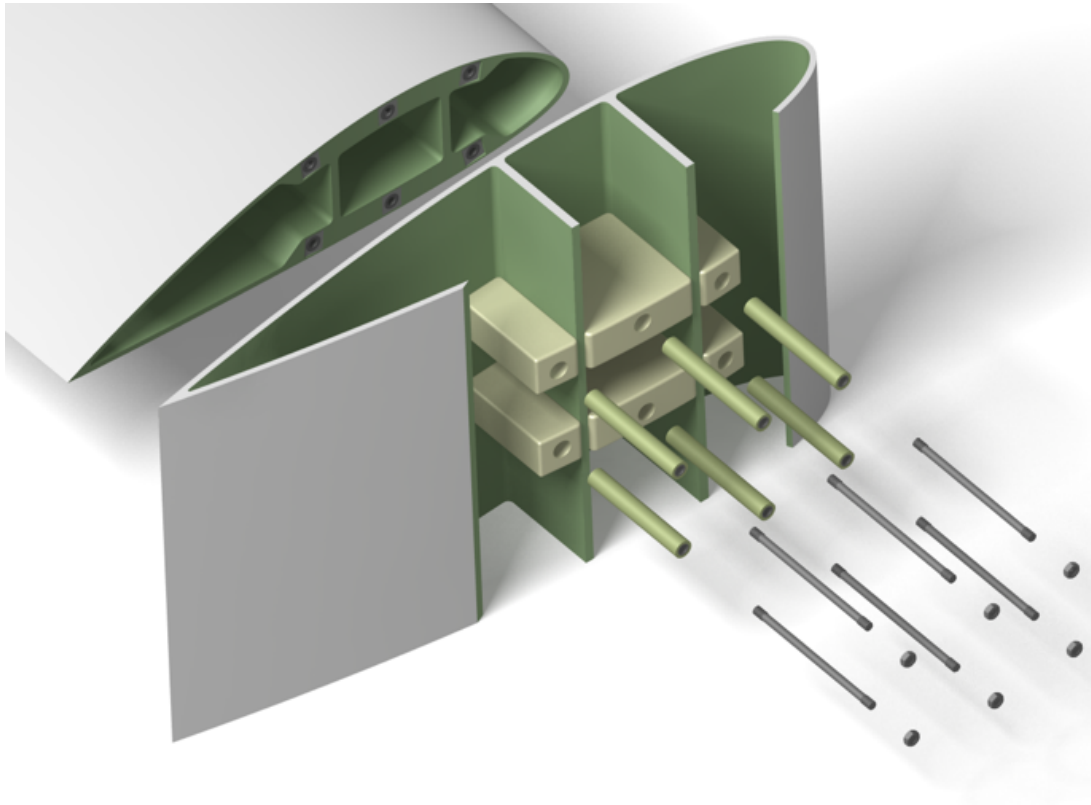




Konstruktion av T-fog för vertikalaxlat vindkraftverk

Construction of a T-joint for a vertical axis wind turbine

Examensarbete för högskoleingenjörsexamen inom Maskiningenjörsprogrammet

Anders Götvall
Jacob Hällgren

Examensarbete 2018

Konstruktion av T-fog för vertikalaxlat vindkraftverk

Anders Götvall
Jacob Hällgren



Inst. för Material- och tillverkningsteknik
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg, Sverige 2018

Konstruktion av T-fog för vertikalaxlat vindkraftverk
Anders Götvall & Jacob Hällgren

© ANDERS GÖTVALL & JACOB HÄLLGREN, 2018

Handledare och Examinator: Håkan Wirdelius, Biträdande professor, avdelningen för
Konstruktionsmaterial, Institutionen för industri- och materialvetenskap

Examensarbete 2018
Inst. för Material- och tillverkningsteknik
Chalmers Tekniska högskola
SE-412 96 Gothenburg
Telephone +46 31 772 1000

Omslag: Rendering av ett slutgiltigt koncept, se avsnitt 4.7.

Göteborg, Sverige 2018

Förord

Under våren 2018 gjorde vi vårt examensarbete som är den sista delen i vår högscoleingenjörsexamen. Arbetet gjordes för företaget SeaTwirl AB i Göteborg och denna rapport är resultatet av det arbete vi utförde.

Vi vill rikta ett stort tack till Martin Rosander och Jonas Boström på SeaTwirl AB som givit oss möjligheten att göra detta arbete och som har lagt ner mycket av sin energi och tid på att handleda oss längs vägen. Vi vill också tacka Kjell Melkersson från Chalmers som har bistått med mycket hjälp kring beräkningsdelen. Sist men inte minst vill vi tacka vår examinator Håkan Wirdelius från Chalmers.

Sammanfattning

Horisontalaxlade vindkraftverk är i dagens samhälle en vanligt förekommande källa för förnybar energi. Företaget SeaTwirl AB vill göra denna form av förnybar energi tillgänglig för fler genom att utveckla ett vertikalaxlat vindkraftverk. Detta vindkraftverk är tänkt att vara billigare att producera och enklare att installera till havs. I vindkraftverkets konstruktion finns en T-fog vars uppgift är att sammanfoga bladen och stagen. SeaTwirl AB söker en lösning på hur denna T-fog skall konstrueras.

Examensarbetet undersöker befintliga lösningar och teorier inom vindkraftsindustrin. Utifrån dessa undersöks tänkbara sätt att konstruera en T-fog som ska klara de krav som ställs. En stor utmaning är att minimera vikten hos koncepten för att på så sätt effektivisera hela vindkraftverkets konstruktion och verkningsgrad. Genom att använda konventionella produktutvecklingsmetoder genomgås en konceptgenereringsprocess. När konceptgenereringsprocessen är klar väljs de starkaste koncepten ut för vidareutveckling.

De starkaste koncepten detaljkonstrueras och verifieras genom grundläggande handberäkningar. Här görs kraftiga approximationer och förenklingar för att göra beräkningarna hanterbara inom tidsramen. Ett koncept står till sist som vinnare och levereras som rekommendation till SeaTwirl AB för vidareutveckling.

I slutsatsen konstateras att det vinnande konceptet är en god bit på vägen mot en färdig lösning men att en del tydliga brister finns i verifieringen. Rekommendationer att bland annat utföra FEM-beräkningar, noggrannare handberäkningar och noggrannare materialval lämnas därför.

Summary

Horizontal axis wind turbines is a common source for renewable energy in todays society. SeaTwirl AB want to make this type of renewable energy more available by designing a vertical axis wind turbine. The idea is to make it less expensive to manufacture and easier to install offshore. In this vertical axis wind turbine there is a T-joint whose purpose is to join the strut, coming from the rotation axis of the turbine, to the turbine blade. SeaTwirl AB is therefore seeking a solution to how this T-joint should be designed.

This bachelors thesis examines existing solutions and theories within the wind power industry from which possible ways to design this T-joint, according to the demands set upon it, is generated. A big challenge lies in minimizing the weight of the concepts to increase the efficiency of the whole wind turbine. By using conventional product development tools a number of concepts are made. Only the most qualified concepts are chosen to be further developed after that.

These concepts are constructed in detail and are verified through basic calculations made by hand. Heavy estimates and simplifications were made at this stage to make the calculations more manageable in the time available. In the final stage one concept is the winner and that concept is delivered to SeaTwirl AB as a recommendation for further development.

In the conclusion it is stated that the winning concept is some ways down the road but that there are obvious flaws in the verification process. Therefore it is recommended to do FEM-calculations, more thorough calculations and more precise choices of materials in further development.

Innehållsförteckning

1	Inledning	1
1.1	Bakgrund	1
1.2	Syfte	1
1.3	Avgränsningar	1
1.4	Precisering av frågeställning	1
2	Teoretisk referensram	2
2.1	Produktbeskrivning	2
2.1.1	Funktioner	2
2.1.2	Dimensioner och laster	3
2.2	Dagens teknik	4
2.2.1	Plugginsats	4
2.2.2	T-insats	6
2.2.3	Segmenterade turbinblad	6
2.3	Konventionella sammanfogningstekniker	7
2.3.1	Plana förband	8
	Skruvförband	8
	Nitförband	8
2.3.2	Rotationssymmetriska förband	8
	Krymp- och pressförband	8
	Klämförband	8
	Kil-, bom-, pinn- och spårringsförband	8
	Koniska förband	9
2.3.3	Limförband	9
2.3.4	Svetsförband	9
2.4	Material	9
2.4.1	Glas-och kolfiberkomposit	9
2.4.2	Trä/epoxy-föreningar	10
2.4.3	Sandwichmaterial	10
2.4.4	Stål	11
2.4.5	Aluminium	11
2.5	Aerodynamik	11
3	Metod	13
3.1	Produktspecifikation	13
3.2	Konceptgenerering	13
3.2.1	CAD-modellering	13
3.3	Konceptval	13
3.4	Beräkningar	13
3.5	Detaljkonstruktion	14
4	Resultat	15
4.1	Initial konceptgenerering	15
4.2	Förfinade koncept	15
4.2.1	Koncept 1	15
4.2.2	Koncept 2	16
4.2.3	Koncept 3	17
4.2.4	Koncept 4	18
4.2.5	Koncept 5	20
4.3	Analys av förfinade koncept	21

