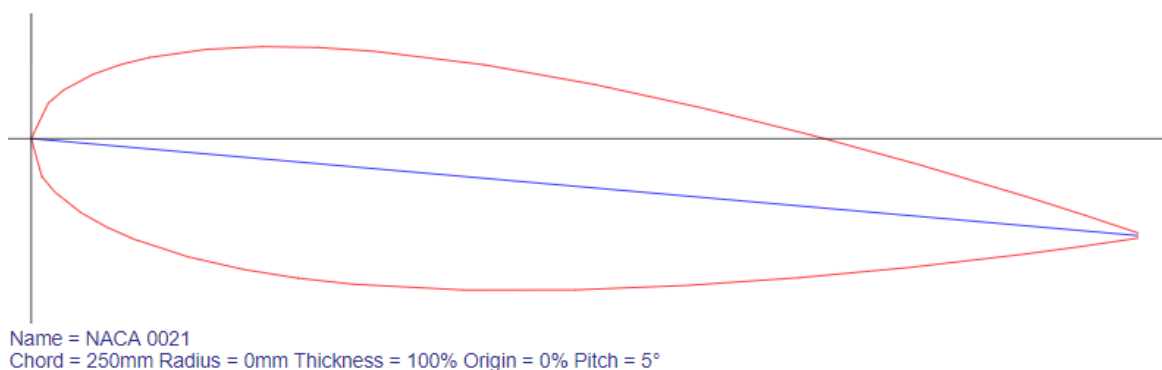
$$C = \frac{2 * r * S}{N} \quad (6)$$

Med soliditeten 0,30, radien 1,25m och 3 blad fick jag längden 250mm. Eftersom jag valde vingprofilen NACA 0021 vet jag att tjockleken blir 21% av 250mm, alltså 52,5mm. Tjockaste delen finns vid 30% av längden från främre spetsen (Airfoil Tools , u.d.b).

5.6.3 Anfallsvinkel

Anfallsvinkeln är vinkeln mellan vingprofilens rörelseriktning och inkommande luftens riktning. För att en symmetrisk vingprofil ska kunna generera en lyftkraft kan inte den vinkeln vara 0°. För ett vertikalt vindkraftverk varierar den vinkeln genom hela rotationen och vindriktningen är en produkt av rotorns rotationshastighet och vindens riktning. Vinkeln kommer att påverka i vilket skede vingprofilen genererar optimal lyftkraft vilket kan ändra rotorns totala verkningsgrad.

Studier har visat att en positiv anfallsvinkel vid stillastående rotor kan öka verkningsgraden, ge bredare verkningsområde och mindre lastvariationer. En anfallsvinkel på 5 grader väljs av de orsakerna eftersom en vinkel över 5 grader har en negativ inverkan då motståndet blir större. (Kozak , 2014)



Figur 9. NACA 0021 vingprofil med 250 mm korda och 5° anfallsvinkel. (Airfoil Tools, u.d.a).

5.7 Färdig design

Den valda designen sammanfattas i tabellen nedan. Designen har optimerats för de krav och önskemål som finns i produktspecifikationen.

Tabell 4. Design parametrar för rotorn.

Parameter	Värde
Antal blad	3
Bladhöjd (m)	2,00
Rotorns radie (m)	1,25
TSR	2,8
Soliditet	0,3
Vingprofil	NACA 0021
Korda (m)	0,25
Anfallsvinkel (°)	5

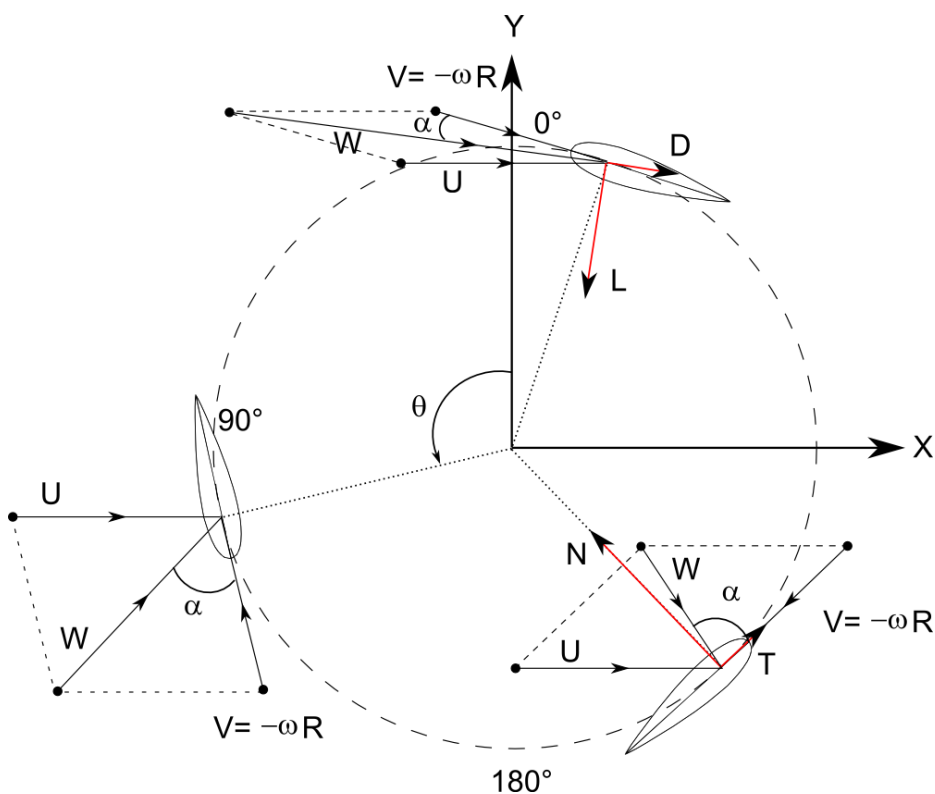
Tre blad var en kompromiss som styrdes främst av kostnad. Bredden och höjden styrdes av den önskade effekten som räknades med hjälp av formel 5 för vindens effekt. TSR och soliditet var de faktorer som främst påverkade verkningsgraden och kordan fick jag genom att räkna med redan valda parametrar. Vingprofilen och anfallsvinkeln valdes så att jag kunde förbättra de självstartande egenskaperna som är rotorns svagaste sida.

6 Konstruktion

När konstruktionen gjordes såg jag på flera olika sätt att konstruera vindkraftverket. Målet var dock att konstruera något som ska vara lätt att tillverka. Därför var fokus på en konstruktion som är enkel i små skala utan dyra verktyg. De krafter som verkar på en roterande rotor påverkade också materialval och konstruktion. Det är önskvärt att materialen ska vara lätt tillgängliga, med jämn kvalitet och lång livslängd. Konstruktionen gjorde jag helt själv till skillnad från den aerodynamiska designen.

6.1 Krafter som verkar på en rotor

Vinden verkar från två håll på en roterande vingprofil. Vinden som blåser U och vinden från att bladen färdas runt centrumaxeln V gör att den verkliga vindriktningen W är en produkt av de två olika vektorerna. Den här vindriktningen ändrar under hela rotationen. Kraften från W delas in i två komponenter. Ett luftmotstånd D uppstår i samma riktning och en lyftkraft L vinkelrätt mot verkliga vinden W . Vinkeln mellan verkliga vinden och vingprofilens korda kallas anfallsvinkel α . Lyftkraften är som störst vid 0° och minst vid 180° .



Figur 10. Krafter som verkar på en rotor. (Das & Talapatra, 2016).

6.2 Material

Materialvalet styrdes av hur enkelt det är att få tag i, hur lätt det är att arbeta med, hur starkt det är och materialets vikt. Kraven som ställs på materialen är konsekvenser från kravlistan. Det är viktigt att kravlistan följs i materialvalet för att uppnå de mål man ursprungligen satte. Materialen som undersöktes var trä, glasfiber, aluminium och stål.

6.2.1 Trä

Trä är ett välanvänt material inom konstruktion och kan användas för mycket olika ändamål. Det är också väldigt lätt att få tag i. Det går att köpa i flera olika storlekar och typer. Trä är också ett billigt material beroende på typ förstås. Mjukt trä såsom gran och tall som är populärt inom konstruktion är billigt, medan hårt trä såsom björk är dyrare. Trä är det lättaste materialet att arbeta med och kräver inga dyra verktyg eller svåra metoder för att bearbeta. Det mycket tack vare att det är ett mjukt material.

Problemen med trä är att det varierar i kvalitet och dess egenskaper. Trä har olika hållfasthet beroende på vilken riktning kraften verkar. Det beror på hur trä växer, det är inte bara riktningen utan det är också skillnad mellan olika träd fastän de är av samma sort. Sen finns det också faktorer som fuktighet som varierar och påverkar egenskaperna. Trä kan också ha defekter såsom kvistar, sprickor och ojämn växt som gör att det kan finnas punkter som är svaga. Fastän trä har utmärkta egenskaper i tryckhållfasthet och böjning är det de krafter som bladen utsätts för där trä har sin svagaste sida, alltså krafter som är vinkelrätt mot årsringarna. (Civilseek, 2021).

Av de orsakerna att det är ett ojämnt material och de former som träet måste vara i för mitt ändamål gör att det är svårt att arbeta med. Trä undersöks inte vidare.

6.2.2 Glasfiber

Glasfiber är ett av världens mångsidigaste material och har mycket intressanta egenskaper för vindkraftverk. Det har väldigt bra hållfasthet och är väldigt stabilt. Glasfiber har mycket lång livslängd och påverkas inte av omgivningen så att det skulle ruttna eller rosta som andra material kan göra. Formbarheten är också mycket intressant, har man en form kan det formas hur man vill och att skapa en vingprofil i glasfiber är helt klart möjligt. Det är också relativt kostnadseffektivt. (PFH, u.d.).

Problemen med glasfiber är att det är relativt svårt att arbeta med. Det krävs att man skyddar sig när man arbetar med det. Eftersom materialet är som en filt måste det också ha en mall för att kunna få de former man önskar. Det ska klippas och placeras ut till den form man vill ha och sedan ska det härdas. Glasfiberblad är ett alternativ men inte till resten av vindkraftverket eftersom det finns bättre alternativ. Glasfiber väljs inte av de orsakerna att det är svårt att arbeta med.

6.2.3 Aluminium

Aluminium har mycket fördelar och är en av de populäraste materialen som används både i små och stor skala. Speciellt för ett vindkraftverk finns det mycket fördelar. Det är ett mycket starkt material och en av de lättaste metallerna som finns. I en rotor är vikten något som ska hållas så lågt som möjligt. Andra fördelar som är viktiga är att det håller länge, det rostar inte och om man vill kan man ytbehandla aluminium på flera olika sätt t.ex. genom att måla det. Aluminium är också lätt att forma till det man vill ha, det finns att köpa i flera olika typer och modeller t.ex. rör eller stänger. Eftersom aluminium är så populärt är det lätt att få tag i och relativt billigt. (Crucial Engineering, u.d.).

Problemet med aluminium är att det är svårt att svetsa. Det kräver dyr utrustning och gör man inte allt rätt kan det uppstå sprickor eller hål i materialet. Det kan undvikas om man är erfaren inom aluminiumsvetsning, men för den oerfarne rekommenderas andra metoder såsom limning. Det är inte heller helt enkelt att limma i aluminium men följer man instruktioner från limtillverkare ska det gå. Det är iallafall relativt billigt med lim. Av de orsakerna som nämnts väljs aluminium till rotorbladen och armarna.

6.2.4 Stål

De egenskaper stål har är att det har jämn kvalitet, till skillnad från t.ex. trä. Det produceras i fabriker i alla möjliga olika typer och former. Det är ett av de vanligaste materialen som används så det är lätt tillgängligt och billigt. Liksom med aluminium produceras delar färdigt före man köper dem så man måste bara montera ihop dem. Det kan göras genom svetsning som är mycket lättare än för aluminium och går att göra med billigare verktyg. Stål väger mycket mer än de andra materialen men i vissa delar spelar inte vikten någon större roll, t.ex. tornet. Trots problemen med stål såsom rost, som kan förebyggas med att måla ytorna och den höga vikten väljs stål till delar där vikten inte spelar någon roll. (Structural, u.d.).

6.3 Blad

Blad designen hade flera olika saker som påverkade slutresultatet. Hur de olika delarna ska monteras, hur de ska böjas så lite som möjligt och hur de ska fästas till resten av rotorn påverkade hur konstruktionen av bladen blev. Designen har tagit inspiration av flygindustrin där en eller flera balkar går igenom hela bladet och tar emot den största delen av krafterna bladet utsätts för. Formen fås genom att sätta upp väggar med jämna mellanrum som har formen av den valda vingprofilen. Dessa väggar binder ihop alla delar. Väggarna kan också fungera som fästpunkt för de armar som håller ihop bladet med resten av rotorn. Slutligen täcks hela bladet in med ett tunt material som har som funktion att göra vingen aerodynamisk. Det materialet kommer inte utsättas för någon större kraft.

Det går att tillverka blad som är helt solida eller blad som har ett likadant mönster genom hela bladets längd. Hur bladet tillverkas kommer att påverkas av budgeten, prestandakrav och om det är serieproduktion eller inte. Också materialvalet och de verktyg som finns att tillgå är en faktor som påverkar hur de konstrueras.

6.3.1 Krafter på bladet

Det finns två krafter som verkar på bladet. En centrifugal kraft som orsakas av rotationen och en aerodynamisk kraft som orsakas av vinden. Centrifugalkraften ökar när rotationshastigheten ökar. Formeln för att räkna centrifugalkraften är:

$$F = \frac{m \cdot v^2}{r} \quad (7)$$

Där m är massan för bladet, v är tangentiella hastigheten för bladet och r är radien för rotorn. För att kunna räkna ut tangentiella hastigheten måste man räkna hur snabbt rotorn kan rotera. Under ideala förhållanden kommer bladen rotera 2,8 gånger snabbare än inkommande vind. Rotorns design är så att den kommer att mista lyftkraft om den roterar för snabbt, men något kontrollsystem är ändå nödvändigt för att inte rotationshastigheten ska gå över designad hastighet.

En vanlig gräns när vindkraftverk stängs av är vid 25 m/s vind som man kan se från tabell 1. Vi denna hastighet skulle bladen ha en hastighet på 70 m/s. En säkerhetsfaktor på 1,3 är nödvändig eftersom ett möjligt fel kan vara allvarligt. Säkerhetsfaktorn ska täcka eventuella

fel i designen eller fel i kontrollen av hastigheten. Med säkerhetsfaktorn blir högsta möjliga hastighet för bladen 90 m/s och högsta möjliga varvtalet 680 rpm.

Från formel 7 och med massan 4,6 kg, radien 1,25 m och hastigheten 90 m/s kan man räkna att kraften som orsakas av rotationen är 30 kN. Massan räknades från 3D modelleringsprogrammet NX 12. Den här kraften verkar över hela bladets längd.

Hur stor kraft från vinden som kan påverka bladen kan fås genom att räkna trycket från vinden. Vinden skapar ett tryck på en area, formel för kraft är:

$$F = P * A \quad (8)$$

Trycket är kinetiska energin från en flödande vätska och kan skrivas med formeln (Hall, 2015):

$$P = \frac{1}{2} * \rho * v^2 \quad (9)$$

En luftmotståndskoefficient är nödvändig för mer exakt resultat. Formeln för att räkna kraften blir då:

$$F = \frac{1}{2} * \rho * v^2 * A * C_d \quad (10)$$

Där F är kraften, ρ är luftens densitet, v är luftens hastighet, A är rotorns area och C_d är luftmotståndskoefficienten. För en vingprofil är den väldigt låg, koefficienten 1 användes för att få en ordentlig säkerhetsmarginal. Kraften som kommer från vinden i extrema fall är ca. 3 380 N som verkar över hela bladets längd. Som man kan se är den mycket lägre än centrifugalkraften.

6.3.2 Fästpunkter

Kraften kommer att fördelas jämnt över hela bladets längd. Fästpunkterna till rotorn kommer att påverka hur mycket bladet böjs. Eftersom bladet kommer att byggas upp med väggar med jämna mellanrum kommer fästpunkterna att vara på samma ställe som väggarna. Det möjliggör tre olika sätt att placera fästpunkterna.

1. En vid 25 % och 75 % av bladets längd. Två fästpunkter totalt.
2. En vid 0 % och 100 % av bladets längd. Två fästpunkter totalt.
3. En fästpunkt vid 50 % av bladets längd.

För att kunna utvärdera vilken fästpunkt som ger minst böjning testas fästpunkterna med en balk som har samma material, tröghetsmoment, tvärsnittsarea och som utsätts för samma last bladen i vindkraftverket kan utsättas för. Testerna gjordes för en 2m lång aluminiumbalk med elasticitetsmodul 69 000 MPa, arean 412 mm² och tröghetsmomentet 46 000 mm⁴. En jämnt utbredd last på 15 kN/m verkar på balken. Resultatet presenteras i tabellen och grafer från testen finns i bilagor ett till tre. (Clearcalcs, 2021).