4.3.1	Analys av koncept 1	21
4.3.2	Analys av koncept 2	22
4.3.3	Analys av koncept 3	22
4.3.4	Analys av koncept 4	22
4.3.5	Analys av koncept 5	22
4.4	Val av koncept	23
4.5	Vidareutveckling – Grundläggande förändringar	23
4.6	Beräkningar	23
4.6.1	Allmänna beräkningar	23
4.6.1.1	Tyngdacceleration	24
4.6.1.2	Antal skruvar vid pulserande radiell last	25
4.6.1.3	Skjuvspänning i skruvar	26
4.6.1.4	Skjuvning skum	26
4.6.1.5	Skjuvning hylsa	27
4.6.1.6	Skjuvning av lim i kontaktyta mellan hylsa och laminathylsa	28
4.6.2	Koncept 1	28
4.6.2.1	Kraftväg	29
4.6.2.2	Plugginsatser	29
4.6.2.3	Skruvförband plugginsats	30
4.6.3	Koncept 2	33
4.6.3.1	Kraftväg	33
4.6.3.2	Skruvförband T-insatser	34
4.6.3.3	Hållkantryck T-insats	34
4.7	Vidareutveckling av koncept 1	36
4.7.1	Uppskattad vikt och materialkostnad	37
4.8	Vidareutveckling av koncept 2	38
4.8.1	Uppskattad vikt och materialkostnad	39
5	Slutsats	40
5.1	Slutgiltiga koncept	40
5.2	Tillvägagångssätt	40
5.3	Framtida arbete	41
	Referenser	42
	Bilagor	i
	Bilaga 1: Produktspecifikation	i
	Bilaga 2: Vikt och materialkostnader för förfinade koncept	ii
	Bilaga 3: Pughs matris	iii
	Bilaga 4: Beräkningar T-insats	v
	Bilaga 5: Ritningar av koncept 1 och 2	ix
	Bilaga 6: Bilder på initiala koncept	xvi

1 Inledning

1.1 Bakgrund

Företaget SeaTwirl AB har sedan ett antal år tillbaka utvecklat ett vertikalaxlat vindkraftverk, till skillnad från de horisontalaxlade vindkraftverken som står intill motorvägar och dylikt. Ett vertikalt vindkraftverk kommer aldrig att vara lika effektivt som ett horisontellt då bladen inte är verksamma hela cykeln. Företagets idé är att konstruera vindkraftverket så enkelt och billigt att detta väger upp för effektförlusten. I det vertikala vindkraftverket finns en central vertikal axel vilken tre vertikala blad roterar kring. Dessa blad är monterade till den centrala axeln via stag. Längst ut i konstruktionen där det horisontella staget möter det vertikala bladet finns en så kallad T-fog. T-fogens uppgift är alltså att binda staget vinkelrät till bladet, i vad som liknar ett "T". Då materialet i fråga är en fiberkomposit blir denna T-fog svårkonstruerad ur ett hållfasthetsperspektiv då en fiberkomposit inte är ett homogent material, vilket eliminerar konventionella skruvförband. Det vertikala vindkraftverkets stora brist i det att bladet inte är verksamt hela varvet runt, skapar en cyklisk belastning i T-fogen. Ett viktigt dimensioneringskriterie är därför utmattning. Dessutom kommer detta vertikala vindkraftverk flyta ute till havs. Med vindkraftverkets totala diameter på 50m och med böljande vågor omkring ligger även en stor utmaning i att underlätta monteringen av bladen och stagen.

1.2 Syfte

Syftet med detta projekt är att konstruera och analysera ett antal koncept på en T-fog, detta för att avgöra vilket koncept som är mest lämpat för vidareutveckling vilken kommer att utföras av SeaTwirl AB.

1.3 Avgränsningar

Vindkraftverket har sex stycken fogar. Dessa kommer att ses som likvärdiga och arbetet kommer därför att utgå från en fog. Enbart grundläggande handberäkningar kommer att utföras som verifiering. FEM-analyser kommer ej att ingå i detta arbete. Material kommer att väljas utifrån vad som erfordras och ej genom en materialvalsprocess. Koncepten kommer att konstrueras på en grundläggande nivå vilket gör att toleranssättning utelämnas ur arbetet.

1.4 Precisering av frågeställning

- Vilka krav och önskemål ställs för T-fogen?
- Vilka lastfall utsätts T-fogen för?
- Vilka befintliga sammanfogningslösningar kan appliceras på ett vertikalt vindkraftverk?
- Hur skall T-fogen konstrueras?
- Vilka material är lämpliga i detta avseende?

2 Teoretisk referensram

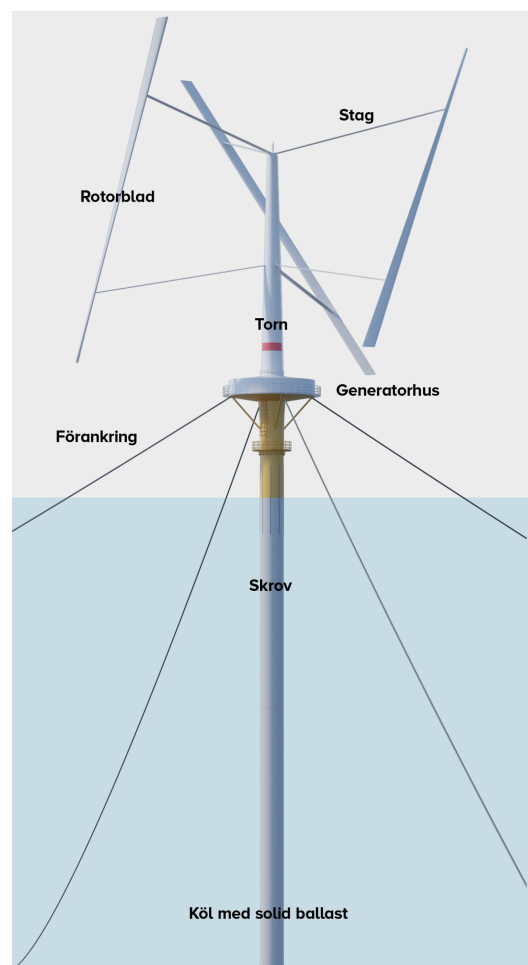
I detta kapitel kommer det teoretiska underlaget för arbetet att presenteras. En tydligare beskrivning av den prototyp som studeras läggs fram samt en genomgång av existerande tekniker och lösningar.

2.1 Produktbeskrivning

Under 2020 kommer SeaTwirl AB att lansera SeaTwirl S2 som är ett vertikalaxlat vindkraftverk och prototyp nummer två i sin serie [1]. S2 ska konstrueras för att kunna placeras i vatten. Målet med S2 är att det ska kunna generera 1MW, ha låga tillverknings- och underhållskostnader samt ha få rörliga delar vilket ska leda till mindre avbrott.

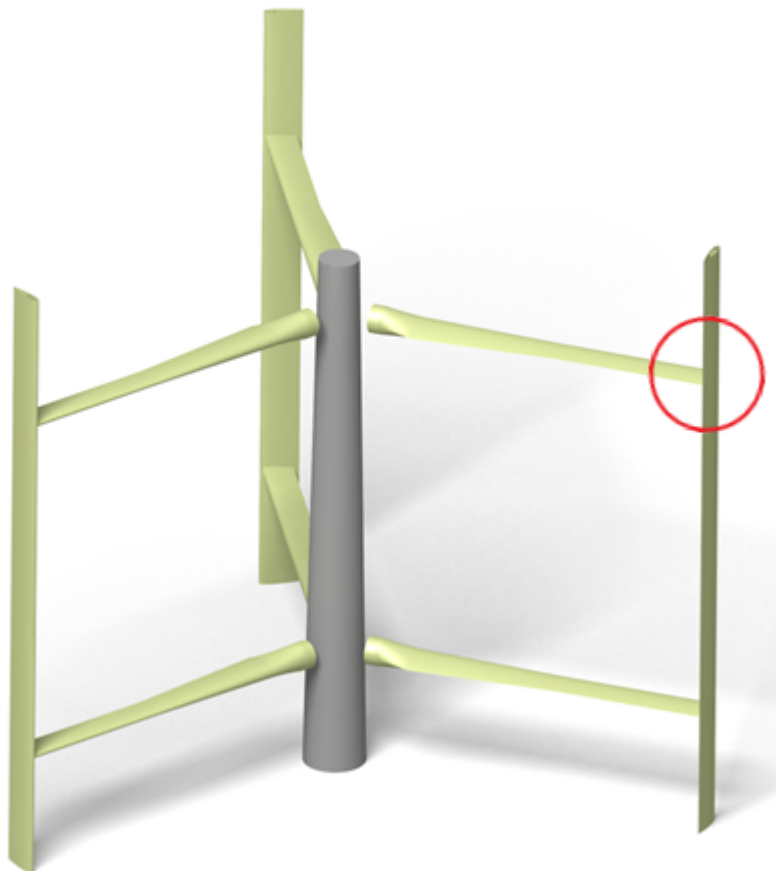
2.1.1 Funktioner

S2 har en flytande köl som håller vindkraftverket ovanför ytan, se Figur 1. Kölen är sammankopplad med tornet som håller i stagen och som i sin tur håller i rotorbladen. Där kölen och tornet möts sitter ett generatorhus som genererar ström och som sitter förankrat i havsbotten m.h.a. förankrade linor. Eftersom att kölen, tornet och vindturbinen är sammankopplade roterar dessa enhetligt med vinden medans generatorhuset förblir relativt stillastående.



Figur 1: SeaTwirl S2. Hämtad från [1]

Figur 1 är endast en konceptuell bild av S2, i detta skede av projektet sitter stagen och bladen vinkelräta mot varandra, se Figur 2. Den röda cirkeln i Figur 2 visar området där staget och rotorblad möts och där T-fogen kommer att sitta.



Figur 2: Rendering av S2s torn, blad och stag. Renderad fil tillhandahållen av [2]

2.1.2 Dimensioner och laster

Fogen som ska konstrueras ska sammankoppla rotorbladen och stagen. Rotorbladen är ca 40 m långa, tvärsnittet är av typ NACA 0018-tvärsnitt och bladen väger ca 3-4 ton styck, se Figur 3. NACA är en förkortning för ”National Advisory Committee for Aeronautics airfoils” och tillsammans med dess fyra efterföljande siffror ”0018” ger det specifikationer för en vingprofils dimensioner [3]. I detta fall står 00 för att tvärsnittet är symmetriskt kring kordan och 18 står för att den på vid sin högsta punkt är 18% av kordans längd hög. Stagen, se Figur 4, kommer att vara ca 23 m långa, ha ett NACA 0023-tvärsnitt (där staget möter bladet) och väga ca 3,5 ton.