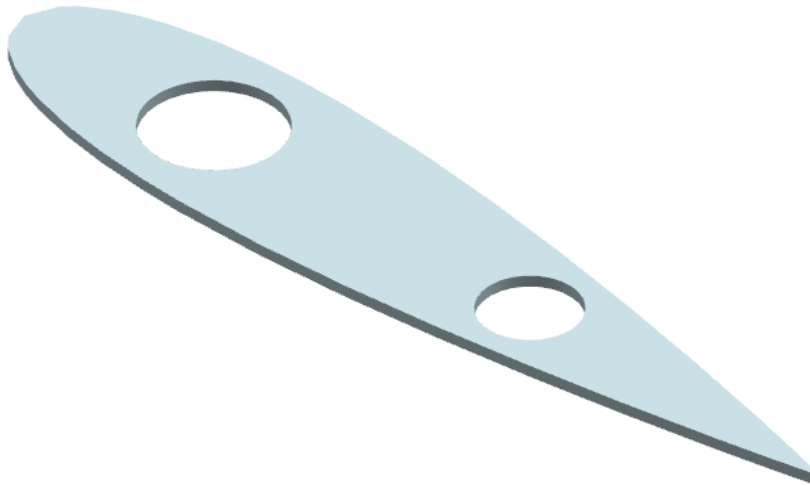
Tabell 5. Krafter och böjning som verkar på testbalkens vid olika fästpunkter.

Fästpunkt	Skjuvkraft (kN)	Moment (kNm)	Böjning (mm)
25%, 75%	7,5	1,9	36,4
0%, 100%	15,0	5,0	194,0
50 %	15,0	7,5	583,0

Från tabellen kan man se att två fästpunkter, en vid 25% och en vid 75% av bladets längd är det klart bästa alternativet. Skjuvkraften är hälften av vad den är på de andra alternativen. Böjningen är också klart mindre vilket är mycket viktigt med tanke på vibrationer eller utmattning som kan uppstå om bladen böjs för mycket. Fastän endast en arm skulle vara mer ekonomiskt så är två armar med mindre krafter att föredra. Det första alternativet valdes eftersom det har minst böjning och det är ett lämpligt ställe att placera väggarna.

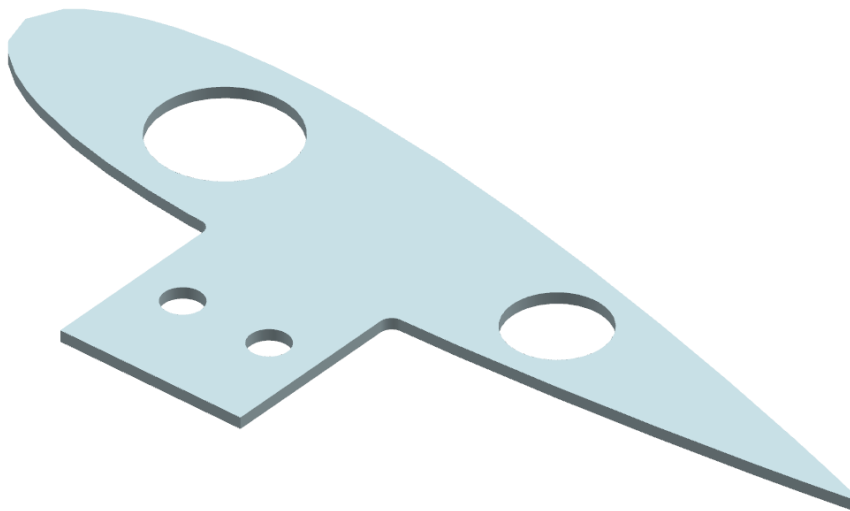
6.3.3 Bladets konstruktion

Bladet konstruerades så att två rör fästs ihop med väggar i form av vingprofilen. De placeras med 500 mm mellanrum så att väggar placeras vid det ideala avståndet för att minska på böjningen under last. Två olika väggar konstruerades. En med endast två hål för de genomgående rören.



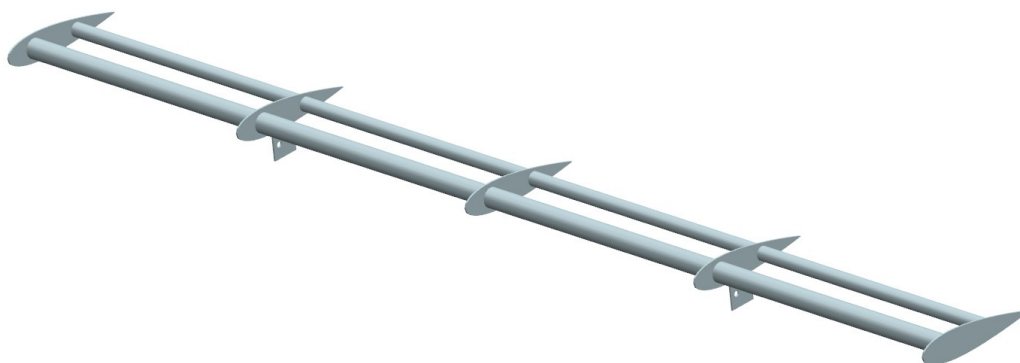
Figur 11. Mellanvägg.

En modell med fästen för armarna. Fästena har två hål vardera för bultar.



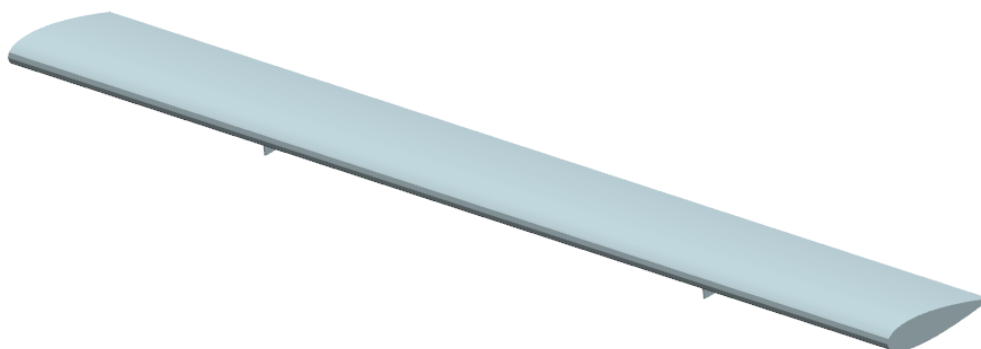
Figur 12. Mellanvägg med fästen.

Med rören som är 35x3 mm och 25x1,5 mm i diameter ser bladet ut enligt figur 13.



Figur 13. Blad utan täckplåt.

En 0,5 mm tjock plåt täcker in hela konstruktionen för att få ett färdigt blad.



Figur 14. Blad med täckplåt.

6.4 Rotorns armar

Rotorns armar kan konstrueras på flera olika sätt. Under ideala förhållanden borde de ha formen av en vingprofil för att ha så litet luftmotstånd som möjligt. Det är komplicerat och fördelarna med det är så minimala att det inte undersöktes för rotorn. I stället valdes en färdig profil som går att köpa färdigt. Valet föll på ett rektangulärt flatjärn på grund av det relativt låga luftmotståndet. Fler fördelar med ett flatjärn är att det är lätt att böja enligt egna önskemål och det är lätt att fästa till andra delar av kraftverket.

6.4.1 Krafter som verkar på armarna

Krafterna som verkar på rotorns armar är centrifugalkraften från bladen och ett moment från bladens rotation. Centrifugalkraften drar i armarna och har redan räknats för bladen. Från formel 7 kan man räkna kraften som drar på armarna. När man räknar arean för armarnas tvärsnitt kan man räkna hur mycket stress de utsätts för med formeln:

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (11)$$

Ett böj moment från bladens massa verkar på armarna. Den går att räkna med formeln:

$$M = F * r \quad (12)$$

Där M är momentet F är kraften och r är radien. F är bladets massa multiplicerat med gravitationen.

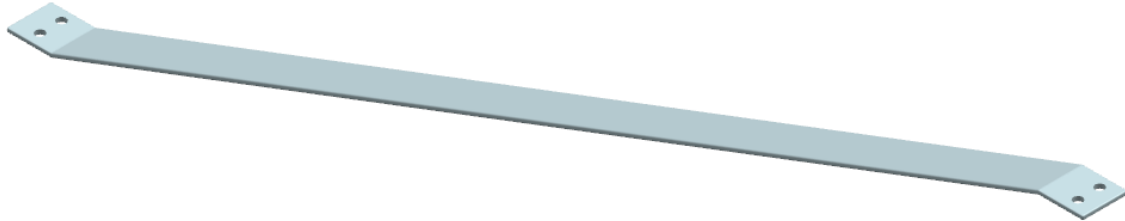
Ett moment från rotationen verkar också på armarna. Om man räknar med formel 10 att maximalt 0,6 gånger vindens kraft kan omvandlas till moment som roterar bladen kan man få största möjliga kraften på armarna från rotationen. Vid en 35 m/s vindstyrka kommer 3 750 N att påverka rotorn. Om det fördelas jämnt på 6 armar blir det maximalt 625 N. Från formel 12 kan man räkna att 780 Nm kan påverka armarna teoretiskt. Detta är väldigt orealistiskt i praktiken men används som maxvärde. Man kan klart se att kraften här är mycket mindre än för centrifugalkraften.

6.4.2 Armarnas konstruktion

Aluminium valdes på grund av den låga vikten, styrkan och de goda böj möjligheterna. Fästpunkterna för armarna är vid väggarna inuti bladen. Det möjliggör starkare fästpunkter. Armarna fästs med bultar i vardera ände, två i bladet och två i tornet. Armarna har en böj i båda ändarna för att passa ihop med navet och bladens fästpunkter.

En aluminium stång 50x5 mm i serien 6000 väljs. Aluminium i serien 6000 klarar av 85–200 Mpa (azo materials, 2005). Från formel 11 räknas att en arm utsätts för 60 Mpa så designen klarar sig utan deformation. Centrifugalkraften är 15 kN, momentet från rotationen 780 Nm och från bladets massa 56 N. Eftersom centrifugalkraften var mycket mer krävande än de andra krafterna kan man konstatera att konstruktionen håller.

Centrifugalkraften påverkar också de bultar som fäster bladet med armarna. Den går också att räkna med formel 11. En M8 8.8 bult klarar av 640 Mpa och utsätts för ca. 150 Mpa (Bolt Depot, 2021). Bulten klarar av krafterna.



Figur 15. Arm mellan nav och blad.

6.5 Nav

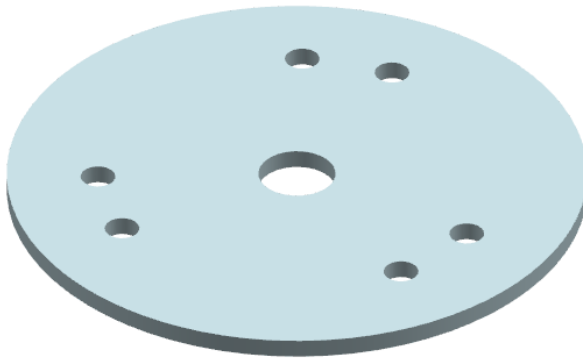
Navet är delen som fäster armarna till en enda del som sedan kan fästas på en axel. Navet bör gå att ta loss från axeln och armarna bör gå att ta loss från navet. Vikten spelar inte stor roll här eftersom massan är nära centrum för rotationen. Krafterna är inte heller stora här på grund av mindre centrifugalkraft.

6.5.1 Krafter som verkar på navet

Navet kommer påverkas av en centrifugalkraft från bladens rotation. Armarna fästs i navet och försöker dra på navet. Kraften kommer verka på bulthålen. Den går att räkna från formel 11. En kraft från bladens vikt kommer också att påverka navet men som tidigare konstaterats är den obetydlig.

6.5.2 Navets konstruktion

Som tidigare räknats är en M8 bult lämplig att använda. Navet konstrueras med totalt 6 hål för armarna. I mitten av navet finns ett 20 mm hål som axeln på tornet ska gå igenom. Sen fästs navet med två 20 mm muttrar.



Figur 16. Nav.

6.6 Tornet

Tornet kommer att föra kraften från rotorn ner till marken och bära upp hela rotorn och kommer därför att utsättas för krafter i flera riktningar. Materialvalet är inte lika fokuserat på vikt utan i stället prioriteras styrkan i materialet.

6.6.1 Krafter som verkar på tornet

För att kunna räkna hur starkt tornet ska vara måste man räkna vilken kraft vinden skapar på rotorn. För att enkelt kunna göra det räknades rotorn som en solid vägg vid änden på en hävarm. Kraften från vinden skapar ett moment som försöker vrida tornet mot marken. Genom att räkna med en vägg som släpper igenom en del luft kan man räkna hur stor kraft vinden skapar. Som tidigare diskuterats förhindrar Betz's lag att mer än 59,3% av vinden kan tas upp av rotorn, resten måste flöda igenom. I verkligheten kommer inte en rotor upp till den verkningsgraden, så skillnaden mellan rotorns verkningsgrad och Betz's lag kommer att fungera som en säkerhetsfaktor. Säkerhetsfaktorn finns för att kompensera för räknefel och krafter som inte räknas med i den här förenklade modellen.

Formel 10 för att räkna luftens tryck på en yta används med koefficienten 1,2 för en cylinder och med den extra koefficienten 0,6 för Betz's lag. (Bruschi, Nishioka, Tsang, & Wang, 2003).

$$F = \frac{1}{2} * \rho * v^2 * A * C_d * 0,6 \quad (13)$$

Där F är kraften, ρ är luftens densitet, v är luftens hastighet, A är rotorns area och C_d är luftmotståndskoefficienten.

Tornet måste dessutom klara kraften från rotorns vikt. Kraften försöker trycka ihop tornet och kan räknas med formel 11.

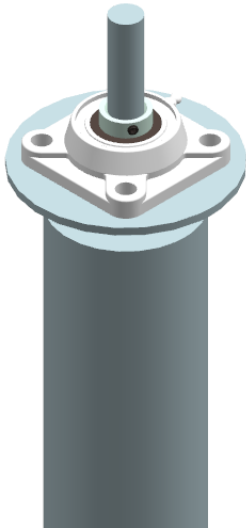
6.6.2 Tornets konstruktion

Från formel 12 kan man räkna att vinden påverkar tornet med en kraft på 540 N vid 35 m/s som är den högsta vindstyrkan som är sannolik. Fastän rotorn ska stanna vid 25 m/s så måste den ändå klara av starkare vindar och speciellt vindbyar över det.

Ett stålrör S355J2H 88,9x5 mm väljs för tornet. Materialet har elasticitetsmodulen 210 000 MPa, tröghetsmomentet 1 126 780, sträckgränsen 355MPa och tvärsnittsarean 1 303 mm² (EurocodeApplied.com, u.d.). Med ett 3 m högt torn blir momentet 1,62 kNm och böjningen 20,5 mm under extrema förhållanden. Det finns säkerhetsåtgärder som ska göra att så här höga krafter inte ska vara möjliga.

På övre delen av tornet finns ett smalare rör. 33,7x2,6 mm för att få rum med bultar åt lagret. Det röret utsätts för hela rotorns vikt men momentet är väldigt lågt eftersom den smalare delen inte har en lång hävarm. Från formel 11 kan man räkna att spänningen från rotorns massa på rörets tvärsnittsarea är 0,75 Mpa vilket är obetydligt.

På tornets topp finns en platta där lagret fästs med fyra bultar. Genom lagret går en 20 mm axel som går ända ner till grunden där generatorn finns. Axeln sticker upp ca 10 cm från lagret så man har rum att fästa navet.



Figur 17. Övre delen av tornet med lager och axel.

6.7 Elsystem

Elsystemet på ett vindkraftverk kan vara olika från ett vindkraftverk till ett annat. Det som alla vindkraftverk bör ha är en generator och en enhet för laddningskontroll. Sen om man ska ladda batterier med vindkraftverket så ska man ha batterier och vill man ha 230 V användbar elektricitet ska man ha en inverter som skapar växelström. Har man redan solpaneler eller ska kombinera det med solpaneler kommer vissa saker i elsystemen att redan finnas eller se annorlunda ut.

6.7.1 Generator

Generatoren på ett vindkraftverk kan vara en AC-generator eller en DC-generator. En AC-generator kan kopplas direkt till elnätet via en elnätsinverter. En DC-generator kan däremot ladda batterier och kopplas till elnätet via en inverter för det. Det ändamål man har kan styra vilken generator man ska ha. Generatorer kan ha elektromagnetiska eller permanenta magneter. De flesta små vindkraftverk har permanenta magneter eftersom de är mindre komplicerade. Generatorer kan också kopplas via en växellåda för att få högre varvtal. Men det introducerar en mekanisk komponent som slits, så det ska undvikas om möjligt. Generatorer som går på låga varvtal är dyrare och svåra att få tag på så det kan vara värt att överväga en liten växellåda. (Alternative Energy Tutorials, u.d.a).

En permanent magnet DC generator är vanligast för små vindkraftverk och rekommenderas eftersom det finns fördelar med att ladda batterier och då krävs en DC-generator. De finns också att få för låga voltnivåer och varvtal vilket möjliggör att de används utan växellåda. Eftersom elektriciteten som används är i AC kommer en inverter att krävas efter batterierna för att få AC med rätt spänning. (Alternative Energy Tutorials, u.d.b)

6.7.2 Kontrollsystem

Ett kontrollsystem till ett vindkraftverk kan se ut på flera sätt, figur 18 visar alla de komponenter som behövs. Det finns kontrollers som kan hantera solpaneler också. Men ett kontrollsystem som är gjort för solpaneler kan inte styra ett vindkraftverk.