Figur 3: Blad. Renderad fil tillhandahållen av [2]



Figur 4: Stag. Renderad fil tillhandahållen av [2]

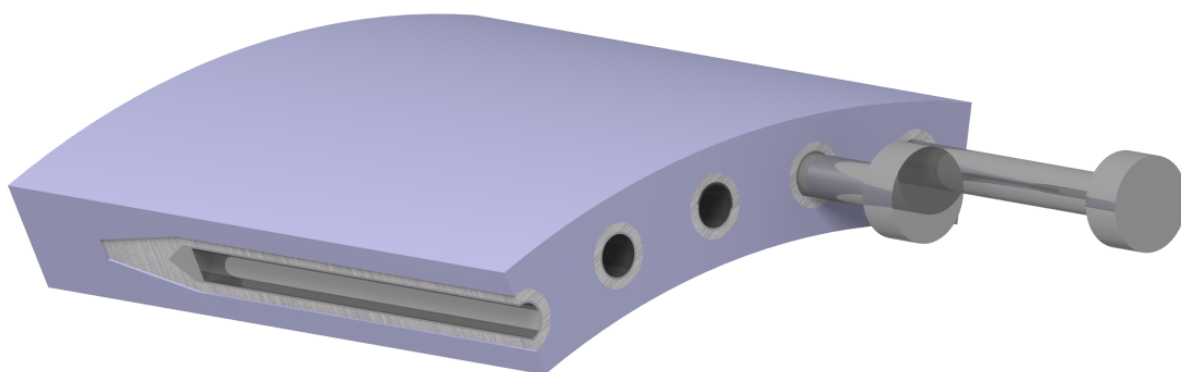
T-fogen utsätts för cyklisk belastning vilket gör att den måste dimensioneras för utmattning. T-fogen kommer att utsättas för en tyngdkraft från rotorbladen, en varierande centripetalkraft orsakad av centripetalaccelerationen och lyftkraften på bladen. Den varierande lyftkraften orsakas av förändringar i bladets position i förhållande till vindriktningen och förändringar i vindhastighet, läs mer om detta i kapitel 2.2. Centripetalkraften orsakar dragkrafter i staget.

2.2 Dagens teknik

De flesta konventionella rotorbladen byggs idag av fiberkompositer, endast glasfiber eller glasfiber med förstärkande delar av kolfiber. Att sammanfoga fiberkompositer med sig själv eller andra material är svårt p.g.a. fiberkompositens skillnader i materialegenskaper vad gäller fibrerna och matrisen, se avsnitt 2.4.1. I kapitlet dagens teknik presenteras sammanfogningslösningar som används till rotorbladen på vindkraftverk idag.

2.2.1 Plugginsats

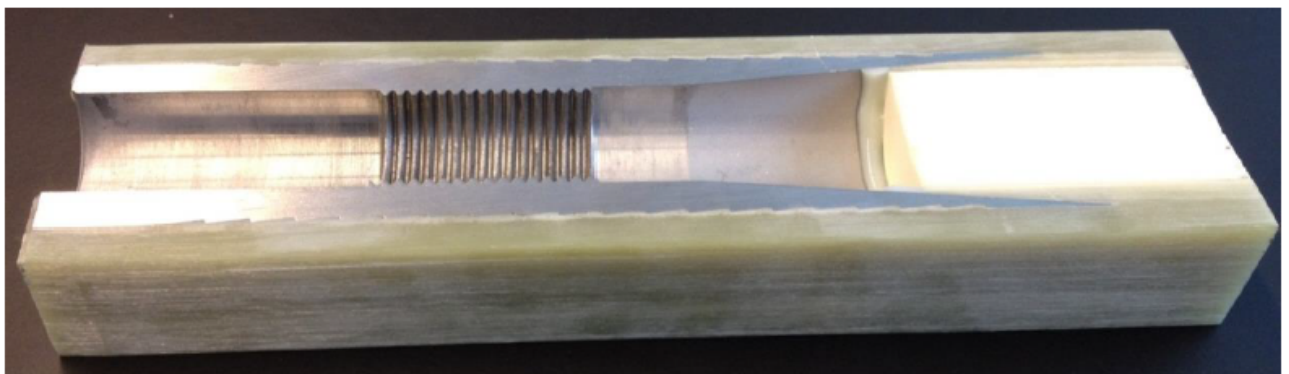
Plugginsatts-lösningen bygger på att gängade pluggar monteras in i kompositen som möjliggör att skruvar kan skruvas in utan att ha direkt kontakt med kompositen [4], se Figur 5, Figur 6 och Figur 7. Insatsen har ett konformat utseende och gängan i insatsen är oftast tillverkad av stål. Stål och kompositer har olika termisk expansionskoefficient och styvhet, gängan har därför ett laminatskal som används för att minimera effekterna av skillnaderna i materialegenskaper.



Figur 5. Plugginsatser. Egen figur



Figur 6: Plugginsats från Fiberline Composites. Bild tillhandahållen av Fiberline Composites [5]

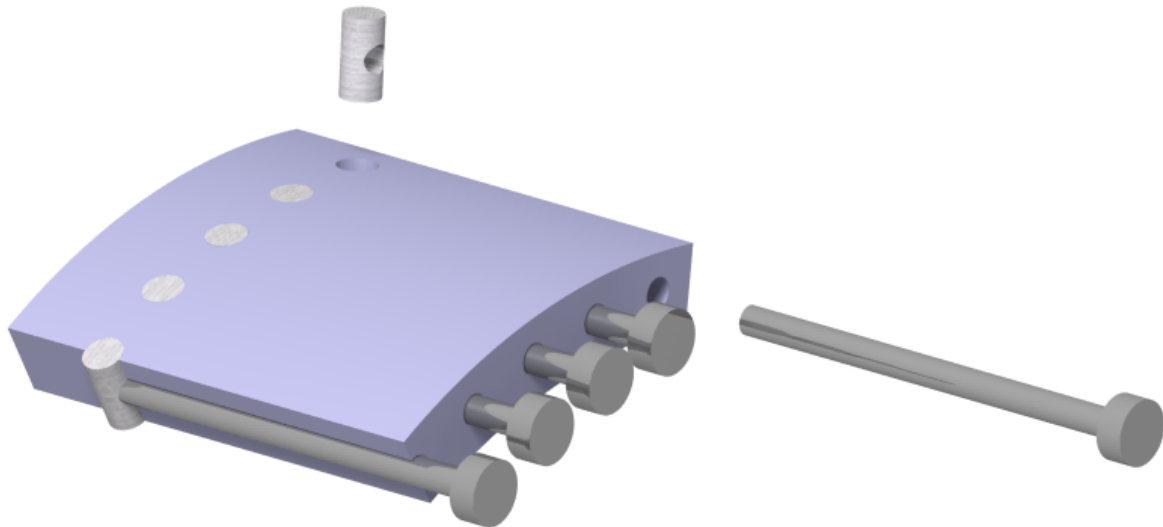


Figur 7: Tvärsnitt av plugginsats från Fiberlina Composites. Bild tillhandahållen av Fiberline Composites [5]

Insatserna limmas oftast in i hål i rotorbladen där hålen gjuts i samband med tillverkningen av rotorbladen. En annan metod för montering är att sätta in insatserna under lamineringsprocessen av rotorbladen. Detta bidrar till att laminatskalet på insatserna kan tillverkas tunnare vilket i sin tur minskar antalet steg i tillverkningsprocessen av insatsen. Denna metod gör dock att lamineringsprocessen blir mer komplex. Ett exempel på en sådan lamineringsprocess går ut på att bädda in insatserna i fibrerna vilket gör att extra lim inte blir nödvändigt. Insatsernas kontaktyta mot hålen i rotorbladen påverkar dess förmåga att klara av längsgående laster, en stor kontaktyta bidrar därför till en mer hållbar insats. Insatsens längd i förhållande till diameter är därför ofta stor. Hålens diameter är begränsad av rotorbladens laminat-tjocklek. För att undvika höga spänningskoncentrationer kan insatserna monteras med olika längd.

2.2.2 T-insats

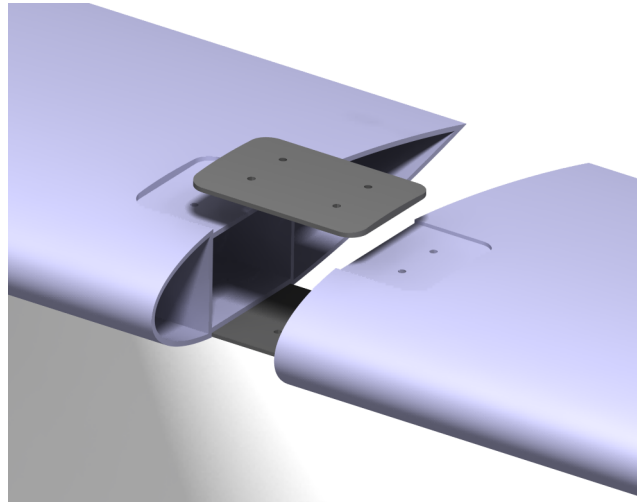
Då fiberkompositer har svårt att hantera konventionella skruvförband kan T-insatser istället användas, se Figur 8. Detta är en vanligt förekommande skruvförbandslösning i dagens vindkraftsindustri och kallas även för IKEA-förband [6] då IKEA använder denna typ av förband för att sammanfoga spånskivor/träkomposit i sina möbler. Ett hål förborras där skruven skall gå in i materialet, sedan en bit in i materialet borras ännu ett hål genom det första hålet, vinkelrät mot detta. I detta hål sätts en cylindrisk mutter som är gängad vinkelrät mot mutterns centrumaxel, till skillnad från en vanlig mutter som är borrad koncentriskt med centrumaxeln. Mutterns invändigt gängade hål sätts i linje med skruvhålet och skruven kan nu gängas i muttern. På så sätt erhålls ett stadigt skruvförband där gängorna inte plasticerar. T-insatsen ger stor kontaktyta för spänningen att fördelas mot kompositen vilket försäkrar ett stadigt skruvförband även i bräckliga material. T-insatsens cylindriska form ger heller inga skarpa anvisningar för sprickor att bildas i materialet. Enligt [4] används denna typ av förband frekvent i dagens vindkraftindustri. Hål för en T-insats borras in i bladets kompositmaterial vinkelrät mot bladets yta varpå skruven fäster i T-insatsen genom ett förborrat hål parallellt med bladets längdriktning. Detta är en mycket enkel lösning och därför relativt billig. En nackdel med denna lösning är dock att den är tung då den är tillverkad av stål.



Figur 8: T-insatser. Egen figur

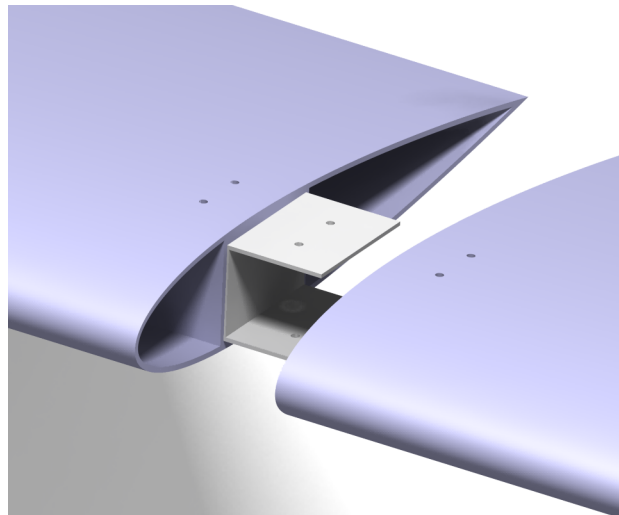
2.2.3 Segmenterade turbinblad

I takt med att dagens vindkraftverk med horisontell rotationsaxel får större och större kapacitet så blir de också fysiskt större. Detta resulterar i gigantiska projekt när turbinbladen skall transporteras, eftersom de i vissa fall är upp till 90m långa [7]. På grund av dessa komplicerade transporter finns anledning att börja överväga segmenterade turbinblad. I rapporten ” The Concept of Segmented Wind Turbine Blades: A Review” [4] nämns två intressanta tekniker för att sammanfoga ett delat blad. Den ena tekniken liknar en spikplatta som helt enkelt läggs över skarven och skruvas utifrån i förmonterade gänginsatser i vardera blad-del, se Figur 9.



Figur 9: "Spikplatta". Egen figur

Den andra tekniken är istället en profil som går genom skarven invändigt och som skruvas utifrån i insatsen, se Figur 10. Båda teknikerna kräver förstärkning av bladets komposit i det området som belastas av skruvförbanden.



Figur 10: Invändig H-profil. Egen figur

Att använda sig av segmenterade turbinblad är alltså en stor fördel vad gäller transport men det adderar också vikt. Detta kan få förödande konsekvenser i ett vindkraftverk med en hävarm på 90m kring rotationsaxeln.

2.3 Konventionella sammanfogningstekniker

Här följer en genomgång av de sammanfogningstekniker som finns. Genom att konstatera alla olika förbandstypers funktion möjliggörs användning av dessa i konceptgenereringsfasen. De olika förbandstypernas samspel med olika material förklaras i avsnitt 2.4 Material.

2.3.1 Plana förband

Plana förband används för att binda ihop plana ytor och överföra belastningar i form av normalkrafter och/eller tvärkrafter [8].

Skruvförband

Ett skruvförband består normalt sett av en gängad skruv som skruvas åt med en gängad mutter eller direkt i en komponent som har ett gängat hål, detta för att hålla ihop två eller flera komponenter. Skruvförband brukar förspännas, dvs en axialkraft byggs in skruven [8]. Skruvhuvud och mutter är stelare än skruvskäftet som är linjärt elastiskt och fungerar som en fjäder. Detta bidrar bl.a. till att skapa ett kontaktryck mellan ytorna som ”kläms ihop” av skruvförbandet vilket i sin tur möjliggör överföringen av tvärkrafter och att skruven inte åker ut ur gängan. Skruvförband används normalt till kompositer, glas, metaller, naturliga material och polymerer [9]. Skruvförband är en mycket vanlig sammanfogningsmetod och används i en eller annan form i de flesta konstruktioner.

Nitförband

Nitförband används för att sammanfoga överlappande komponenter i en konstruktion. Nitar (oftast tillverkade av någon metall) monteras i förborrade hål hos de komponenter som ska sammanfogas. Nitarnas fria ändar kläms/trycks sedan ihop och deformerar plastiskt, detta görs m.h.a. tryck (ibland kombinerat med värme). Nitförband används för att montera ihop polymerer, keramer, kompositer, metaller och naturliga material (t.ex. trä). Nitförband är vanligt förekommande i rymd-, bil- och marinindustrin [9].

2.3.2 Rotationssymmetriska förband

Rotationssymmetriska förband används för att överföra belastningar i form av vridmoment och/eller axialkrafter [8]. Detta kapitel ger endast en övergripande beskrivning området.

Krymp- och pressförband

Krymp och pressförband bygger på att en axel förs in i ett nav där axels diameter är något större än navets innerdiameter. Detta genomförs genom att utnyttja att material komprimeras eller expanderar vid temperaturförändringar eller genom att pressa in axeln i navet. Vid för stora belastningar uppstår makroglidning och förbandet upphör att fungera [8].

Klämförband

Klämförband består av ett slitsat eller delat nav som kläms ihop, oftast m.h.a. ett skruvförband [8]. Kontaktrycket skapar alltså ett friktionsförband mellan de komponenterna som skall sammanfogas. Kontaktrycket går att justera och förbandet går att montera av.

Kil-, bom-, pinn- och spåringsförband

Kilar och bommar används enbart för att överföra vridmoment [8]. Spårningar och låsringar används enbart för att överföra axialkrafter. En pinne kan överföra både vridmoment och axialkrafter. Pinnen placeras i ett förborrat hål som går igenom en axel eller ett nav och kan på så vis överföra båda vridmoment och axialkrafter.

Koniska förband

Koniska förband utnyttjar kontaktkraft utan att ta hänsyn till passningstoleranser [8]. Ett konförband behöver en yttre axialkraft vid montering och efter montering, detta kan åstadkommas med ett skruvförband. Om konvinkeln är liten behöver en axialkraft ansättas under montering men inte efter. Den lilla vinkeln ger en självlåsand effekt på förbandet, likt ett pressförband. Konförband används framförallt till att överföra vridmoment men kan även överföra axiella krafter. Kräver goda yttoleranser för god kontakt för friktionsytor.

2.3.3 Limförband

Limförband består av ett flytande bindemedel som sammanfogar två eller flera komponenter. Det kan användas för att kombinera olika typer av material som t.ex. metaller och kompositer. Limförband används vid arbete med keramer, kompositer, metaller, glas, naturliga material och polymerer [9].

2.3.4 Svetsförband

Svetsförband går ut på att sammanfoga två kroppar av samma material genom uppvärmning. Komponenterna kan ibland svetsas ihop som de är men ofta tillsätts extra smält material i fogen. Svetsförband är en vanligt förekommande vid sammanfogning av metaller men förekommer även vid sammanfogning av polymerer (termoplaster).

2.4 Material

Vid konstruktion av T-fogen måste de material som används beaktas. Stag och turbinblad är tillverkade i glasfiberkomposit. Om dessa skall kombineras med andra material måste skillnader i materialegenskaper tas i beaktande. Material som förekommer vid tillverkning av rotorblad till existerande vindkraftverk är glasfiber, glas/kolfiber-blandningar, trä/epoxy föreningar, stål och aluminium. Dessa presenteras mer utförligt som underlag för ett senare materialval.

2.4.1 Glas-och kolfiberkomposit

Idag byggs de flesta rotorbladen till vindkraftverk av fiberkompositer [6]. Fiberkompositer består av fibrer och en matris (syntetiskt harts, epoxy, polyester m.m.) där fibrerna tar upp spänningar och matrisen ger form samt innesluter fibrerna. Fiberkompositernas styrka ligger i fiberriktningen där man finner goda materialegenskaper. Om man istället tittar vinkelrät mot fibrernas riktning, t ex vid vinkelrät klämning med skruvförband, minskar materialets hållfasthet drastiskt enligt [10]. Egenskaper, kvalitet och kostnad varier kraftigt beroende på vilken typ av fiber och matris som används, vilken tillverkningsmetod som används och geometrisk utseende på produkten som ska tillverkas. Det finns två fiberkompositer som används till rotorblad, glasfiber (GFRP) och kolfiber (CFRP). Glasfiberkomposit är vanligast och har goda hållfasthetsegenskaper (brottgräns 420 GPa) men låg E-modul (15GPa), alltså låg styvhet. Kolfiberkomposit används som komplement till glasfiber för att förstärka specifika områden då det har tre gånger högre E-modul (44GPa) och högre brottgräns (550N/mm²).

Allt detta till en lägre densitet på ca 1500kg/m^3 jämfört med GFRP, ca 1800kg/m^3 . Fiberkompositer har alltså generellt låg densitet om man jämför med stål på ca 7800kg/m^3 .