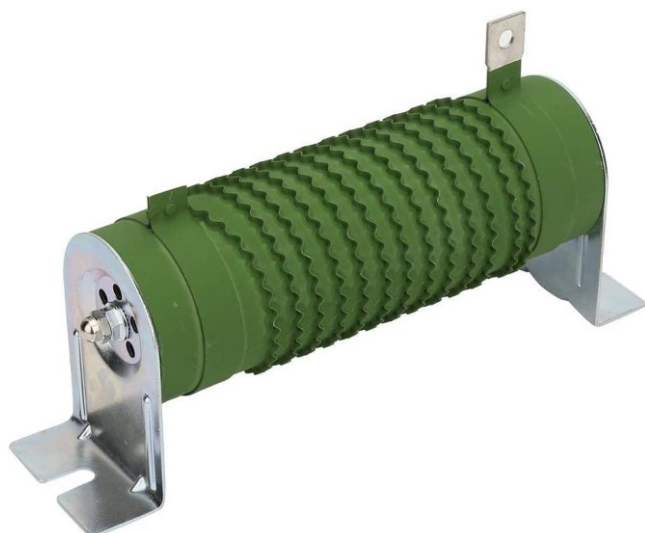
Figur 18. Kontrollsystemet kopplas till dessa komponenter. (amazon, u.d.a).

Kontrollsystemet tar elektriciteten från vindkraftverket och laddar batterierna. När batterierna blir fulla kan solpaneler stängas av, men vindkraftverk genererar fortfarande elektricitet som måste dumpas någonstans, då styrs det till ett belastningsmotstånd. Kontrollsystemet kan också mäta spänningen från vindkraftverket. Om den är för hög genereras för mycket ström så kontrollsystemet bromsar rotorn genom att lägga på mer last för rotorn. Det är viktigt att kontrollsystemet och alla dess komponenters spänning stämmer överens. Det är också viktigt att alla komponenter klarar av rotorns effekt. (Schwartz, 2020)

6.7.3 Belastningsmotstånd

Som tidigare nämnts kan batterier bli fulla så den energi som fortfarande skapas av det roterande vindkraftverket ska styras någonstans. Det kan göras på två sätt, antingen så kopplar man loss rotorn så den får rotera fritt och inte laddar något batteri, eller så använder man ett belastningsmotstånd. Att låta rotorn rotera fritt är inte ett bra alternativ eftersom hastigheterna för en rotor utan last i hård vind kan bli väldigt höga, det finns risk att rotorn skadas eller går sönder vilket är en fara för omgivningen. Att bromsa det helt och hållet går också men då ska den starta igen och bromsas helt och hållet så fort kontrollsystemet känner igen en för stor last.

Ett belastningsmotstånd fungerar så att kontrollsystemet styr all energi till ett stort motstånd där det blir till värmeenergi som sedan läcker ut i luften. Det möjliggör att rotorn inte behöver stanna utan kan i stället smidigt styra överloppsenergi till motståndet kontinuerligt. Ett motstånd kan bli väldigt varmt och det är viktigt att täcka in det med ett galler för att inte bränna sig om man rör i det. Det ska inte heller monteras mot en trävägg utan att ha en metallplåt emellan för att skydda väggen man monterar på. Det finns också belastningsmotstånd som kan användas till att värma vatten eller rum. Har man monterat ett vindkraftverk på ett tak till exempel kan man ha en vattentank där man lagrar värme med ett motstånd. Är vindkraftverket däremot placerat mer avlägset kommer energi att gå förlorad. (Missouri Wind and Solar, 2013)



Figur 19. Belastningsmotstånd. (amazon, u.d.b).

6.7.4 Inverter och batteri

En inverter omvandlar DC-ström från batterier eller kraftverk till AC ström med 230 V som används i elektriska apparater. Genom att ta likströmmen som flödar i en konstant riktning och alternera riktning 50–60 gånger per sekund kan 50–60 Hz elektricitet skapas, samma elektricitet som kommer från elnätet. Det ska vara en inverter som genererar sinusvågor vilket innebär att mer känslig modern elektronik kan använda elektriciteten. (Woodford, 2020)

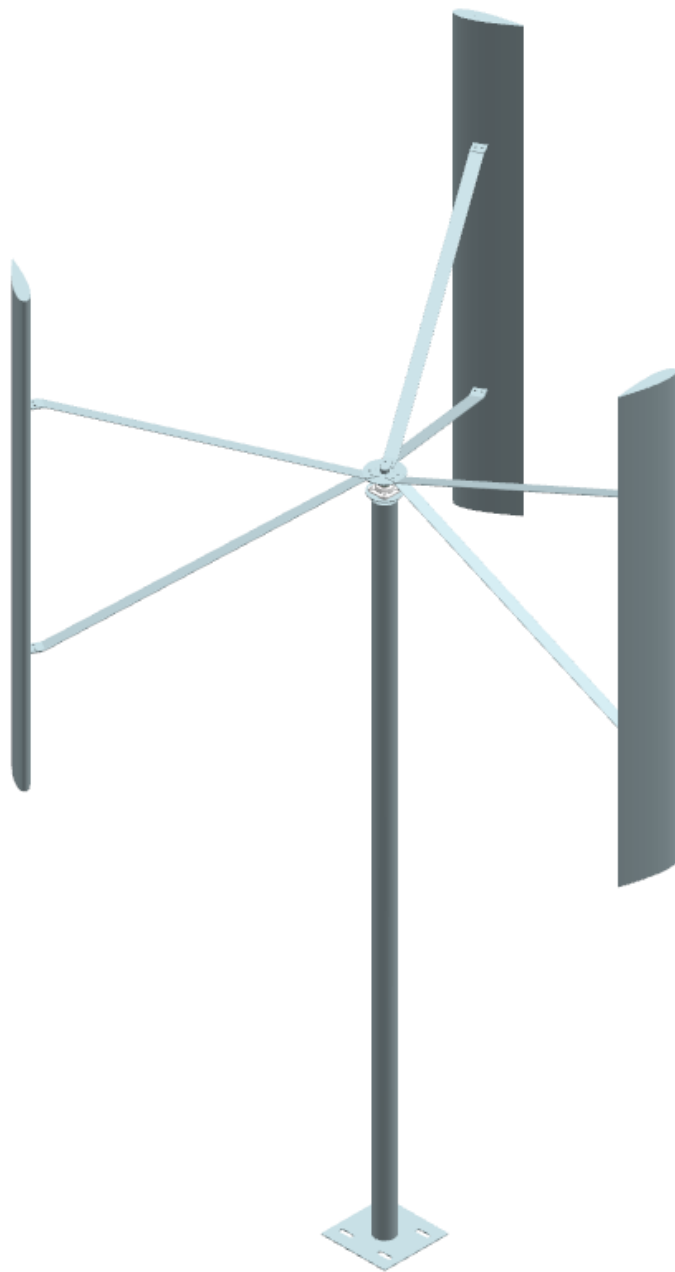
Man kan ha ett system utan batterier och i stället ha en inverter direkt som gör 230 V elektricitet som via en elmätare styrs till elnätet när man producerar mer elektricitet än man använder. Batterier kan ändå vara bra att ha eftersom det är dyrare att köpa el än när man säljer på grund av överföringsavgifter. Kan man spara el i batterier och använda senare i stället för att sälja kommer det bli mer lönsamt. Eftersom vindkraftverk har så varierande effekt är batterier en bra idé eftersom man kommer att ha situationer när man inte producerar något.



Figur 20. Inverter. (amazon, u.d.c).

6.8 Färdig konstruktion

Figur 21 visar den färdiga konstruktionen med tornet och hela rotorn. Hela konstruktionen är 4,10 meter hög från tornets platta och 2,5 meter i diameter. Rotorn väger 19 kg, tornet väger 35 kg och hela konstruktionen väger 54 kg.



Figur 21. Färdigt vindkraftverk.

Den nedre delen med generator gjorde jag inte någon detaljerad ritning av. Det eftersom var rotorn monterad och hur man monterar kommer att variera. Inverter, laddningskontroller och eventuella batterier placeras skilt från rotorn så det gjordes inte någon ritning över det heller.

7 Tillverkning

Vindkraftverket har konstruerats så att det ska vara enkelt att tillverka. I produktspecificeringen var det ett krav. Det kravet har påverkat konstruktionen och materialvalen. I kapitlet presenteras metoder för att producera ett kraftverk och hur saker kunde gjorts annorlunda om det var frågan om serieproduktion, men fokus ligger på produktion av ett kraftverk. Jag kommer att gå igenom del för del hur de kan tillverkas enkelt och billigt med lite verktyg. Aluminium rostar inte så det bör man inte måla men det rekommenderas ändå eftersom stål ska målas och då får man en färg man vill ha över hela vindkraftverket.

7.1 Blad

Bladen består av totalt åtta delar. Det finns två väggar med fästen, tre väggar utan fästen, två olika rör och en plåt. För att tillverka väggarna med vingens profil går det antingen att rita koordinaterna på en plåt och klippa ut formen, eller att printa ut vingprofilens form i skala 1:1 och rita av den på en plåt. Eftersom koordinaterna har många decimaler rekommenderar jag att man printar ut formen och ritar av för att få ett exakt resultat. Eftersom den är 250 mm lång har den rum på ett A4-papper. Den korrekta vingprofilen finns i skala 1:1 i bilaga 5. När vingprofilerna har ritats kan de klippas ut med en plåtsax eftersom de är tunna och aluminium är ett relativt mjukt material. Hålen är alla standardstorlekar och går att borra. En av orsakerna att rör användes var för att det ska vara enkelt att borra hålen.

Om man tänker i större skala eller med dyrare verktyg kunde de skäras ut med en CNC-maskin eller stansas ut med en färdig form. Eftersom koordinaterna finns tillgängliga i bilaga 6 är det relativt enkelt att programmera en CNC-maskin om man har tillgång till det.

Rören är båda i standardstorlekar och går att köpa i de flesta butiker som säljer metall. Metallrör säljs ofta i 6 m längder och bladen är 2 m höga. Alltså räcker det perfekt med ett rör av varje storlek åt hela kraftverket. Alternativt kan man köpa kortare 2 m bitar som är färdigt sågade om butiken erbjuder det. Hursomhelst är det planerat så det ska vara ekonomiskt. Sågar man själv går det enkelt med en metallsåg eller en cirkelsåg för trä med en aluminium klinga som inte kostar speciellt mycket.

Plåten som täcker in allting kan klippas eller sågas, den är väldigt tunn, endast 0,5 mm. Bladen är 2 m höga och plåt säljs ofta som 2 m breda, alltså måste endast långsidorna klippas. Kan man så är det smart att köpa färdigt klippta bitar. Eftersom bladen är lika stora som bredden på plåtar är det väldigt ekonomiskt.

Bladen kan antingen svetsas eller limmas ihop. Båda metoderna har sina fördelar och nackdelar. Men det som avgör vad man väljer är vilka verktyg man har tillgång till. En svets för aluminium är väldigt dyr. Det är svårt att svetsa, det kan uppstå sprickor eller man smälter för mycket material och så kan man förstöra ytan på materialet (Duchesne, 2019). Därför är limning ett intressant alternativ. Aluminium är faktiskt möjligt att limma med bra resultat. Det kräver inga dyra verktyg och följer man limtillverkares instruktioner kan man få väldigt starka fogar.

Det finns flera olika tillverkare av lim för aluminium och de olika limen kan delas in i flera olika klasser. Det är viktigt att man använder rätt typ av lim och följer de specifika instruktionerna från tillverkaren. Före man limmar ska man torka ytorna och eventuellt slipa dem med fint sandpapper, sen applicerar man limmet och väntar på att det ska torka. Det finns epoxi baserade lim som ofta är två komponents lim och torkar snabbt, polyuretan lim och superlim. Gemensamt för de flesta lim är att de kan användas för olika material såsom trä, plast och metall, men också mellan metall och metall. Sorterna är lämpliga för olika ändamål. (Loctite, 2021a).



Figur 22. Exempel på lim för aluminium. (Loctite, 2021b).

För att fästa vindkraftverkets delar finns det t.ex. Loctite Weld som är ett alternativ till svetsning. Det ger starka limfogar på aluminium. Det torkar på minuter och är resistent mot fukt, vatten och går enkelt att måla på senare. Eftersom krafterna som håller ihop delarna i bladen inte är stora är limning det alternativ som jag rekommenderar. (Loctite, 2021b).

7.2 Armar

Armarna är designade så att de ska gå att köpa i standardstorlekar i de flesta butiker som säljer metall. De är 50x5 mm aluminium stänger som är 1,3 m långa. Armarna går att såga med en cirkelsåg med klinga för aluminium som också kan användas för rören. Kan man igen köpa färdigt sågade delar är det ett alternativ. Hålen som borrar i armarna är standardstorlek och går att borra med en helt vanlig borr för metall. Hålen har samma storlek som på bladets väggar. Böjandet av armarna är det svåraste med armarnas tillverkning, men med hjälp av att skruva fast dem i t.ex. ett skruvstöd och böja med en träbit och en hammare som hjälp ska det gå. Aluminium har goda böjmöjligheter även utan uppvärmning.

7.3 Nav

Navet är i aluminium eftersom det är ett lätt och starkt material. Det består av en platta med ett hål i mitten och sex mindre hål runt om. De mindre hålen är av samma storlek som i armarna och väggarna på bladen så samma borr kan användas. Det är mycket viktigt att det större hålet placeras i centrum. Det ska placeras runt axeln och är det inte centrerat kommer rotorn att gå ojämnt. Navet spänns fast med två låsmuttrar på den gängade delen av axeln.

7.4 Torn

Tornet är ett 3 m långt rör som är 88,9 mm i diameter. Det är en del som man kan köpa färdig sågad. Stål är hårdare än aluminium och går inte att såga med en vanlig cirkelsåg utan måste sågas med en vinkelkap eller metallsåg. En vinkelkap är relativt billig och har man en redan kan man använda den. Rören säljs oftast i 6 m långa delar så i större skala kan ett rör användas till två vindkraftverk vilket gör designen ekonomisk. På tornet fästs en platta av metall med hål i för en axel som man ska skruva fast lagret i. Den plattan är av

samma tjocklek som plattan lagret fästs i. Om man kan köpa små bitar i metall så kan man såga ut delarna själv med en vinkelkap. Hålet som borras i dem är av en standardstorlek och går att borra med en vanlig bormaskin med metallborr. Det finns en till kortare rördel med mindre diameter som fästs mellan de två plattorna.

Skulle man producera dem i större mängder kunde man köpa stora plåtar och skära ut dem med CNC-maskiner, men i liten skala löns det inte att köpa en fullstor plåt för två små delar så jag rekommenderar att man köper färdiga delar om det går. Svetsning är att rekommendera på stål eftersom det är relativt enkelt och går att göra med billigare svetsar och det blir väldigt starkt.

Lagret har 20 mm hål för en axel och går att köpa i butiker som säljer lager, lager finns i flera olika märken och modeller men det rekommenderas att köpa ett som tål väder och inte rostar. Genom hela tornet går en 20 mm solid axel. Den är över 3 m lång och sågas av med en vinkelkap eller köps färdig sågad. Den fästs i lagret med de skruvar som redan finns på lagren. I den övre änden av axeln görs M20 gängor, det för att navet ska fästas med bultar på axeln.

8 Kostnad

Det finns mycket kostnader som man kan räkna med och det kan bli väldigt komplicerat med mycket uppskattningar. När vindkraftverket produceras för en själv är det enklare och man får mycket mer tillförlitliga uträkningar. Fokus kommer att ligga på att producera ett vindkraftverk för eget bruk. Om man hade ett företag och tillverkade flera vindkraftverk skulle man ha procedurer, mallar och tillverka flera delar på en gång som man sedan bara plockar ihop. Sen hade man också kostnader för arbetet. Det gör man inte om man tillverkar endast ett för eget bruk. Därför kommer fokus att ligga på materialkostnader och köpta delar.

8.1 Material

Materialkostnaderna går att räkna enkelt genom att antingen fråga offert på de delar man ska ha eller genom att se på någon leverantörs hemsida där de presenterar kostnader för olika metalldelar. Eftersom de dimensioner som har valts finns att få tag på i vanliga metallbutiker ska det inte vara svårt att hitta dem. Standardiserade delar har använts för att hålla kostnader låga. Elektronik finns att köpa på stora sidor som Amazon eller eBay och batterier i t.ex. vanliga butiker för biltillbehör.

Nedan presenteras en tabell med alla delar som bör skaffas och ungefärliga priser på dem. Materialkostnaderna har räknats på sidan Oulun PalaMetalli. På deras sida finns det alternativet att välja exakt hur stora delar man vill ha. Det tillkommer en avgift för klippningen av plåten. Den avgiften är inräknad i tabellen. Fraktkostnader finns inte med eftersom de kan variera så mycket. Tabellen är mer riktgivande ungefär hur mycket materialet till vindkraftverket kostar. Materialet kan bli billigare eftersom klippningsavgiften var en stor del av materialens kostnader, däremot blir kvaliteten mycket bättre och man klarar sig utan dyra verktyg. Lagret är från laakerinetti.com och är rostfritt, ett billigare gjutjärn lager finns också och det sparar ca. 20 euro. Priset på bultar och muttrar är från IKH. De är väldigt billiga och finns att köpa i paket eller som enskilda bultar.

Tabell 6. Materialkostnader.

Material					
Del	Material	Storlek (mm)	Antal (st)	Pris (€)	Källa
Mellanvägg utan fästen	Aluminium	250x55x3	9	29,97	(Oulun Palametalli, u.d.)
Mellanvägg med fästen	Aluminium	250x100x3	6	22,83	"
Plåt för blad	Aluminium	2000x715x1	3	71,70	"
Rör för vinge	Aluminium	2000x30x3	3	37,50	"
Rör för vinge	Aluminium	2000x25x1,5	3	22,69	"
Arm	Aluminium	1300x50x5	6	46,85	"
Nav	Aluminium	150x150x5	1	10,54	"
Platta vid lager	Stål	130x130x3	1	5,02	"
Platta på torn	Stål	90x90	1	4,66	"
Platta vid tornets bas	Stål	300x300x5	1	15,38	"
Torn	Stål	3000x88,9x3,2	1	36,70	"
Axel	Stål	3300x20	1	19,59	"
				323,43	
Övrigt					
Lagerenhet	Rostfritt stål	20	1	40,92	(Laakerinetti, u.d.)
M8 bult		8x20	18	9,00	(IKH, u.d.)
M8 mutter			18	3,60	"
M20 mutter			2	4,90	"
				58,42	
Totalt:				381,85	

Man kan konstatera att materialkostnaderna är låga. Delarna är inte alltid exakt som i ritningen eftersom sidan inte hade allting exakt. Det ger ändå en bra indikation på hur dyrt materialet är. Materialet är mindre än hälften av ett färdigt vindkraftverks kostnader. Under själva monteringen av delarna tillkommer inte mycket kostnader. Det är främst aluminiumlim och målarfärg.

Elektroniken kan variera mycket och det kan faktiskt vara svår att hitta lämpliga modeller. Det som observerades när jag letade efter priser var att det finns mycket olika modeller och billiga priser upp till ca. 800 W. Efter det blir det svårare att hitta delar och de stiger i pris. Det är helt i riktning med när jag letade efter priser på färdiga vindkraftverk. De steg i pris ungefär vid samma effekt. Generatorerna är kanske största variabeln. De var allt från 250 € till över 1000 €. Det spelade stor roll vilket varvtal och vilken typ av generator det var. De som går på låga varv var dyrare. Det är värt att överväga om någon form av växellåda kan bli billigare än en generator för låga varv.

Det finns två olika sätt att koppla efter generatoren. Det ska alltid finnas en laddningskontroller men de kan ha olika funktion baserat på generator och ändamål. Om man kopplar sig till elnätet finns det kontroller med integrerade elnätsinverter så de kan kopplas direkt från invertern till en elmätare och sedan till elnätet. Det är den billigare lösningen men det kan vara mindre lönsamt eftersom man inte kan lagra el.

Tabell 7. Kostnader för ett elsystem monterat till elnätet.

Elnät				
Del	Storlek	Antal (st)	Pris (€)	Källa
Generator	1500 W	1	270	(Alibaba, u.d.b)
Laddningskontroller	1500 W	1	290	(Alibaba, u.d.c)
Totalt:			560,00	

Vill man ha ett system som man kan ha helt bortkopplat från elnätet eller ett med batterier man kan lagra el med så är det såklart dyrare. Hyr mycket dyrare är det batteristorleken som bestämmer. I exemplet har jag totalt 470 Ah batteri. Batterier är i DC form och kräver en inverter för att man ska få användbar 230 V AC. Laddningskontroller kan vara billigare här. Inverterstorlek kommer att styra kostnader också. Det kommer att vara olika för varje installation. De siffror som finns här är endast riktgivande.

Tabell 8. Kostnader för ett elsystem som är bortkopplat från elnätet.

Självständigt				
Del	Storlek	Antal (st)	Pris (€)	Källa
Generator	1500 W	1	270	(Alibaba, u.d.b)
Laddningskontroller	1500 W	1	100	(Alibaba, u.d.d)
Inverter	3000 W	1	300	(ebay, u.d.b)
Batteri	235 Ah	2	600	(Motonet, u.d.)
Totalt:			1270,00	

De totala kostnaderna varierar enligt det ändamål man har. Väljer man en som endast kopplas till elnätet kan man klara sig med 940 € och en modell med batterier kan kosta ca. 1650 €, men en annan generator för ännu lägre varvtal kan kosta några hundra euro mer och andra storlekar på inverters kan öka kostnaderna något. Dessa priser innehåller inte

leveranskostnader på delarna och eventuella verktygs- eller monteringskostnader eller kostnader för eventuell svetsning. Det man tydligt kan se är att elektroniken står för största delen av kostnaderna och ett system med batterier är dyrare.

8.2 Verktyg

Vindkraftverket har designats så att det ska vara enkelt att tillverka och montera. Det ska inte krävas dyra verktyg, däremot kan kvaliteten bli bättre om man har dyrare verktyg. Själva monteringen sker med blocknycklar och insexnycklar, verktyg som de flesta redan har och som inte kostar mycket. Med en järnsåg och en plåtsax kan man såga eller klippa alla delar. För att få vingprofilen rekommenderas att man printar ut profilen så då ska man ha en printer. Hålen ska borraras med ganska stora borrar som de flesta kanske inte har, och så kräver det en bormaskin såklart. Småsaker som målarfärg och slippapper används utan extra verktyg. Det finns delar som ska svetsas så har man ingen svets kan man antingen köpa en eller föra bort delarna och ha någon annan att svetsa åt en.

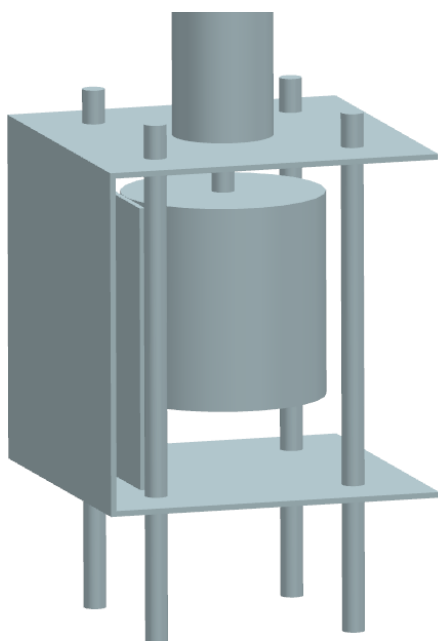
För en snabbare och enklare tillverkning med bättre resultat är en cirkelsåg med aluminiumklinga eller en såg enkom för metall bättre. En klinga kostar inte mycket så det kan man köpa men en hel såg är inte värt investeringen för ett vindkraftverk. En vinkelkap kan dock vara värt att köpa eftersom de inte kostar mycket. I en fabrik för ett företag vore en CNC-maskin perfekt för att tillverka delarna. En maskin kunde då tillverka alla delar och eftersom koordinater finns vore det enkelt att programmera.

De verktyg man använder och vilka delar man gör själv eller beställer från någon kommer att variera med vad man har för verktyg och vad man är beredd att köpa. Kostnaderna för verktyg kan egentligen inte endast läggas på vindkraftverket eftersom nyttan med dem inte slutar där. Man bör fundera vad man är beredd att satsa i verktyg och vad man vill föra någonstans för att tillverkas. I ett lite bättre utrustat garage kommer man inte behöva köpa något verktyg alls. Som jag visade i materialkostnaderna går det att köpa färdigt klippta delar så man inte behöver någon såg.

8.3 Montering

Monteringen kommer att vara ganska olika från ett ställe till ett annat ställe. Det kommer att bero på var exakt vindkraftverket monteras. Vindkraftverket är konstruerat så att det ska gå att montera på plats utan lyftkran eller liknande. Delarna kan transporteras skilt och sen fäster man dem där vindkraftverket ska vara med bultar. Enligt NX modelleringsprogrammet väger rotorn endast 19 kg. Efter att rotorn är monterad och fäst i tornet kan man lyfta det till vertikal riktning, eftersom tornet är fäst i ett gångjärn går det enkelt att fälla ner eller lyfta rotorn. Det kan kräva två personer för att lyfta det. Delarna går också att byta ut enkelt eftersom de är fästa med bultar.

Det finns flera olika sätt att fästa det till marken eller till byggnader. Finns det en byggnad som man fäster i kan man t.ex. fästa med stora träbultar som går genom stålplattor som ligger på ett tak. Ska det fästas i ett tak kan man bli tvungen att göra någon extra konstruktion för att få en stabil grund. Fäster man inte i en byggnad utan i stället t.ex. vid en strand kan man borra hål i en sten och gjuta fast gängstänger. I gängstängerna fästs tornets platta, genom att ha fyra olika gängstänger kan man justera tornet tills det är rakt. På liknande sätt kan man gjuta en grund var som helst som man fäster gängstänger i så man sedan kan justera tornet. En sista metod som kan vara värt att prova är att använda en skruppåle som man sedan fäster tornet i.



Figur 23. Exempel på hur generator monteringen kunde se ut.

Figur 23 visar förenklat hur generatoren placeras och hur det set ut med fyra gängstänger som kan gjudas fast. Genom att ha gångjärn på vänstra sidan mellan den vertikala och översta plattan kan man rotera hela konstruktionen när den ska monteras eller fälla ner rotorn om man ska ha gjort underhåll. Eftersom man har plattorna på muttrar kan man justera dem mycket exakt så att man får tornet att bli rakt. Laddningskontroller, inverter och batterier placeras skilt från rotorn. Kabeldragning är lätt eftersom generatoren placeras nära marken. Enda kablarna som krävs är från generatoren till laddningskontrollern.

Monteringen i sig kommer inte direkt att kosta något. Det tar däremot tid och hur länge det tar beror på var man monterar hur mycket extra man ska göra. Det är kostnader som man inte direkt betalar eftersom man gör det själv men om man tillverkade och sålde vindkraftverket skulle det kosta. För att få en uppfattning om vad tiden är värd uppskattades tiden det tar att montera ihop alla delar. Det tar ungefär 8 h att montera och måla de olika delarna man köpt. Med en timlön på 15 € är det värt ca. 120 €. Andra kostnader som också kommer med i monteringen är t.ex. målarfärg, lim, svetstråd och eventuellt betong. Sen finns det såklart kostnader som att köra efter olika delar till butiker och elkostnader och liknande som är så varierande och svårt att räkna att det utelämnas här. Skulle man försöka uppskatta exakt kostnader i en fabrik är det dock nödvändigt. Totala kostnader för montering uppskattas till 150 €.

8.4 Återbetalning

Det finns mycket faktorer att ta i beaktande för att räkna inbesparingar och återbetalning för ett vindkraftverk. Jag kommer att presentera en förenklad inbesparingskalkyl med nuvarande elpriser och medelvindhastigheter för Finland och en med en uppskattad kapacitetsfaktor.

8.4.1 Medelvindhastighet

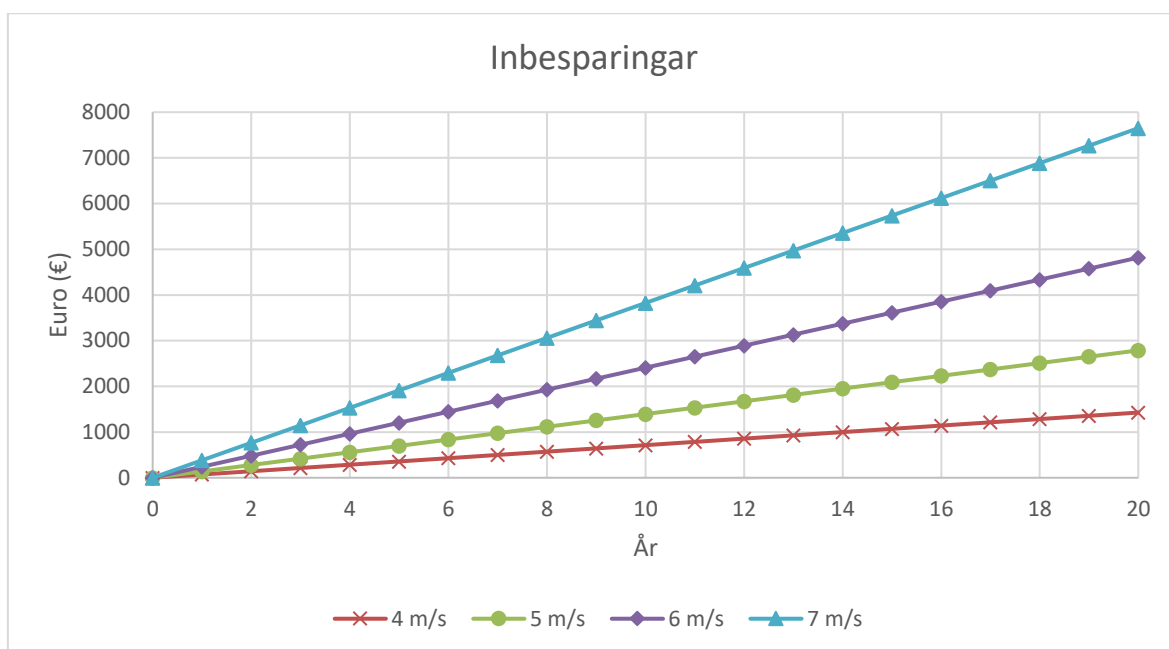
Det finns dock ett problem med medelvindhastigheter. Ett vindkraftverk genererar ingen elektricitet i svag vind och i hög vind genererar den inte till sin fulla potential. Vindkraftverket genererar maxeffekt vid 12 m/s och om vinden är 20 m/s drar det upp medeltalet för vinden men produktionen blir inte större. Samma problem finns om vinden är lägre än medeltalet. Den kommer att minska på medeltalet för vinden men det minskar inte lika mycket på förlusterna för vindkraftverket eftersom produktionen inte är linjär med

vindstyrkan. Med andra ord om vindhastigheten avviker med 3 m/s under medeltalet går mindre förlorat än det man vinner på att vindhastigheten avviker med 3 m/s över medeltalet. Om medelvindhastigheten är 6 m/s under ett år kommer alltså inte ett vindkraftverk att producera den effekt det får vid 6 m/s under 8760 timmar som finns på ett år.

Enligt Meteorologiska institutet är vindarna i Finland på en jämn nivå och stormdagar är få. Därför kan man räkna med att man får en ganska stor procent av medelvindhastigheten. Medelvindhastigheterna i Finland varierar så att det är lägre in i landet och högre vid kusten. Man kan räkna med att medelhastigheten är mellan 4 m/s och 7 m/s. (Ilmatieteenlaitos, u.d.).

I figur 24 räknade jag hur mycket elektriciteten som vindkraftverket producerar vid olika vindstyrkor kostar under ett år. Det gjordes genom att räkna hur mycket elektricitet rotorn producerar, det multiplicerades med 8760 timmar under ett år för att få ett års produktion. Sen multiplicerades det med ett elpris på 0,14 € per kWh. Det resultat jag fick då var vad man betalar för den elektriciteten från elbolaget.

De olika linjerna representerar olika medelvindhastigheter. Man kan se att skillnaden i bara en m/s blir stor under en 20 års period som man kan räkna att ett vindkraftverk håller i. Under ideala förhållanden om man bor vid kusten och har rotorn på ett ställe med mycket vind kan det bli mycket lönsamt. 380 € per år i inbesparingar gör att man redan efter 4 år har nått 1500 €, vilket kan räcka till ett system med batterier. Under en 20 års period med nuvarande elpriser kan det bli ca. 7600 €. Stiger elpriserna ännu mer vilket det finns möjligheter för kommer man spara in ännu mer. Betalar man över 1000 € för ett vindkraftverk vill man gärna ha minst 5 m/s eller mer i medelvindhastighet. Då kan man räkna med en 8–10 års återbetalningstid.



Figur 24. Återbetalningstid enligt medelvindhastigheter.

Detta förutsätter att man tar vara på all el man producerar. Om man säljer överloppselen i stället kommer det ta längre. Eftersom man köper el med överföringsavgifter och skatter och säljer till elbolag utan överföringsavgifter och man betalar skatt på det förlorar man mer på det än att ladda batterier. Man betalar inte skatter på den el man själv förbrukar och lagrar. Eftersom man sparar så mycket pengar under en lång tidsperiod rekommenderas batterier till ett ställe med mycket vind.

8.4.2 Kapacitetsfaktor

Det finns ett annat sätt att uppskatta elproduktion. Genom att räkna med en kapacitetsfaktor och den årliga ideala produktionen kan man få veta ungefär hur mycket det kan produceras. Kapacitetsfaktor visar hur mycket procent som produceras i verkligheten jämfört med vad som skulle produceras om vindkraftverket skulle produceras på full effekt i ett helt år.

Vindkraftverket har en effekt på 1500 W vid 12 m/s. Om det producerade vid den vindstyrkan hela året skulle den ge 13140 kWh. Genom att multiplicera det med kapacitetsfaktorn kan man uppskatta den verkliga produktionen. Den faktorn varierar från ett ställe till ett annat och går inte att säga exakt utan att mäta under ett år. Men genom att titta på liknande vindkraftverk kan man få en indikation på vad den är.

Enligt företaget Luvsida producerade en av deras vindkraftverk på 1500 W en faktor på 20 % (Luvsida, 2020d). Det är ett liknande vindkraftverk som det jag konstruerat. Jag räknade med en 15 % faktor för mitt vindkraftverk för att säkert inte vara orealistisk. Med kapacitetsfaktorn 0,15 och 13140 kWh under ett år blir den verkliga produktionen 1971 kWh. Med samma elpris är den elektriciteten värd 275 €. Det är ungefär 6,5 m/s om man räknar enligt medelvindhastigheten. Jag kan då konstatera att metoden för att räkna inbesparingarna är tillförlitlig men den förutsätter ett bra placerat vindkraftverk med lite störningar.