Kolfiberkompositer sammanfogas ofta med stål inom industrin och då med limförband eller plana förband (skruv- eller nitförband). Limförband påverkar inte hållfastheten hos komponenterna som sammanfogas men kräver stora sammanfogningsytor och noggranna ytbehandlingar [11]. Miljöförhållanden som fukt, korrosion, temperatur har visat sig påverka limförbandets hållbarhet negativt.

Användandet av plana förband kräver hål i kompositen vilket gör att kompositens struktur påverkas. Hål kan borraras eller tillverkas i samband med lamineringsprocessen men oavsett metod orsakar hålen stora spänningskoncentrationer och påverkar kompositens hållbarhet. [12] skriver i sin rapport att de viktigaste faktorerna att ta hänsyn till vid design av ett skruvförband i komposit är:

- a. Lasterna/krafterna som ska överföras.
- b. Området kraften skall överföras på.
- c. Geometrisk krav i kraftöverföringspunkten.
- d. Skruvstorlek och dess placering
- e. Miljön i vilken förbandet skall vistas i
- f. Förbandets effekt på strukturell effektivitet och pålitlighet i konstruktionen.

[13] skriver i sin rapport att ökad förspänning av ett överlappande skruvförband ökar den totala lasten, dvs hög klämkraft vid klämning av kompositer är inte att föredra. Lasten måste alltså spridas ut väl vid klämning.

2.4.2 Trä/epoxy-föreningar

Trä är lätt och relativt starkt i förhållande till sin vikt. Trots detta så används det inte i vindkraftverk i modern tid. Faktorer som bidrar till detta är att trä behöver underhåll, har dålig hållbarhet och är känsligt mot väta [6]. Trä/epoxy föreningar har tagits fram för att bl.a. motverka effekten av väta. Denna typ av teknik är dock ovanlig idag p.g.a. att det finns bättre alternativ och få tillverkare. Konstruktioner av trä/epoxy-föreningar blir generellt sett tyngre än glasfiber vilket bidrar till att glasfiber är en bättre kandidat till rotorblad.

2.4.3 Sandwichmaterial

Sandwichmaterial är material med låg densitet där ett lätt kärnmaterial används ihop med ett tunt ”skinn” av styvare material, exempelvis glas- och kolfiberkomposit [14]. Detta ger en stark och lätt materialkomposition. Det finns olika typer av kärnmaterial så som honeycomb-strukturer och skummaterial. Honeycomb-kärnor användes redan 1986 inom rymdindustrin men lämpade sig inte för mer vardagliga konstruktioner som bilpaneler då det var väldigt svårt att tillverka. Vid konstruktioner med mer kropp och form används därför skummaterial som är enkelt att bearbeta och ger en bra ytfinhet.

2.4.4 Stål

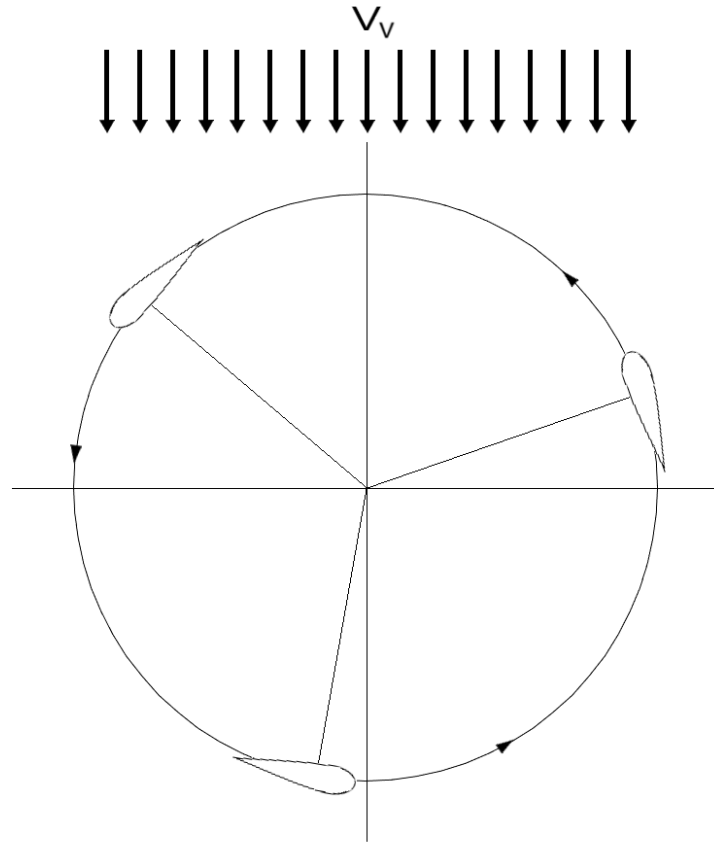
Stål är styvt och relativt billigt så länge det inte är någon speciell legering. En vanlig metod för sammanfogning av stål är skruvförband [6]. Skruvförband är normalt sett tillverkade av stål och används ofta för att sammanfoga navet och rotorbladet på horisontalaxlade vindkraftverk. Stål kan svetsas vilket medför en relativt enkel tillverkning av komponenter. Svetssömmar bidrar dock till sämre aerodynamisk prestanda, påverkar stålets hållfasthet och ökar risken för sprickbildning. Stål är känsligt mot korrosion vilket också kan leda till sprickbildning. Stålkärnor förekommer i rotorblad på större horisontalaxlade vindkraftverk. Stål kan också gjutas. Nav på horisontalaxlade vindkraftverk är ofta tillverkade av stål. Stål är dock tungt i förhållande till övriga material som normalt sett används till rotorblad på vindkraftverk.

2.4.5 Aluminium

Aluminium har god utmattningshållfasthet, god korrosionstålighet och relativt låg vikt (låg i förhållande till stål). Aluminium-legeringen duralumin används inom flygindustrin och har förekommit experimentellt på vindkraftverk [6]. Duralumin är svårt att svetsa vilket gör att det måste nitas, detta blir dyrt och mycket tidskrävande vid småskalig produktion. Vid användning av aluminium som går att svetsa, t.ex. AlMg5, ökar vikten.

2.5 Aerodynamik

På ett vertikalaxlat vindkraftverk varierar vindens infallsvinkel mot bladen under en cykel, vridmomentet som uppstår när luftflödet ansätts på bladen varierar därför vilket gör att en cyklisk belastning uppstår [6], se Figur 11. Modellen som T-fogen ska konstrueras för är en prototyp som kommer att ha tre blad. Tre blad ger en lägre variation i moment under en cykel och genererar bara positivt vridmoment till skillnad från två blad som utsätts för ett negativt vridmoment (under en liten period av en cykel) och därmed högre variation i moment.



Figur 11: Vinden som träffar vindkraftverket. Egen figur

Effektkoefficienten (C_p) på horisontalaxlade rotorerna är generellt sett större än effektkoefficienten på vertikalaxlade om antalet blad och tip-speed ratio (λ) är samma. Enligt Hau har experiment utförts på vertikalaxlade rotorerna där C_p -värdena har legat i närheten av C_p -värdena hos horisontalaxlade rotorerna. Aerodynamiskt motstånd som orsakas av fästen kring stagen och bladen minskar dock prestanda i praktiken. Om en T-fog ska konstrueras bör denna därför ha goda aerodynamiska egenskaper eftersom att detta kommer att ha en stor påverkan på C_p -värdet.

3 Metod

Nedan följer en förklaring, i kronologisk ordning, av de metoder som användes i projektet.

3.1 Produktspecifikation

En produktspecifikation konstruerades enligt [15]. Alla krav och önskemål listades utifrån sex kategorier: funktion, prestanda, livslängd, montering/hantering/underhåll, dimensioner, ekonomi och standarder samt lagkrav. Kraven markerades med ett K och önskemålen med Ö. Önskemålen viktades också på en skala mellan 1 - 5 där 5 var hög prioritering och 1 var låg prioritering. Produktspecifikationen ligger under bilagor som bilaga 1.

3.2 Konceptgenerering

Konceptgenereringen inleddes med att studera konventionella förbandsmetoder samt befintliga sammanfogningslösningar till rotorblad på vindkraftverk, detta för att systematiskt kartlägga för- och nackdelar och vad som fungerar idag. För att strukturera koncept-genereringen ytterligare skapades en morfologisk matris. En morfologisk matris används för att kartlägga alla olika typer av dellösningar på problemet [15]. I kombination med brainstorming kunde ett antal koncept tas fram. Detta var en iterativ process. Koncepten som togs fram skissades sedan i Catia.

3.2.1 CAD-modellering

Koncepten 3D-modellerades i Catia. Modellerna gav en uppskattad vikt och materialkostnad samt en bild av konceptens realiserbarhet.

3.3 Konceptval

När väl ett antal koncept var uppritade i Catia och det fanns nog med information om varje koncept kunde de enkelt föras in i en Pugh-matris. Denna matris kunde bestämma vilket koncept som teoretiskt sett var bäst [15]. Med hjälp av det teoretiska underlaget och resultatet från Pugh-matrisen kunde sedan vinnande koncept fastställas.

3.4 Beräkningar

Vid genomförandet av beräkningarna söktes primärt erforderligt antal skruvar, plugginsatser, T-insatser inklusive geometrier för dessa samt erforderlig skruvlängd. Beräkningarna genomfördes primärt med hjälp av programvaran MatLab. Det primära lastfallet som skulle dimensioneras mot var en pulserande last mellan 0 och 11G i turbinens periferi dragandes utåt i stagen vid bladen.

3.5 Detaljkonstruktion

När all grundkonstruktion samt alla urval var genomförda återstod två koncept. Dessa detaljkonstruerades sedan för slutleverans. Detta innebar bland annat att utföra verifieringsberäkningar och att få en mer genomarbetad finish på koncepten. Det var även viktigt att tänka på DFA (design for assembly) [15] för att det skulle finnas en tydlig och reellt genomförbar monteringsplan.