8.4.3 Slutliga kostnader och inkomster

I tabell 9 presenteras de slutliga kostnaderna för de olika versionerna. Det man kan se är att skillnaden på ett system med batterier är ganska stor. Det kräver ganska stora batterier och de jag har med i exemplet gör att det blir nästan 700 € dyrare. Under en 20 års period skulle man tjäna in nästan 1100 € mer med batterier, vilket är 20% mer än ett utan batterier. Det skulle man göra eftersom man inte säljer el utan använder allt. Eftersom el är dyrare när man köper än säljer är det bättre att ha batterier under en längre tid. I exemplet köper man el för 0,14 €/kWh och säljer för 0,06 €/kWh och med elnäts versionen säljer man 30 % av elen och använder 70 %.

Tabell 9. Kostnader och inkomster.

Typ	Kostnader (€)	Värde på 20 år (€)	Återbetalningstid i år med 6,5 m/s
Elnät	970	5165	3
Fristående	1680	6234	5–6
Med arbetstid			
Elnät	1090	5165	3–4
Fristående	1800	6234	6

Som man också kan se så spelar det inte så stor roll om man räknar med arbetskostnader eller inte. De kostnaderna är relativt låga eftersom mycket färdiga delar används så det tar inte så lång tid att montera ihop. Materialkostnaderna blev i stället lite dyrare. Ser man långsiktigt är ett kraftverk som laddar batterier mer lönsamt även om det är dyrare att bygga. Återbetalningstiden är endast 2–3 år längre. I exemplet har jag räknat med en medelvindhastighet på 6,5 m/s och en ökning i den hastigheten gör återbetalningstiden snabbare och en minskning gör den långsammare.

9 Slutsatser

Jag kan konstatera att det är möjligt att tillverka ett vertikalt vindkraftverk med lite verktyg och till en låg kostnad. Designen är anpassad så att man ska kunna använda material som är lätt tillgängliga och produktionsmetoder som är enkla. Det kan bli mer lönsamt att tillverka eget än att köpa ett färdigt om man inte behöver köpa mycket verktyg. Genom att köpa färdigt klippta delar kunde man minimera de verktyg och den tid som krävs. Materialkostnader uppgick till 380 € i färdiga storlekar och elsystem 560 € som minst. Elsystemet står för en majoritet av ett vindkraftverks kostnader och därför blir vindkraftverkets slutliga kostnader väldigt varierande beroende på de önskemål man har med elsystemet. De kraftverk som finns på marknaden är dyrare även om de var mindre och inte hade med alla nödvändiga delar.

Återbetalningstiden för ett eget producerat vindkraftverk uppgick till 3–8 år beroende på de kostnader man hade för systemet och den medelvindhastighet man har. För att få bättre lönsamhet bör man spara all elektricitet man får i stället för att sälja den till elnätet på grund av att de höga skatterna och överföringsavgifterna gör att man betalar mer för det man köper än det man säljer. Det blev klart att ett elsystem med batterier är mer lönsamt än att sälja överlops el under hela kraftverkets livstid även om det är dyrare att bygga.

9.1 Problem

Verkningsgraden är endast teoretisk, för att få verklig effekt bör man mäta den i verkligheten. När man mäter verkningsgraden i verkligheten får man med alla faktorer som påverkar verkningsgraden. Det som inte räknas med teoretiskt är förluster i generator, elsystem och inverters. Den verkliga verkningsgraden kommer också att påverkas av de komponenter man köper så effekterna som uppskattades är inte garanterade. Återbetalningstiden har räknats med ett konstant elpris och ändringar i elpriset kan göra att återbetalningstiden blir snabbare eller långsammare.

9.2 Vidareutveckling

Eftersom jag inte gjorde en detaljerad ritning av alla delar kunde det göras i framtiden. Flera olika monteringsmetoder kunde designas för olika ställen. Man kunde göra detaljerade ritningar på grunden. Jag föreslår en metod för att fästa på marken och en för att fästa på tak.

Ett kopplingschema för elsystemet och mer undersökningar över de olika komponenter som finns. Elsystemets placering och om det skulle se olika ut enligt monteringsställe kunde undersökas. En mer noggrann planering och efterforskning av de produkter som finns kunde också ge en mer exakt kostnads kalkyl. Man kunde också se på hur vindkraftverket skulle fungera tillsammans med solpaneler och om det skulle kunna tillsammans bidra till att få en snabbare återbetalningstid.

9.3 Kommentarer

Examensarbetet var väldigt intressant och utmanande. Det svåraste med att utveckla någonting själv är att det kräver att man sätter sig in i olika områden som man kanske inte vet mycket om. Internet var en viktig resurs under arbetet och vindkraftverket kunde inte ha designats utan hjälp från internet. Att man inte visste allting från starten ledde till att jag gjorde ändringar på designen under hela arbetet när jag kom på bättre sätt att göra saker. 3D-modelleringsprogrammet var mycket bra för att göra ändringar när jag kunde gå och ändra på något mått väldigt snabbt. Speciellt navet gjorde jag mycket ändringar på, så att det blev enklare och billigare. Eftersom jag kunde göra mer förbättringar under arbetets gång bör man ställa frågan hur mycket mer optimeringar och ändringar man kunde göra ännu om man hade mer tid och lärde sig mer. Jag tror att det finns rum för förbättringar med designen men är ändå nöjd med vad som skapats och är säker på att det ska fungera i verkligheten också.

10 Referenser

- Aeolos. (den 25 4 2021). *windturbinestar*. Hämtat från windturbinestar.com:
<https://www.windturbinestar.com/1kwv-v-aeolos-wind-turbine.html> den 25 4 2021
- Airfoil Tools*. (u.d.b). Hämtat från airfoiltools.com:
<http://airfoiltools.com/airfoil/details?airfoil=naca0021-il>
- Airfoil Tools*. (u.d.a). Hämtat från airfoiltools.com:
<http://airfoiltools.com/plotter/index>
- Alibaba. (u.d.a). *alibaba*. Hämtat från alibaba.com:
https://www.alibaba.com/product-detail/Vertical-Axis-Wind-Turbine-Price-VAWT_1600219679575.html?spm=a2700.7724857.normal_offer.d_image.4a1650b6aGFjO9&s=p den 25 4 2021
- Alibaba. (u.d.b). *alibaba*. Hämtat från alibaba.com:
https://www.alibaba.com/product-detail/Hot-sale-Low-RPM-high-efficiency_60440511522.html?spm=a2700.7724857.normal_offer.d_image.546025b4xCjrgr den 5 5 2021
- Alibaba. (u.d.c). *alibaba*. Hämtat från alibaba.com:
https://www.alibaba.com/product-detail/Mars-Rock-2000W-48V-240V-MPPT_1600089604528.html?spm=a2700.details.0.0.68642311psqqEH den 5 5 2021
- Alibaba. (u.d.d). *alibaba*. Hämtat från alibaba.com:
https://www.alibaba.com/product-detail/For-1000-2000W-48V-Wind-Turbine_60841772756.html?spm=a2700.details.0.0.5b054efavDfCzg den 5 5 2021
- Allen, B. (Red.). (den 7 8 2017). *Nasa*. Hämtat från nasa.gov:
<https://www.nasa.gov/image-feature/langley/100/naca-airfoils>
- Alternative Energy Tutorials. (u.d.a). *Alternative Energy Tutorials*. Hämtat från alternative-energi-tutorials: <https://www.alternative-energy-tutorials.com/wind-energy/wind-turbine-generator.html> den 14 4 2021
- Alternative Energy Tutorials. (u.d.b). *Alternative Energy Tutorials*. Hämtat från alternative-energi-tutorials: <https://www.alternative-energy-tutorials.com/wind-energy/pmdc-generator.html> den 14 4 2021
- amazon. (u.d.a). *amazon*. Hämtat från amazon.com:
https://www.amazon.com/MarsRock-Hybrid-Controller-Booster-Function/dp/B075C9LZZP/ref=pd_lpo_86_img_0/188-1397451-2864920?encoding=UTF8&pd_rd_i=B075C9LZZP&pd_rd_r=6e270b3b-b312-4572-803e-33c380bd0fae&pd_rd_w=tsyPP&pd_rd_wg=PyIq9&pf_rd_p=a0d6e967-6561-454c den 4 5 2021
- amazon. (u.d.b). *amazon*. Hämtat från amazon.com:
<https://www.amazon.com/Bicaquu-Solar-Hybrid-Charge-Controller/dp/B088B52FZY> den 4 5 2021

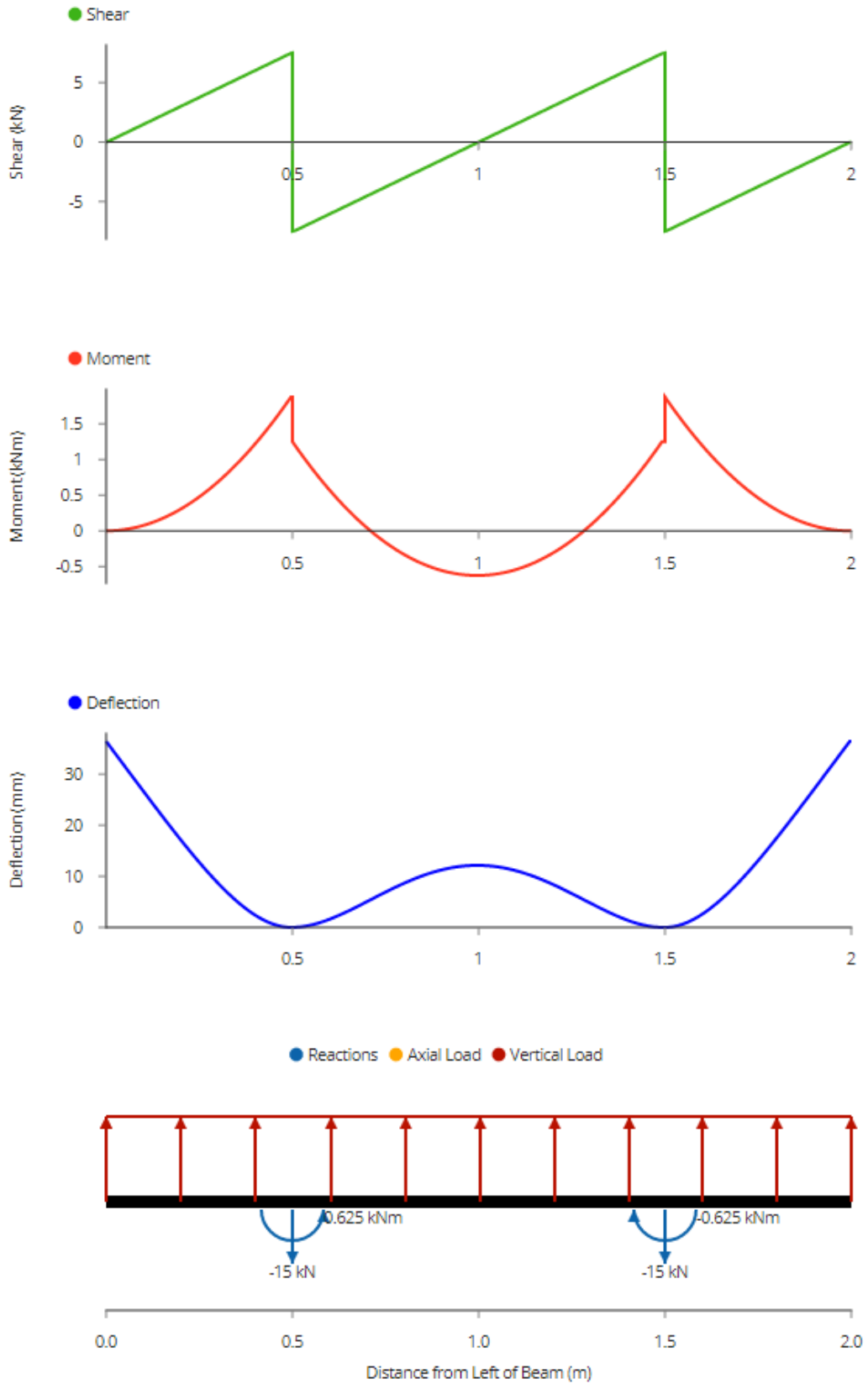
- amazon. (u.d.c). *amazon*. Hämtat från amazon.com: <https://www.amazon.com/AIMS-Power-PICOGF30W24V120VR-Frequency-Protected/dp/B00NLLSGMY> den 4 5 2021
- azo materials*. (den 17 5 2005). Hämtat från azom.com: <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=2863> den 6 4 2021
- Bolt Depot. (den 6 4 2021). *Bolt Depot*. Hämtat från boltdepot.com: <https://www.boltdepot.com/fastener-information/materials-and-grades/bolt-grade-chart.aspx>
- Brusca, S., Lanzafame, R., & Messina, M. (2014). Design of a vertical-axis wind turbine: how the aspect ratio affects the turbine's performance. *Int J Energy Environ Eng*, 5, 333-340. doi:<https://doi.org/10.1007/s40095-014-0129-x>
- Bruschi, G., Nishioka, T., Tsang, K., & Wang, R. (2003). *DRAG COEFFICIENT OF A CYLINDER*. Hämtat från https://sv.20file.org/up1/916_0.pdf
- Castellani, F., Astolfi, D., Peppoloni, M., Francesco, N., Daniele, B., & Alexander, H. (5 2019). Experimental Vibration Analysis of a Small Scale Vertical Wind Energy System for Residential Use. *Machines*, 7, 35. doi:10.3390/machines7020035
- Castillo, J. (2011). *SMALL-SCALE VERTICAL AXIS WIND TURBINE DESIGN*. Tampereen ammattikorkeakoulu, Degree program in Aeronautical Engineering. Tammerfors: Tampereen ammattikorkeakoulu. Hämtat från <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/19136/memoria.pdf>
- Chi-Cong, N., Tran, T. P.-T., & Thi-Hong-Hieu, L. (2015). A Numerical Study of Thickness Effect of the Symmetric NACA 4-Digit Airfoils on Self Starting Capability of a 1kW H-Type Vertical Axis Wind Turbine. *International Journal of Mechanical Engineering and Applications*, 3, 7-16. doi:10.11648/j.ijmea.s.2015030301.12
- Civilseek*. (2021). Hämtat från civilseek.com: <https://civilseek.com/properties-of-wood-timber/>
- Clearcalcs. (2021). *Clearcalcs*. Hämtat från clearcalcs.com: <https://clearcalcs.com/freetools/beam-analysis/au>
- ComplianceBridge. (den 29 4 2020). *ComplianceBridge*. Hämtat från compliancebridge.com: <https://compliancebridge.com/preliminary-risk-analysis/> den 25 4 2021
- Crucial Engineering. (u.d.). *Crucial Engineering*. Hämtat från crucialengineering.com: <https://crucialengineering.co.uk/aluminium-fabrication-advantage-and-disadvantage/> den 06 04 2021
- Das, A., & Talapatra, P. (6 2016). Modelling and Analysis of a Mini Vertical Axis Wind Turbine. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, 9001. Hämtat från https://www.researchgate.net/figure/Definition-of-forces-and-the-angles-that-are-acting-on-blade-VAWT-faces-considerable_fig2_313893605 den 5 4 2021

- Duchesne, D. (den 10 7 2019). *Wileymetal*. Hämtat från wileymetal.com:
<https://www.wileymetal.com/adhesive-bonding-or-welding-the-answer-may-surprise-you/> den 25 4 2021
- ebay. (u.d.a). *ebay*. Hämtat från ebay.com: <https://www.ebay.com/itm/Wind-turbine-windmill-400W-600W-800W-vertical-axis-generator-12v-24v-48v-MPPT/174692328441?hash=item28ac7963f9:g:gucAAOSwNjhgVFj7&var=473881569902> den 25 4 2021
- ebay. (u.d.b). *ebay*. Hämtat från ebay.com: https://www.ebay.co.uk/itm/Pure-Sine-Wave-Power-Inverter-Power-Inverter-3000W-Nominal-24V-DC-Charger-LCD/264698399827?_trkparms=aid%3D1110006%26algo%3DHOMESPLICE.SIM%26ao%3D1%26asc%3D20201210111314%26meid%3D7c921579bf7d41b38d1bcea5004af556%26pid%3D101195%26 den 5 5 2021
- Energiavirasto. (u.d.). *energiavirasto*. Hämtat från energiavirasto.fi:
<https://energiavirasto.fi/sahkon-hintatilastot> den 25 4 2021
- EurocodeApplied.com. (u.d.). *EurocodeApplied.com*. Hämtat från eurocodeapplied.com: <https://eurocodeapplied.com/design/en1993/steel-design-properties>
- Hall, N. (den 5 5 2015). *NASA*. Hämtat från grc.nasa.gov:
<https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/dynpress.html>
- IKH. (u.d.). *ikh*. Hämtat från ikh.fi: <https://www.ikh.fi/fi/kiinnitystarvikkeet--heloitus/pultit--mutterit-ja-aluslaatat> den 5 5 2021
- Ilmatieteentilaitos. (u.d.). *ilmatieteentilaitos*. Hämtat från en.ilmatieteentilaitos.fi:
<https://en.ilmatieteentilaitos.fi/climate-elements> den 20 4 2021
- Inverterbutikén. (2021). *Inverterbutikén*. Hämtat från inverterbutikén.se:
<https://www.inverterbutikén.se/inverterkunskap/>
- Kozak , P. (2014). *Effects of Unsteady Aerodynamics on Vertical-Axis Wind Turbine Performance*. Illinois Institute of Technology, Master of Science in Mechanical and Aerospace Engineering, Chicago. Hämtat från https://www.researchgate.net/publication/263161316_Effects_of_Unsteady_Aerodynamics_on_Vertical-Axis_Wind_Turbine_Performance
- Laakerinetti. (u.d.). *laakerinetti*. Hämtat från laakerinetti.com:
<https://www.laakerinetti.com/ucfc204rst-laippalaakeriysikko-pyorea-kokonaan-ruostumaton-ruuvilukitus-p-12843.html> den 5 5 2021
- Learn Engineering. (den 28 5 2016). *Youtube*. Hämtat från youtube.com:
<https://www.youtube.com/watch?v=w78JT6azrZU> den 7 4 2021
- Linqip. (den 22 10 2020). *Linqip Tech News*. Hämtat från linqip.com:
https://www.linqip.com/blog/what-is-wind-turbine/#Advantages_and_Disadvantages den 6 4 2021
- Loctite. (2021a). *Loctite*. Hämtat från loctiteproducts.com:
<https://www.loctiteproducts.com/en/know-how/fix-stuff/metal-glue.html> den 8 4 2021

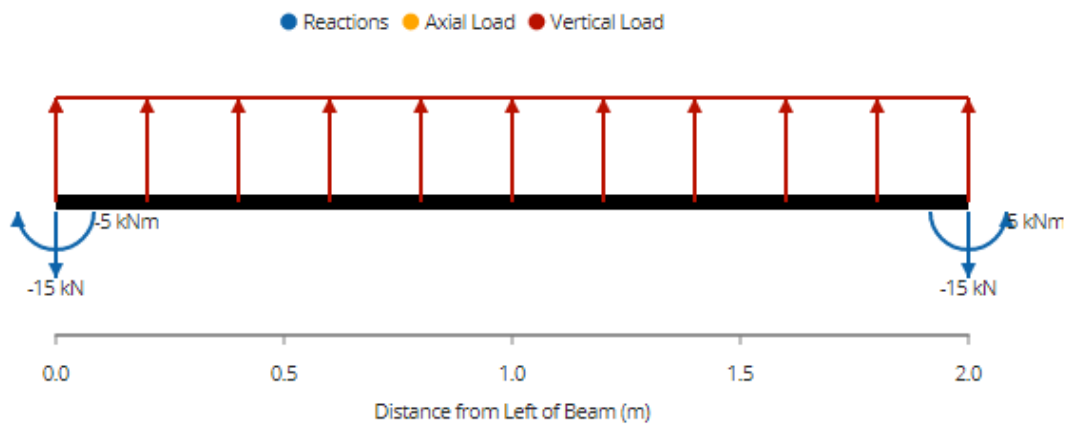
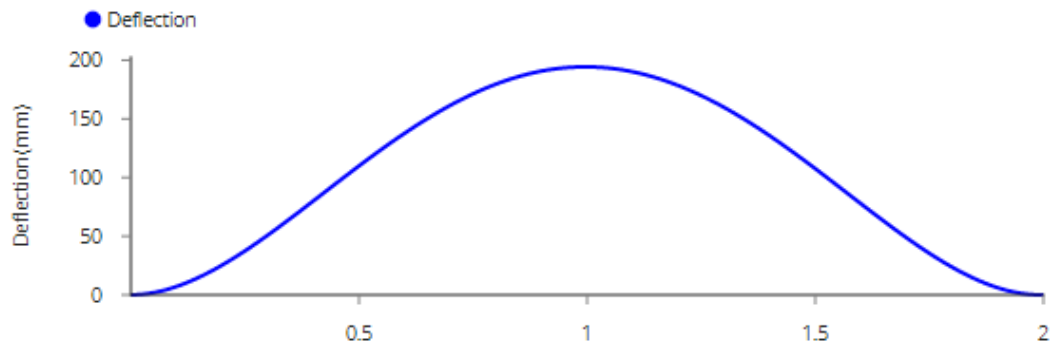
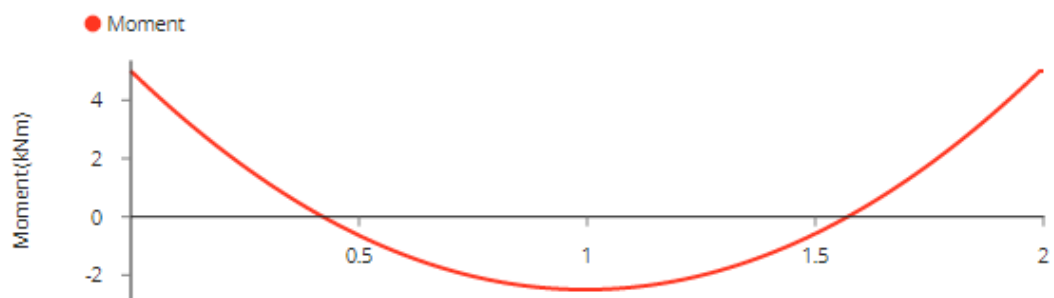
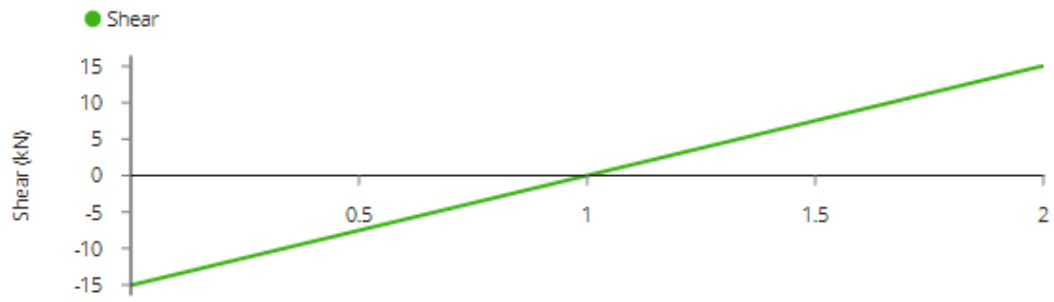
- Loctite. (2021b). *Loctite*. Hämtat från loctiteproducts.com:
https://www.loctiteproducts.com/en/products/build/epoxies/loctite_epoxy_weldbondingcompound.html den 8 4 2021
- Luvside. (den 31 3 2020a). *Luvside*. Hämtat från luvside.de:
<https://www.luvside.de/en/vawt-advantages/> den 6 4 2021
- Luvside. (den 31 3 2020b). *Luvside*. Hämtat från luvside.de:
<https://www.luvside.de/en/vawt-disadvantages/> den 6 4 2021
- Luvside. (den 31 3 2020c). *Luvside*. Hämtat från luvside.de:
<https://www.luvside.de/en/hawt-advantage-disadvantage/> den 6 4 2021
- Luvside. (den 1 4 2020d). *luvside*. Hämtat från luvside.de:
<https://www.luvside.de/en/capacity-factor-wind-turbine/> den 20 4 2021
- Made-in-China. (den 25 4 2021). *made-in-china*. Hämtat från qd-greef.en.made-in-china.com: <https://qd-greef.en.made-in-china.com/product/UKOmZRVdCEru/China-300W-to-5kw-Vertical-Axis-Wind-Turbine-for-Sale.html> den 25 4 2021
- Markanvändnings- och bygglag 126 §*. (den 21 12 2012). Hämtat från finlex.fi:
<https://www.finlex.fi/sv/laki/ajantasa/1999/19990132#L18P126> den 9 4 2021
- Missouri Wind and Solar. (den 22 3 2013). *Youtube*. Hämtat från youtube.com:
https://www.youtube.com/watch?v=2z_097mW0l0 den 13 4 2021
- Motonet. (u.d.). *motonet*. Hämtat från motonet.fi:
<https://www.motonet.fi/fi/tuote/909563/Exide-EE2353-235Ah1200A-akku-P518xL279xK240> den 5 5 2021
- Nixon, N. (den 17 10 2008). *The Guardian*. Hämtat från theguardian.com:
<https://www.theguardian.com/environment/2008/oct/17/wind-power-renewable-energy> den 6 4 2021
- Oulun Palametalli. (u.d.). *oulun palametalli*. Hämtat från kauppa.palametalli.fi:
https://kauppa.palametalli.fi/en_US/shop den 5 5 2021
- Paetzold, M. (den 14 4 2018). *AirfoilDeflectionLift*. Hämtat från commons.wikimedia.org:
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:AirfoilDeflectionLift_W3C.svg#/media/File:AirfoilDeflectionLift_W3C.svg den 13 5 2021
- PFH*. (u.d.). Hämtat från pfh-university.com: <https://www.pfh-university.com/blog/the-properties-of-glass-fibre.html>
- ProductPlan. (2021). *ProductPlan*. Hämtat från productplan.com:
<https://www.productplan.com/glossary/product-specs/> den 25 4 2021
- Ragheb, A. M., & Ragheb, M. (2011). *Fundamental and Advanced Topics in Wind Power*. (R. Carriveau, Red.) u.o: IntechOpen. doi:10.5772/21398
- Royal Academy of Engineering. (u.d.). *Wind Turbine Power Calculations*. Storbritannien: Royal Academy of Engineering.

- SAWT. (den 25 4 2021). *sawtenergy*. Hämtat från sawtenergy.com:
<https://www.sawtenergy.com/p1000.html> den 25 4 2021
- Schwartz, D. M. (den 2 9 2020). *offgridpermaculture*. Hämtat från
 offgridpermaculture.com:
https://offgridpermaculture.com/Off_Grid_Energy/Beginners_Guide_to_Wind_Turbine_Charge_Controllers.html den 13 4 2021
- Skatteförvaltningen. (den 22 10 2020). *Vero*. Hämtat från vero.fi:
https://www.vero.fi/sv/Detaljerade_skatteanvisningar/anvisningar/48484/inkomstbeskattning-av-elproduktion-i-hush%C3%A5ll/
- Statistikcentralen. (u.d.a). *Tilastokeskus*. Hämtat från pxnet2.stat.fi:
https://pxnet2.stat.fi/PXWeb/pxweb/sv/StatFin/StatFin_ene_ehi/statfin_ehi_pxt_12gx.px/?rxid=00fc46bf-2778-44e7-8b91-310b0f3ad776
- Statistikcentralen. (u.d.b). *Tilastokeskus*. Hämtat från pxnet2.stat.fi:
https://pxnet2.stat.fi/PXWeb/pxweb/sv/StatFin/StatFin_ene_ehk/statfin_ehk_pxt_004_sv.px/?rxid=00fc46bf-2778-44e7-8b91-310b0f3ad776
- Statistikcentralen. (u.d.c). *Tilastokeskus*. Hämtat från pxnet2.stat.fi:
https://pxnet2.stat.fi/PXWeb/pxweb/sv/StatFin/StatFin_ene_ehk/statfin_ehk_pxt_12st.px/?rxid=00fc46bf-2778-44e7-8b91-310b0f3ad776
- Structural*. (u.d.). Hämtat från structural.community:
<https://structural.community/articles/advantages-of-steel-construction/> den 06 04 2021
- SunSurf. (den 25 4 2021). *solarstore*. Hämtat från solarstore.co:
https://www.solarstore.co/Roof-Mount-3000w-3-kw-Vertical-Axis-Wind-Turbine-_p_13.html den 25 4 2021
- Suomen Tuulivoimayhdistys. (den 10 2 2020a). *Suomen Tuulivoimayhdistys*. Hämtat från tuulivoimayhdistys.fi:
https://tuulivoimayhdistys.fi/media/tuulivoima_vuositolastot_2020_eng-public-10.2.pdf
- Suomen Tuulivoimayhdistys. (u.d.b). *Suomen Tuulivoimayhdistys*. Hämtat från tuulivoimayhdistys.fi: <https://tuulivoimayhdistys.fi/en/wind-power-in-finland-2/wind-power-in-finland/how-much-wind-power-to-finland>
- Wahl, M. (2007). *Designing an H-rotor type Wind Turbine for Operation on Amundsen-Scott South Pole Station*. Uppsala Universitet, Uppsala. Hämtat från <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:461693/FULLTEXT01.pdf>
- windsolar-products. (den 25 4 2021). *windsolar-products*. Hämtat från windsolar-products.co.uk: https://www.windsolar-products.co.uk/products/vawt_ntdt.html den 25 4 2021
- Windspire. (den 25 4 2021). *windspireenergy*. Hämtat från windspireenergy.com:
<https://www.windspireenergy.com/2kW-wind-turbine.htm> den 25 4 2021
- Woodford, C. (den 17 8 2020). *EXPLAINTHATSTUFF!* Hämtat från explainthatstuff.com: <https://www.explainthatstuff.com/how-inverters-work.html> den 13 4 2021

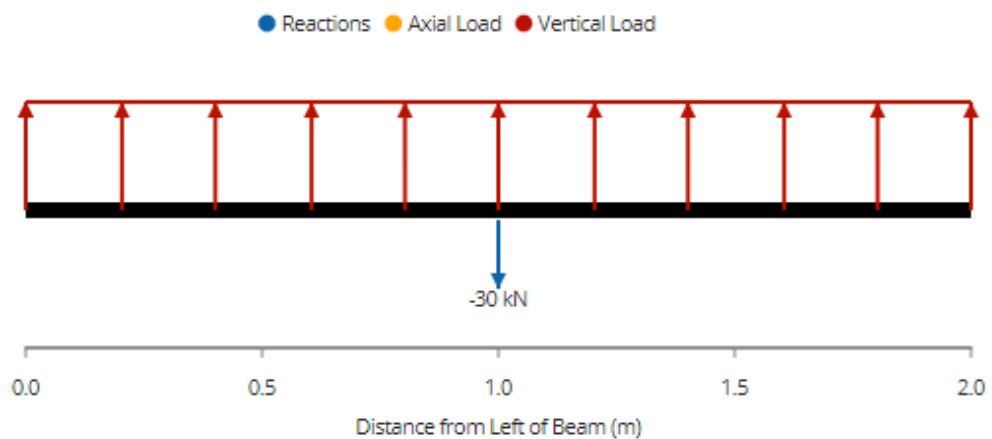
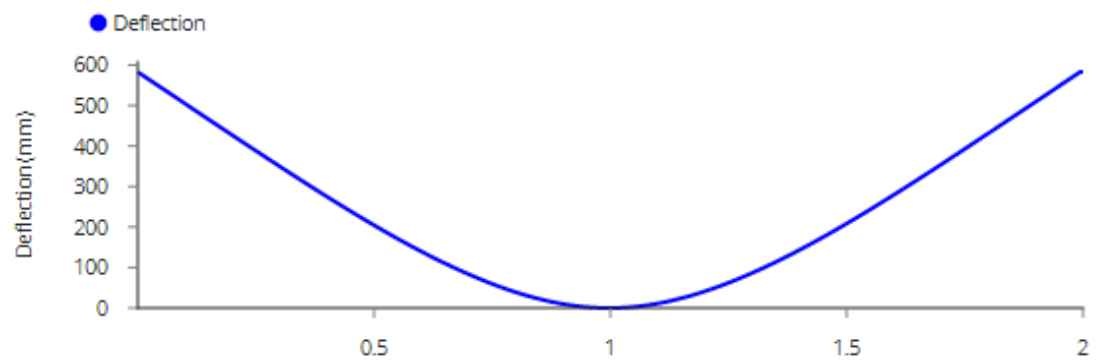
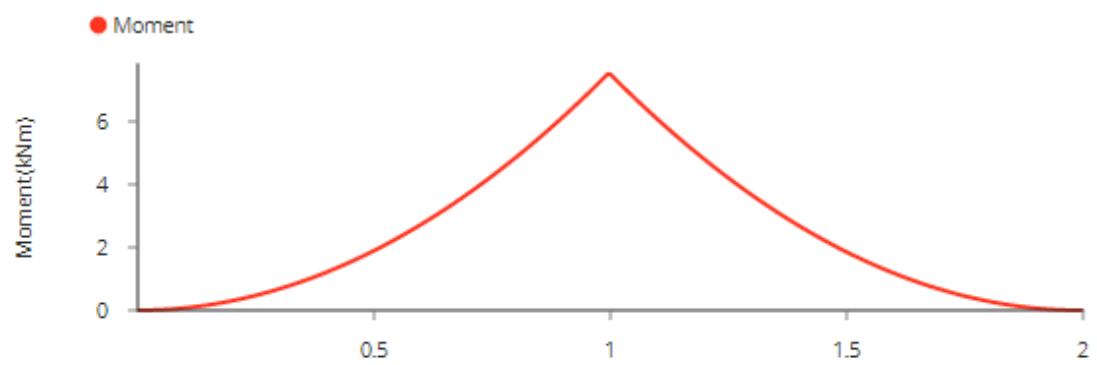
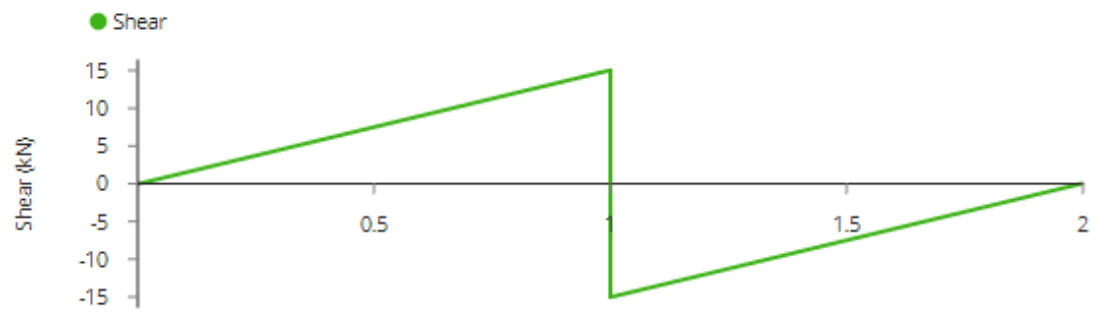
Fästpunkter vid 25 % och 75 % av bladets längd.