4 Resultat

4.1 Initial konceptgenerering

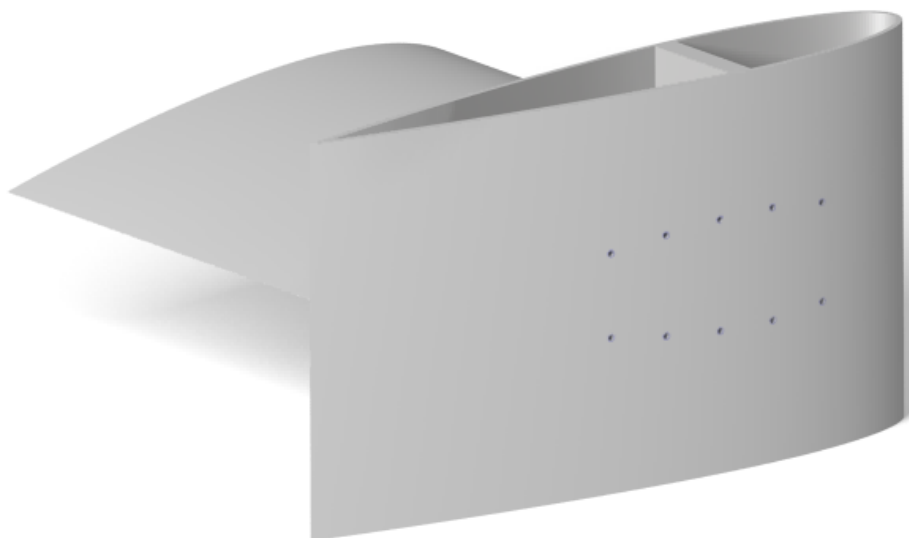
Med hjälp av teoretisk referensram, produktspecifikation och morfologisk matris samt brainstorming togs ett antal initiala koncept fram. Dessa koncept hade ett stort fokus på att försöka minimera kostnaden. Stål är alltid en bra utgångspunkt när god hållfasthet eftersöks till ett lågt pris varefter det användes i huvudsak och då det ofta används tillsammans med kompositer. Stål visade sig dock bli alldeles för tungt varför en ny konceptgenerering genomfördes utifrån de initiala koncepten med mål att minimera vikt. Produktspecifikationen samt bilder på de initiala koncepten finns i bilaga 6. Den morfologiska matrisen redovisas ej då den enbart användes som inspiration i ett mycket tidigt skede av den initiala konceptgenereringen och ger ej kontext till de slutliga koncepten.

4.2 Förfinade koncept

Nedan presenteras de koncept som uppkom vid vidareutveckling av de initiala koncepten. Konceptens uppbyggnad, delar och tillverkning beskrivs och en uppskattad vikt presenteras för att senare ligga till grund för ett urval. Materialens densitet och kostnad per kilo som användes vid vikt- och pris-approximering presenteras utförligt i Bilaga 2. Hållfasthetsberäkningar ingick ej i detta moment utan utfördes senare som verifieringsmetod av de vinnande koncepten efter matriselimineringen.

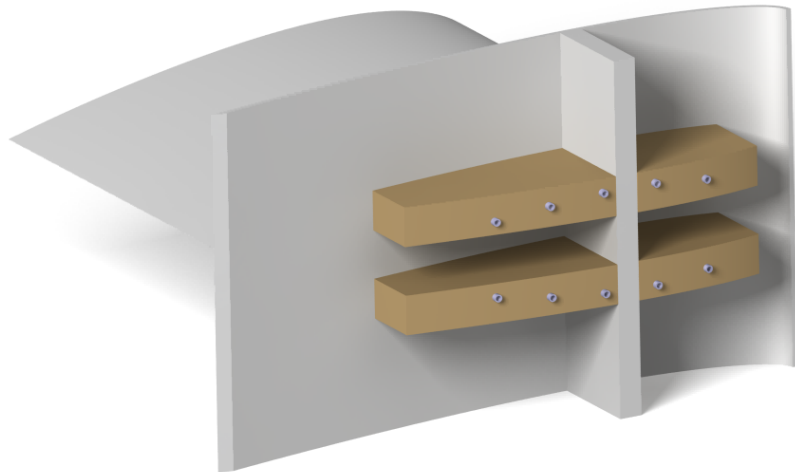
4.2.1 Koncept 1

Koncept 1 är en skruvförbandslösning där tio M20-skruvar skruvas in i plugginsatser i staget genom bladet, se Figur 12. Skruvlängden blir ca 500mm, därför används skruvar med diametern 20mm för att klara av förspänningen.



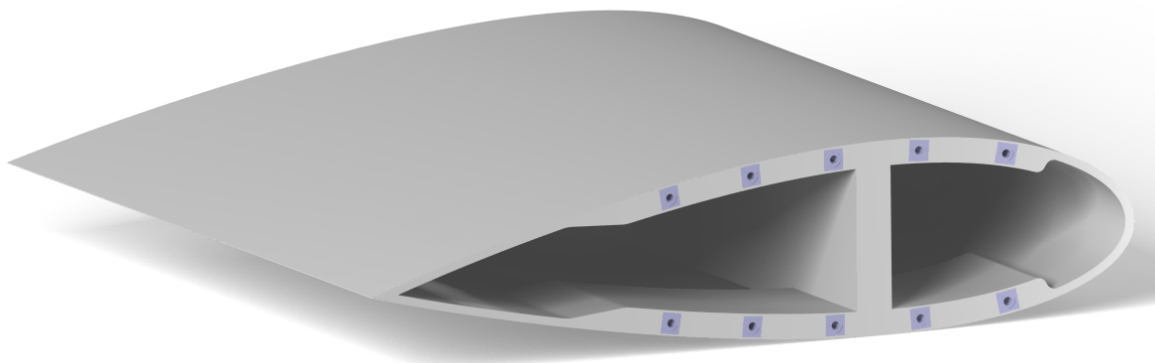
Figur 12: Översiktsbild på koncept 1. Egen figur

Kraften som tas upp i bladet rör sig genom den vertikala balken och tar sig genom skjuvning i limförband via skumkärnan (bruna klossar i Figur 13) till stålhylsorna. Stålhylsorna är sedan en klämd del i det skruvförband som förankras i plugginsatser i staget. Kraften tar sig alltså vidare från hylsorna till skruven, sedan genom plugginsatserna och till sist genom skjuvning i limförband till staget som betraktas som jord.



Figur 13: Genomskäring av blad. Egen figur

Staget gjuts först i två delar (glasfiber) där plugginsatser lamineras in tillsammans med extra glasfiber, se Figur 14. De två stag-halvorna limmas sedan ihop tillsammans med en inner-balk.



Figur 14: Stag med plugginsatser. Egen figur

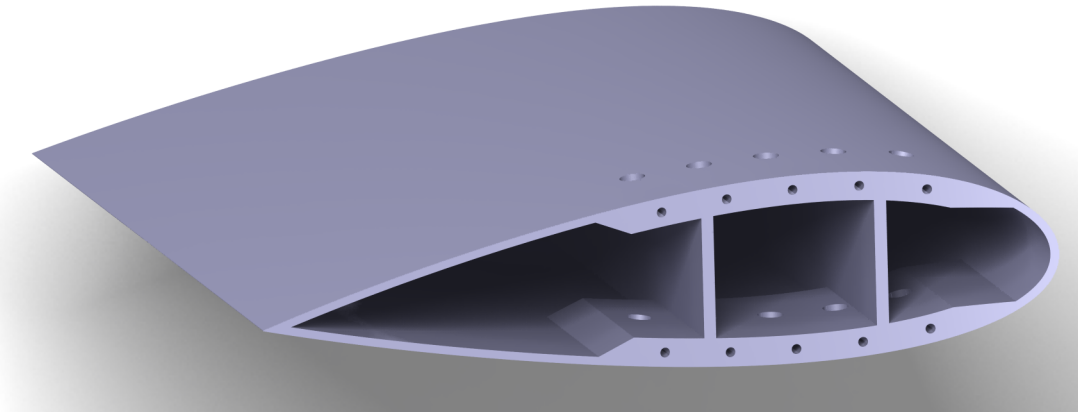
Bladet tillverkas även det i två delar (glasfiber). Skuminsatser limmas in i en av bladhalvorna tillsammans med en inner-balk. Hålen i bladet borraras först efter att bladet lamineras samman. När hålen är borraras limmas stålhylsorna in i skummet.

Den adderade vikten av komponenterna blir ca 191kg och materialkostnad blir ca 43000kr.

4.2.2 Koncept 2

Detta koncept är konstruerat på samma sätt som koncept 1 men använder T-insatser istället för plugginsatser för att sammanfoga blad och stag. Staget är därför det som skiljer koncepten åt. Det gjuts i två delar tillsammans med inner-balkarna och en tjockare del av glasfiber lamineras

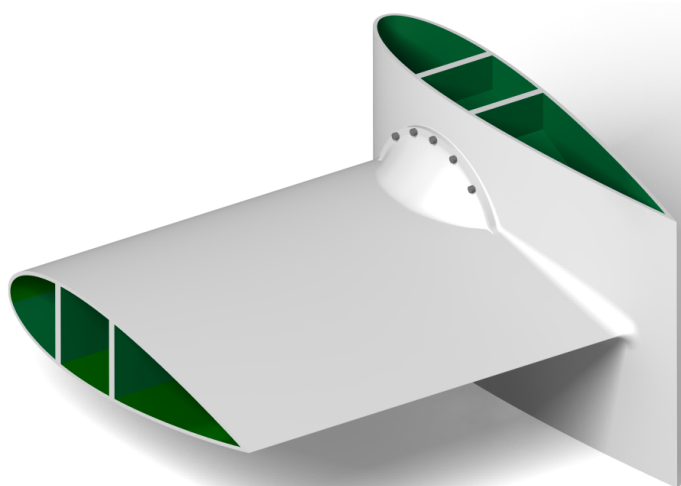
kring T-insatserna, se Figur 15. Därefter borrar hål för skruvarna och T-insatserna. T-insatsernas diameter bedöms behöva vara dubbla skruvdiametern för att vara starka nog för dragkraften i skruven och för att erbjuda tillräckligt stor area för spänningarna att fördela sig mot laminatet. I övrigt tillverkas konceptet på samma sätt som koncept 1. Den adderade vikten blir ca 185kg och materialkostnaden blir ca 31000kr.