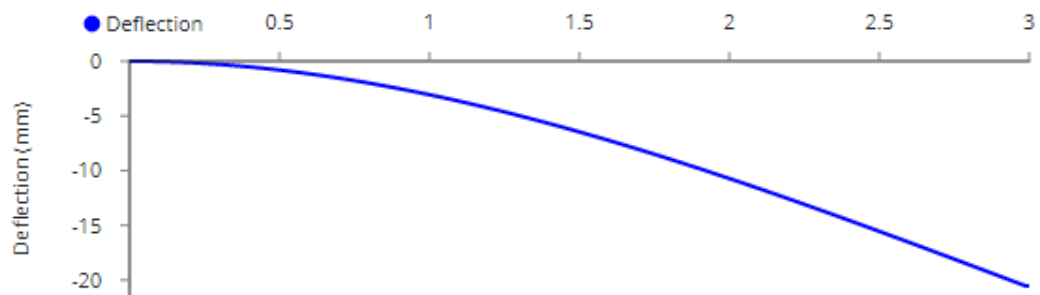
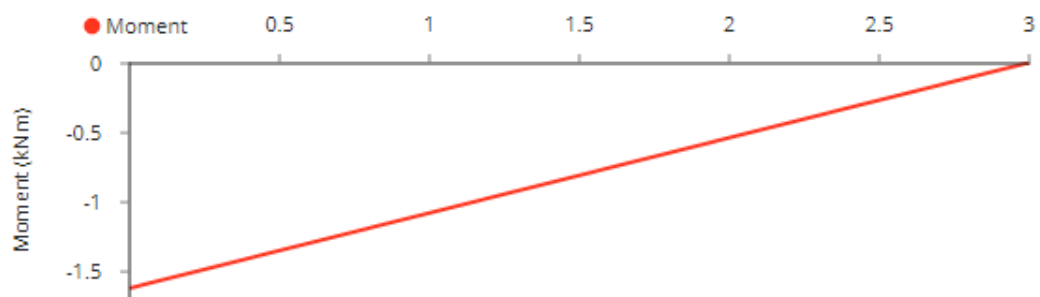
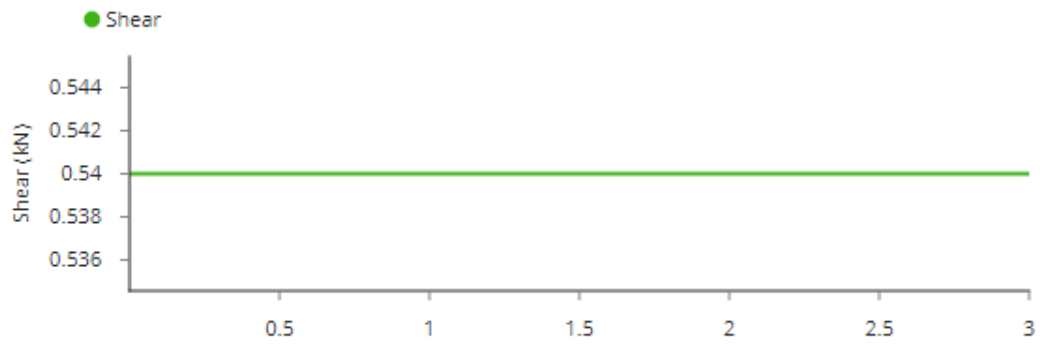
Fästpunkter vid 0 % och 100 % av bladets längd.



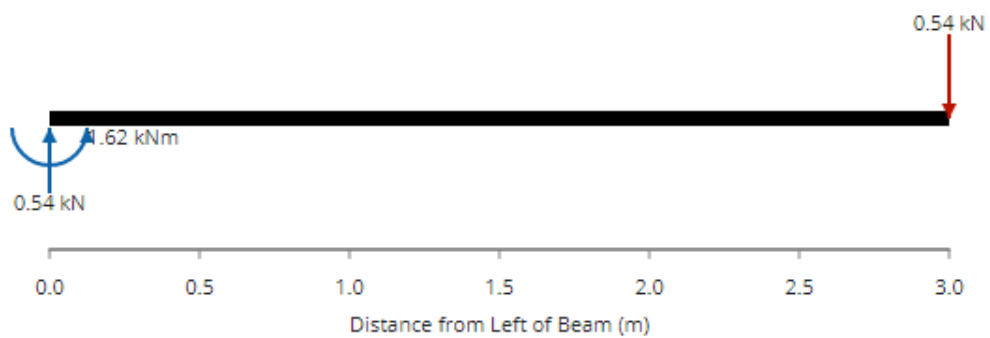
Fästpunkt vid 50 % av bladets längd.



Tornets böjning under last.

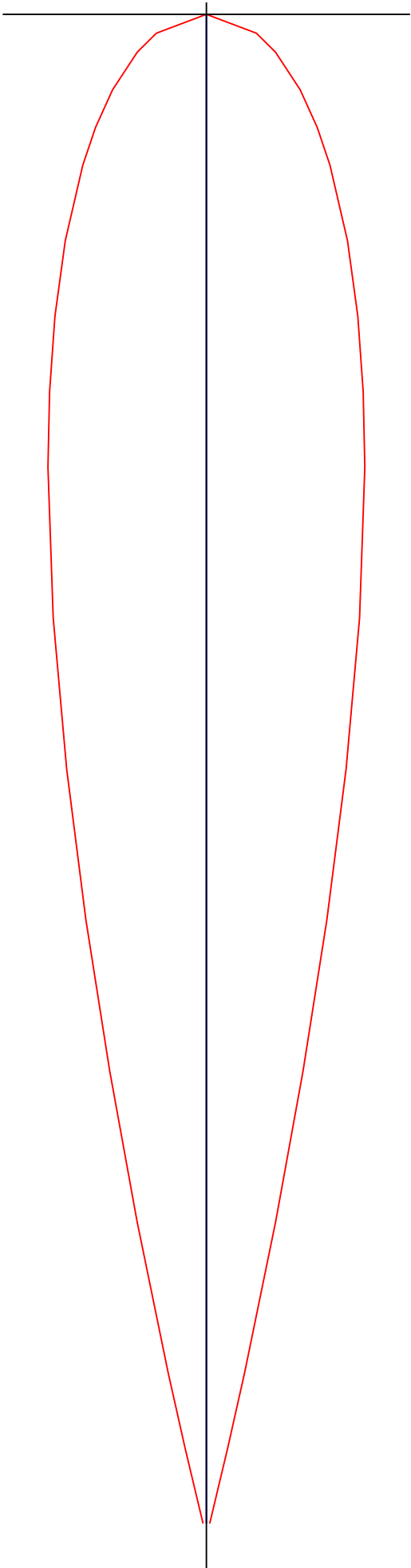


● Reactions ● Axial Load ● Vertical Load



NACA 0021 med 250 mm korda i skala 1:1.

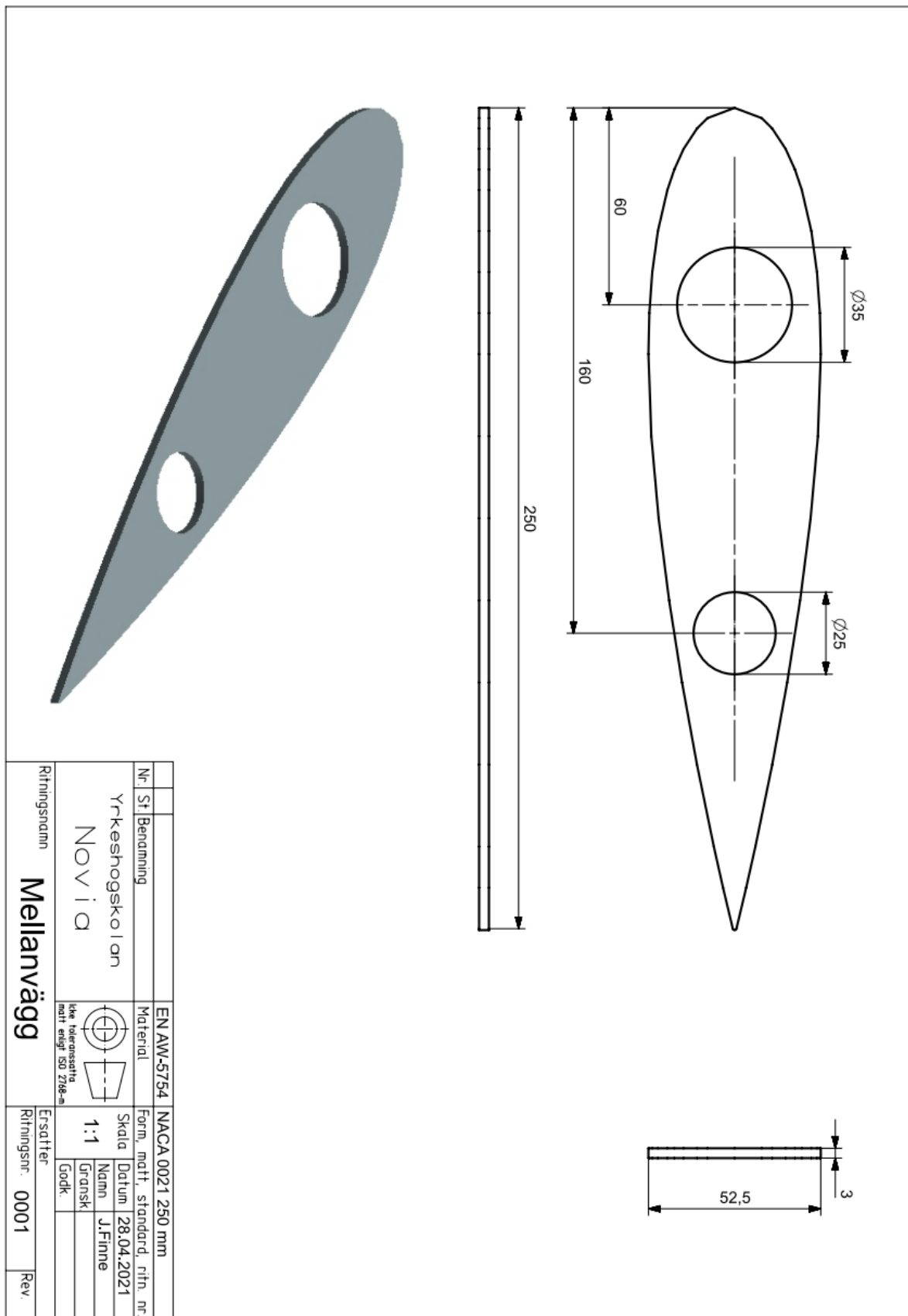
Bilaga 5



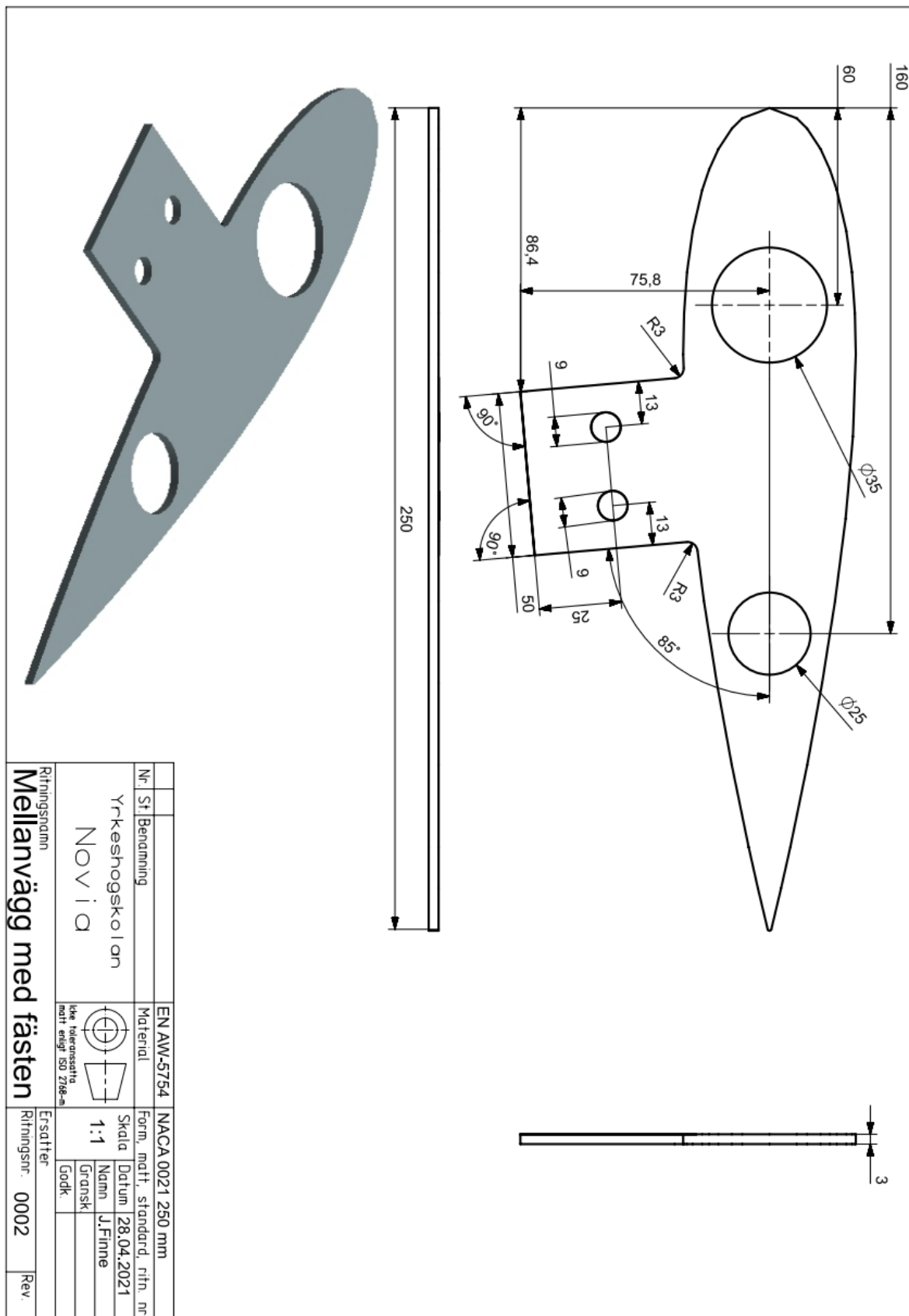
Koordinater för NACA 0021 med 250 mm korda.

x	y
250,000000	0,552500
237,500000	3,530000
225,000000	6,335000
200,000000	11,477500
175,000000	16,030000
150,000000	19,965000
125,000000	23,162500
100,000000	25,390000
75,000000	26,260000
62,500000	25,992500
50,000000	25,100000
37,500000	23,385000
25,000000	20,487500
18,750000	18,375000
12,500000	15,552500
6,250000	11,440000
3,125000	8,287500
0,000000	0,000000

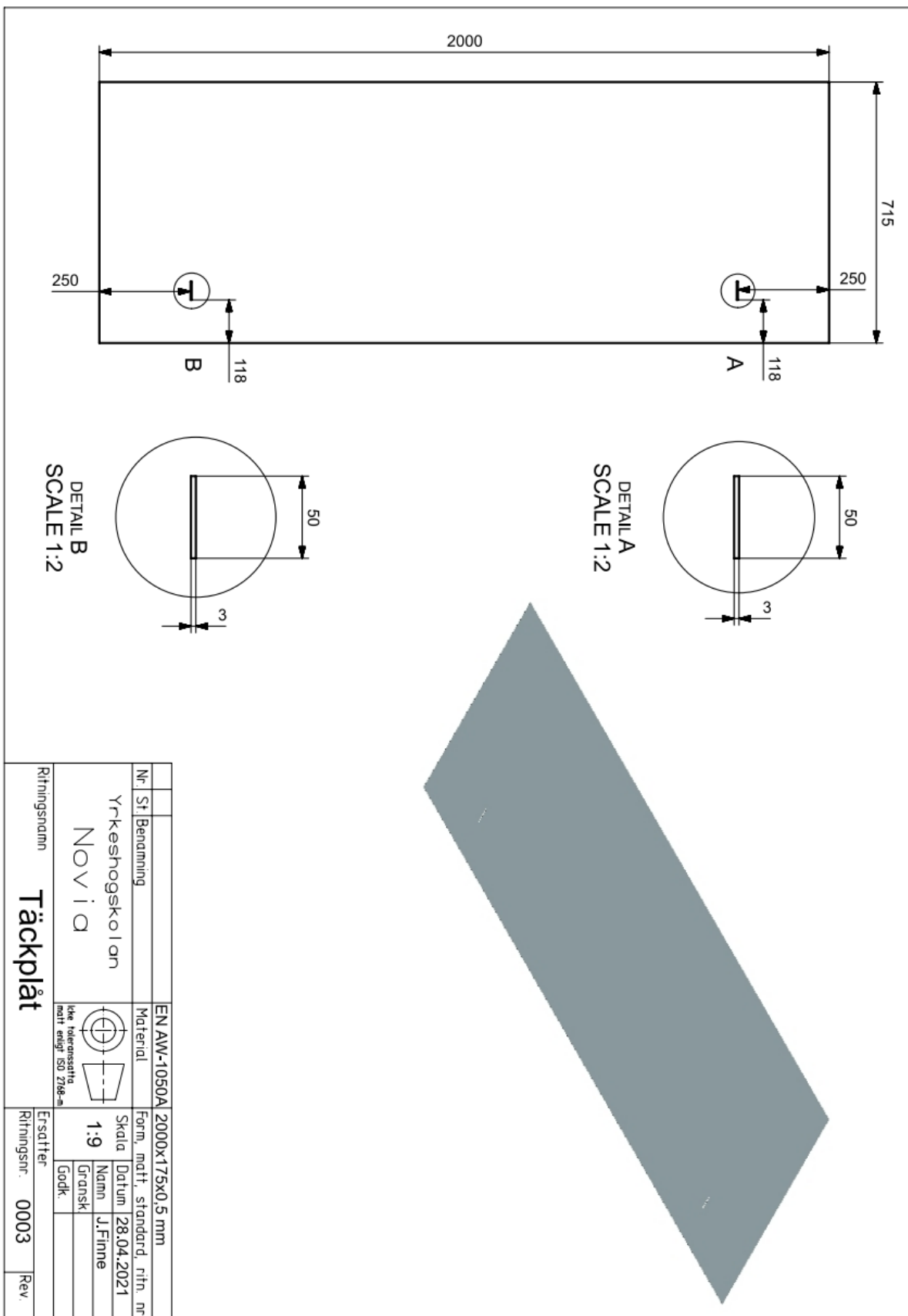
Detaljritning över mellanvägg i A3 storlek.



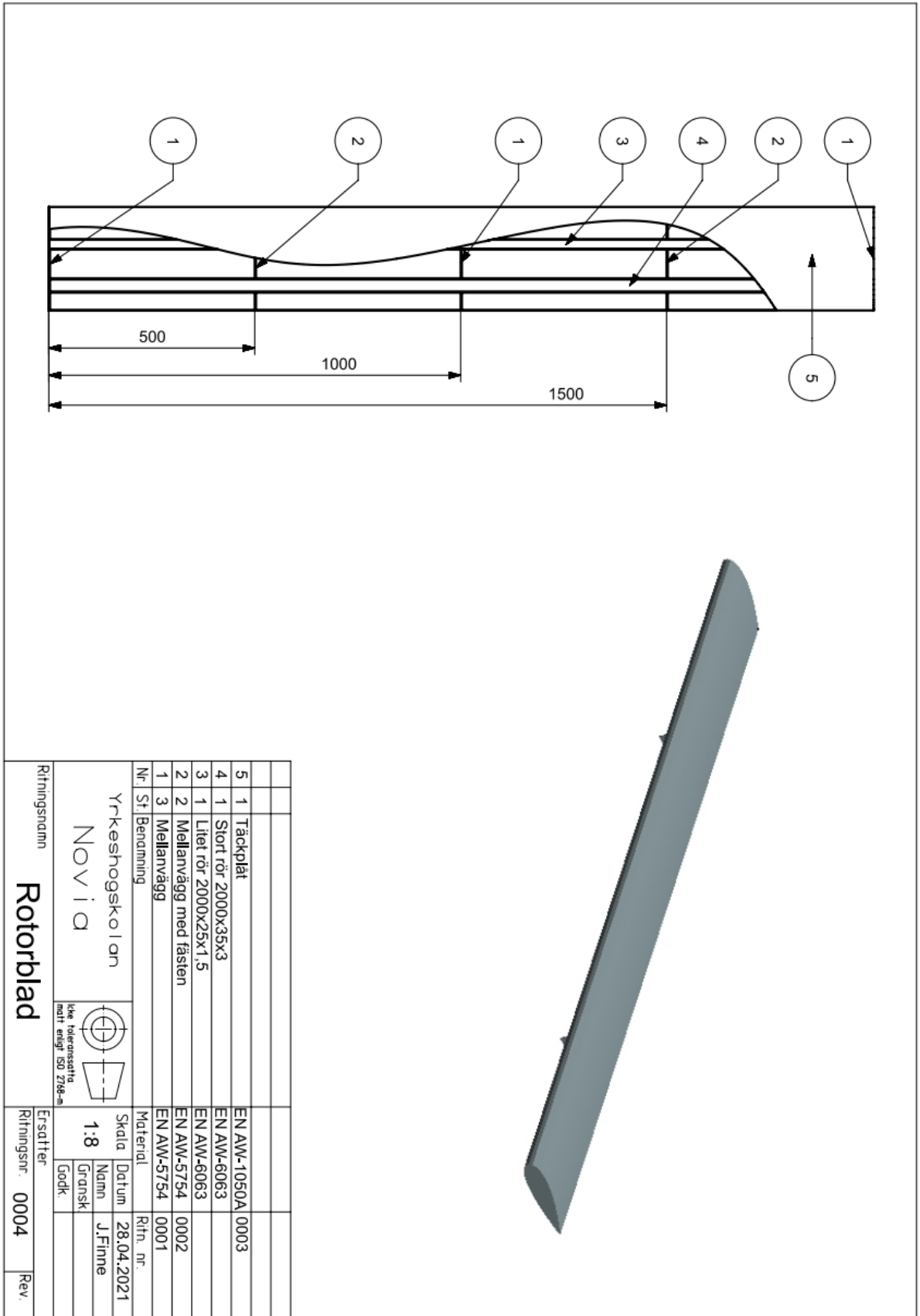
Detaljritning över mellanvägg med fästen i A3 storlek.



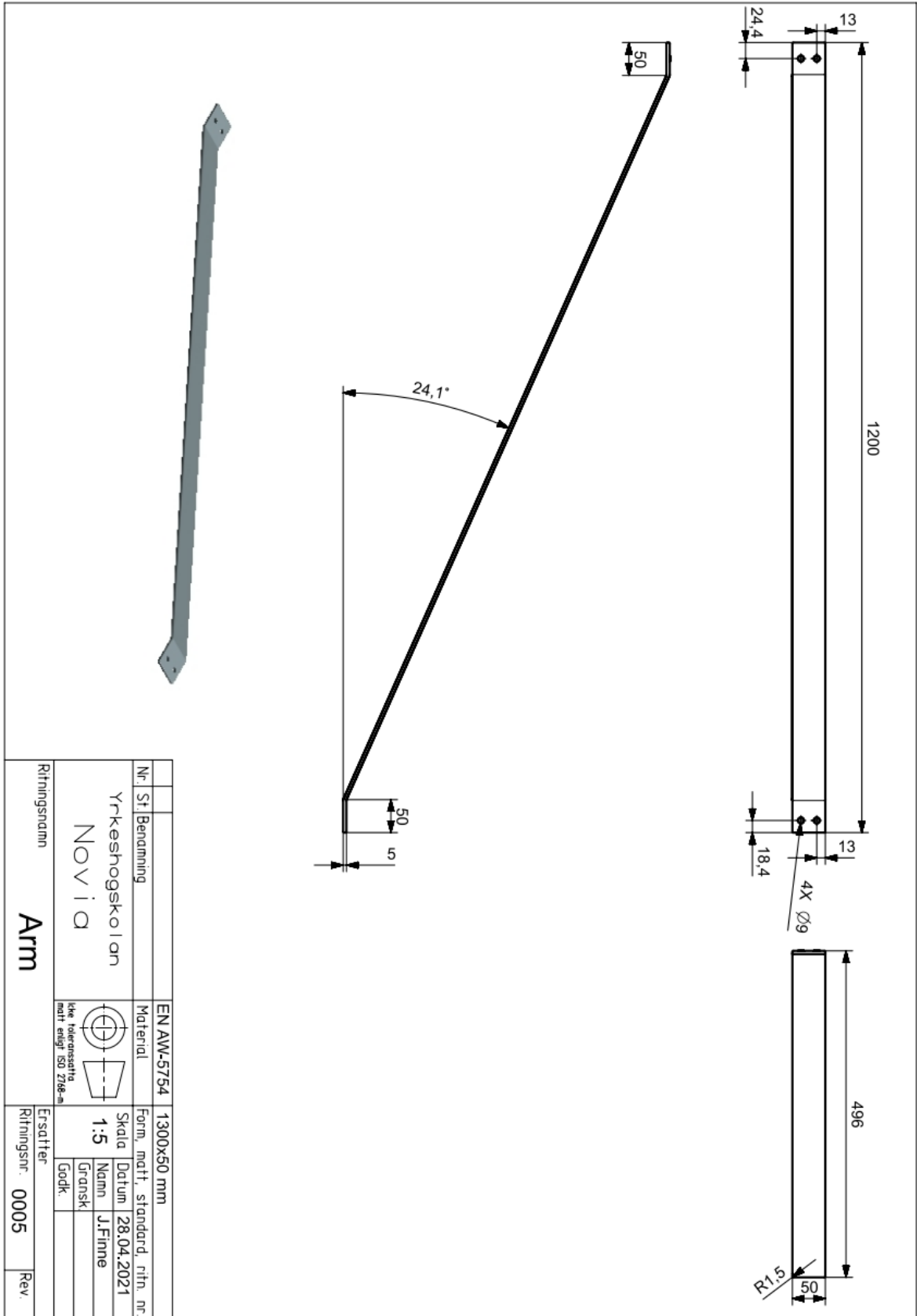
Detaljritning över täckplåt i A3 storlek.



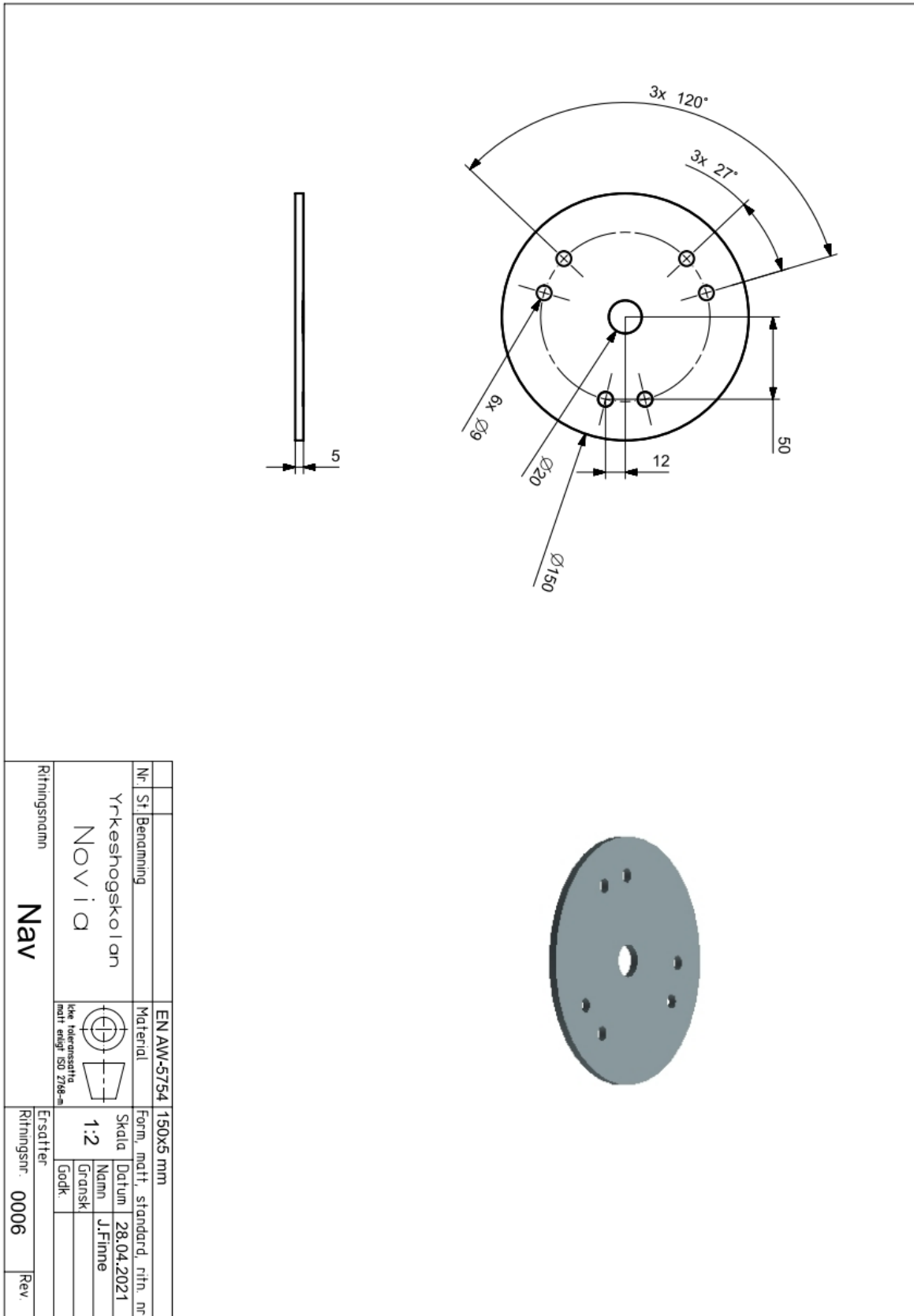
Sammanställningsritning över rotorblad i A3 storlek.



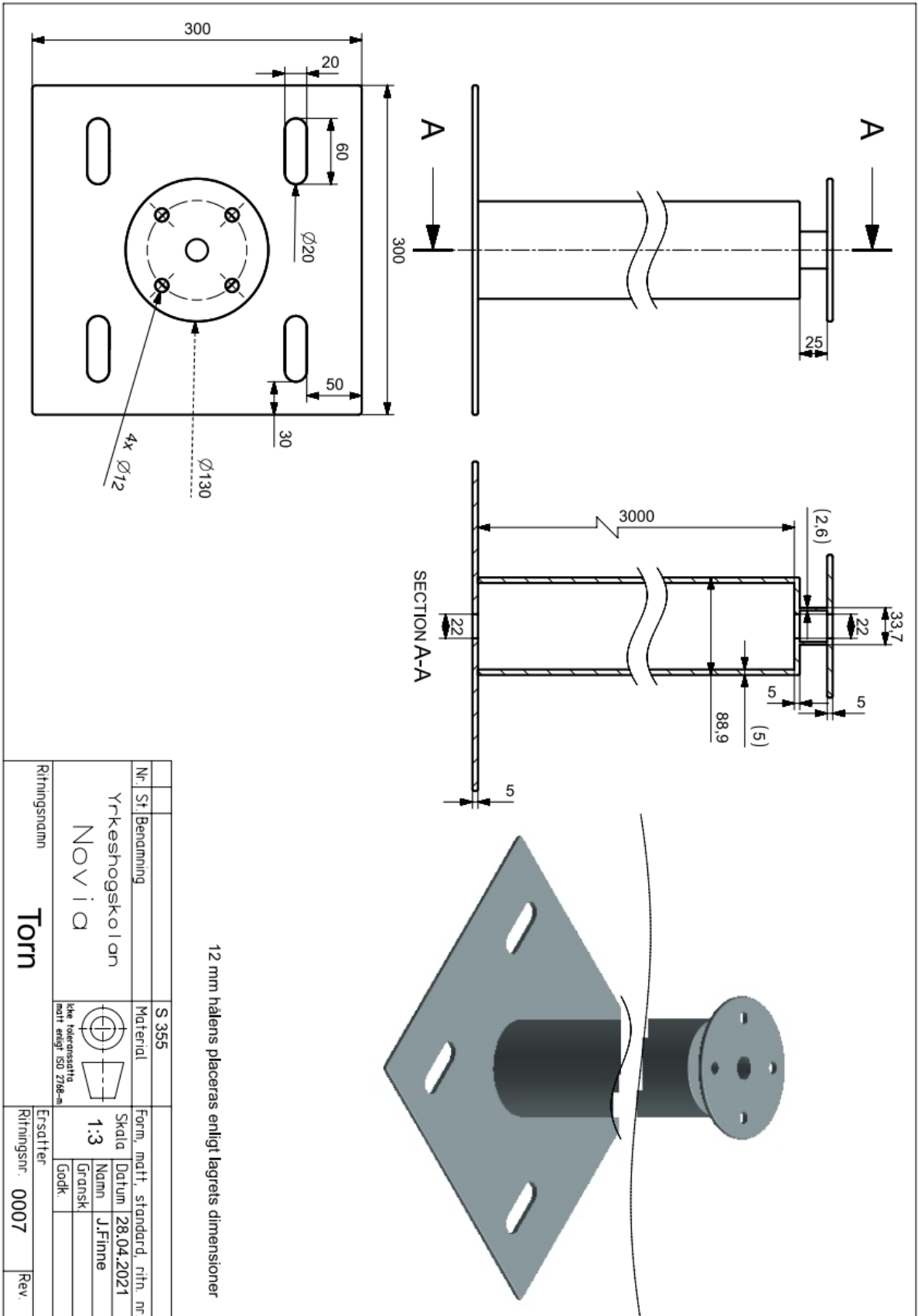
Detaljritning över arm i A3 storlek.



Detaljritning över nav i A3 storlek.



Detaljritning över torn i A3 storlek.



Sammanställningsritning över hela vindkraftverket i A3 storlek.