Figur 15: Stag med T-insatser. Egen figur

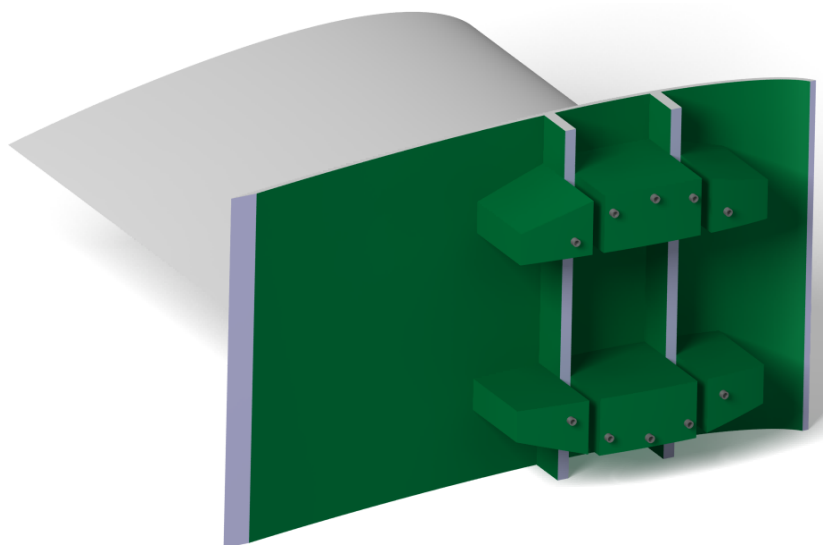
4.2.3 Koncept 3

Koncept 3 bygger även den på samma bladkonstruktion som Koncept 1. Stagets i koncept 3 har i ändan en fläns i glasfiber vilken tar upp dragspänningen från skruvarna som tryckspänning mellan fläns och mutter, se Figur 16.



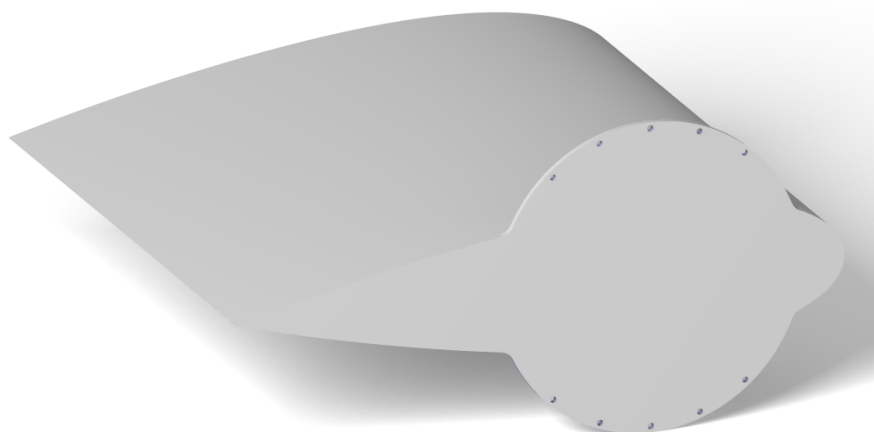
Figur 16: Översiktlig bild av Koncept 3. Egen figur

Bladet tillverkas i glasfiber i två delar. Stagets yta som möter bladet är platt vilket kräver att bladet har en utåtbuktande del. Denna del tillverkas i glasfiber och skum och limmas fast i efterhand. I Figur 17 syns tydligt hur innerstrukturen och konstruktionen av bladet bygger på samma princip som för koncept 1.



Figur 17: Genomskäring av blad. Egen figur

Staget gjuts i glasfiber i två delar. De två stag-halvorna limmas sedan ihop tillsammans med de två inner-balkarna. Plattan lamineras sedan fast i staget och en stor radieövergång av glasfiber med skum som fillermaterial skapas. Hål borras sedan i plattan, se Figur 18.



Figur 18: Stag. Egen figur

Den adderade vikten av komponenterna blir ca 193kg och materialkostnaden blir ca 42000kr.

4.2.4 Koncept 4

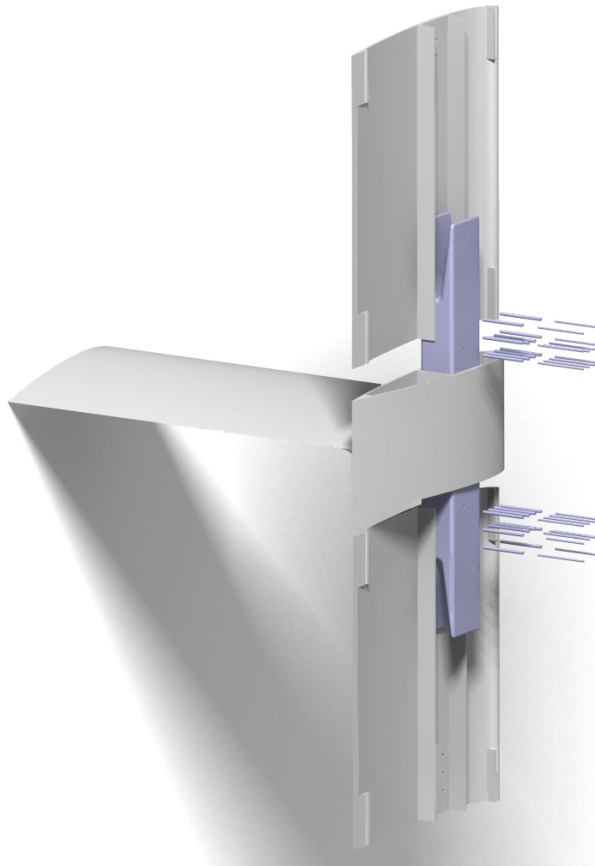
Koncept 4, se Figur 19, bygger på den andra av de två möjligheterna att dela av T-fogen, nämligen att segmentera bladet istället för att rent sammanfoga blad och stag. Segmenteringsprincipen framgår tydligt i Figur 20. Konstruktionen bärs upp av en genomgående balk i kolfiber med en kärna av skum. Ändarna på balken har ett urtag för att jämna ut övergången från balken till bladet i syfte att undvika stora spänningskoncentrationer. Själva T-fogen är inbyggd i staget och består av ett mindre bladsegment som lamineras ihop med staget för att bilda vad som ser ut att vara en helgjuten T-fog. Balken tillverkas separat och förs in på sin plats vid monteringen. Den förankras till staget med skruvförband. Efter det träs bladsegmenten på kompositbalken och förankras även där med skruvförband. Hålen för skruvarna borras genom hela konstruktionen när alla delar är på rätt plats för att säkerställa precision. Stålhylsor sätts i hålen som en hjälp att styra skruvarna och ta upp

förspänningskraften från dessa. Då böjmomentet i bladet tas upp av kolfiberbalken så blir skruvarnas roll enbart att fixera denna. Den tyngsta belastningen på skruvarna blir därför egentyngheden av bladet som verkar rakt nedåt.

Den adderade vikten av komponenterna blir ca 210kg och materialpriset är ca 39000kr.



Figur 19: Översiktlig bild av koncept 4. Egen figur

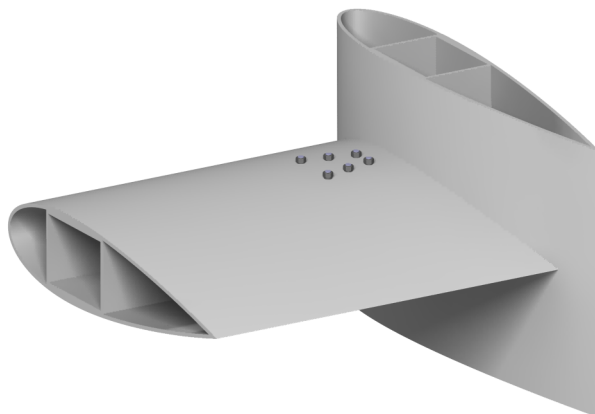


Figur 20: Genomskäring av bladet. Egen figur

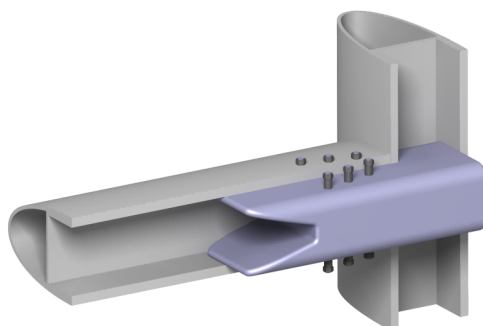
4.2.5 Koncept 5

Staget sammanfogas med bladet m.h.a. en kolfiberprofil som limmas in i bladet och skruvas fast i staget med överlappande förband, se Figur 21 och Figur 22. Staget och bladet har en rektangulär innerstruktur för ökad styrka samt för att ge ett bra interface för kolfiberprofilen. Stagen gjuts i två halvor och limmas ihop. Kolfiberprofilen består av en skumkärna med rektangulärt tvärsnitt som lamineras med kolfiber. Urtaget i profilens ände är till för att ge en mjukare övergång från den annars skarpa kanten till staget. Bladet gjuts i två halvor och ett rektangulärt hål med radieövergångar i hörnen sågas ut ur bladet där kolfiberprofilen ska sitta. Kolfiberprofilen limmas sedan in i bladet när detta limmats ihop. Vid montering träs sedan staget på änden av kolfiberprofilen, hål för skruvhylsor (för skruvarnas förspänning) borraras hela vägen igenom, hylsorna förs in och därefter skruvarna (6 st M30) som skruvas åt.

Den adderade vikten av komponenterna blir ca 100kg och materialkostnaden blir ca ca 16000kr.



Figur 21. Isovy över koncept 5. Egen figur



Figur 22. Genomskäring där balken syns tydligt på sin plats. Egen figur

4.3 Analys av förfinade koncept

I detta avsnitt analyseras de förfinade koncepten på ett grundläggande plan utifrån de faktorer som senare skulle bedömas i konceptvalet. Dessa faktorer anges i Pugh-matrisen i Bilaga 3.

4.3.1 Analys av koncept 1

Spänningen i bladet blir koncentrerad i ett litet område kring fogen vilket därför kan bedömas som känsligt. Tillverkningskostnaden blir låg för detta koncept då inga komplicerade material eller tekniker används. Plugginsatserna är enkla att arbeta med och underlättar även de i tillverknings syfte. Aerodynamiskt är grundkonstruktionen opåverkad vilket är bra. Vid transporten är bladen och stagen långa vilket är negativt men det finns inga utstickande delar eller liknande som på något ytterligare sätt kan påverka transporten negativt. Monteringsmässigt är koncept 1 mycket enkelt då det enda momentet som finns är att passa in skruvarna i sina hål samt förspänna dessa.

4.3.2 Analys av koncept 2

Då bladen i koncept 1 och 2 är lika hänvisas analysen av detta till analysen av koncept 1. Staget hos koncept 2 skiljer sig dock från koncept 1. T-insatser är en primitiv lösning som ej tar hänsyn till stål och glasfibers skillnad i styvhet. T-insatser är dock enkla att tillverka och de fungerar. Själva installationen av dessa kan dock anses vara något mer komplicerad än för plugginsatser. Hålen för T-insatserna borrar då staget är färdiggjutt vilket innebär ett extra moment och därför fler tillfällen då precision efterfrågas vilket ökar produktionskostnaden. I avseendena aerodynamik och transport är koncept 2 likt koncept 1. Koncept 2 anses vara smidigt att montera.

4.3.3 Analys av koncept 3

Många liknande konstruktioner återfinns vid användning av material som stål. Vid användning av fiberkomposit är tekniken inte lika beprövad och bedöms vara en risk. Tillverkningskostnaden förväntas bli hög då konstruktionen har speciella geometrier och tillverkningen många moment. Konstruktionen har negativ inverkan på de aerodynamiska egenskaperna då den är bulkig. Bulkigheten hos konstruktionen är även en nackdel för transporten. Vid monteringen observeras att skruvarna måste spännas från två håll vilket kan anses som komplicerat.

4.3.4 Analys av koncept 4

Det finns ett antal känsliga punkter i detta koncept. Laminering av den ”helgjutna” T-fogen är svår att tillverka och den är ett känsligt område för spänning. Segmenteringen ger böjspänningar i bladsegmenteringen som dels böjer i balken men som även ger tryckspänningar i själva kontaktytan mellan stag och blad. Fogen mellan blad och stag kan inte heller förspännas vilket resulterar i glapp. Konceptet bedöms vara dyrt att tillverka då denna typ av glappassning kräver mycket goda toleranser. Aerodynamiken påverkas negativt eftersom att den radieövergång som existerar blir bulkig. En stor fördel med detta koncept är att bladsegmenteringen möjliggör smidigare transport. Ett stort antal komponenter ger dock komplicerad montering.

4.3.5 Analys av koncept 5

Nackdelarna med koncept 5 är att hålet i bladet tvingas ta upp stora spänningar p.g.a. kolfiberprofilen som limmas in i bladet. Hålets rektangulära geometri utgör därför en risk för haveri om inte radieövergången räcker till. Då varken staget eller kolfiberprofilen klarar tryckspänningar, förspänns skruvarna direkt i stålhylsorna. Därför kommer det alltid att finnas ett glapp mellan stag och kolfiberprofil vilket ej är önskvärt. Denna glappassning avspeglar sig likt koncept 4 negativt på tillverkningskostnaden då mycket fina toleranser krävs. Aerodynamiskt sett är konstruktionen så effektiv som den kan vara. Transporten är hämmad då kolfiberprofilen monteras i fabrik och kommer att sticka ut vid transport. Monteringen är enkel förutom att skruven måste spännas från två håll då den är genomgående.

4.4 Val av koncept

För att välja vinnande koncept användes en Pugh-matris. Verifieringsberäkningar utfördes först efter konceptvalsfasen då resurserna inte räckte till att genomföra beräkningar på samtliga koncept innan. Därför ingick enbart grundläggande faktorer som skulle särskilja koncepten från varandra. Dessa faktorer var låg vikt, låg materialkostnad, låg tillverkningskostnad, låg aerodynamisk påverkan, smidig transport, och smidig montering. Faktorerna låg vikt och materialkostnad bedömdes med värden som underlag, resterande faktorer bedömdes rent subjektivt. Matrisen genomfördes fem gånger med alla fem koncept som referenslösning. De viktade summorna från varje matris och koncept summerades för att få en totalsiffra på konceptens styrka gentemot varandra. Konceptens ordning från starkast till svagast inkl. summa blev koncept 2 (42), koncept 1 (24), koncept 5 (21), koncept 3 (-45) och koncept 4 (-28). Koncept 5 var i många avseenden starkast med sin låga vikt och materialkostnad men föll bland annat på svaghet i den grundläggande funktionen. Koncept 1 och 2 valdes alltså för vidare bearbetning och verifiering. Pugh-matriserna finns redovisade i bilaga 3.

4.5 Vidareutveckling – Grundläggande förändringar

Då koncepten vidareutvecklades bestämdes tidigt ett antal grundläggande förändringar. Koncept 1 var tänkt att använda M20-skruv men vid sökning fanns inga plugginsatser för den dimensionen på skruv. En M30-version tillverkad av Fiberline Composites hittades och användes [16]. För att effektivisera arbetet användes M30-skruv även till koncept 2. Övergången mellan skruvförbandets stålhylsa och bladets skuminsats ansågs vara för hård på samma sätt som nämns om plugginsatsen i avsnitt 2.2.1. Därför lades en mjukare övergång in mellan de två materialen i form av ett lager glasfiberlaminat som lindas utanpå stålhylsan, vidare benämnt som laminathylsa. Av samma anledning valdes ett skum i form av Divinycell H250 [17]. Detta skum hade en mycket låg densitet och hög styvhet [9] vilket passade bra då en liten skillnad i E-modul mellan skum och glasfiber eftersträvades.

4.6 Beräkningar

I detta kapitel presenteras allmänna beräkningar samt beräkningar som är specifika för koncept 1 och koncept 2. Följande beräkningar användes som verifieringsmetod för att se om befintliga dimensioner var rimliga och om koncepten höll för de pålagda lasterna. Observera att många värden erhöles direkt från SeaTwirl AB och bevisas därför inte i denna rapport. Det stål som användes är AISI 410, intermediate temper [9] (med undantag från skruvarna). Detta stål används i andra sammanhang till bl.a. skruvar, muttrar och hylsor.

4.6.1 Allmänna beräkningar

Detta avsnitt innehåller beräkningar som koncept 1 och 2 har gemensamma. Först undersöks vilka krafter som uppstår p.g.a. dynamiken (tyngdaccelerationen) och hur dessa förhåller sig till erhållna värden från SeaTwirl AB. Beräkningar utförs sedan på skruvarna för att säkerställa dimensioner och antal. Till sist beräknas skjuvning i skummet och hylsorna.

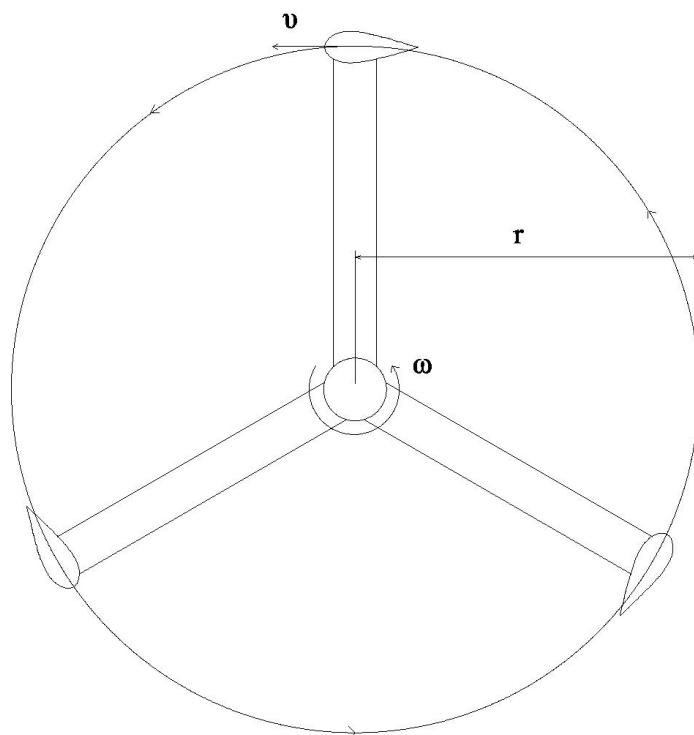
4.6.1.1 Tyngdacceleration

SeaTwirl AB bistod med värden för maximal och minimal tyngdacceleration (0 till 11 g). En del av denna pulserande belastning antas vara centripetalkraften som är en reaktionskraft som orsakas av centrifugalaccelerationen. Därför undersöks storleken på denna.

Sökt: Antal g som orsakas av rotationen.

Givet:

$g = 9,82 \text{ m/s}^2$. Varvtalet $n = 15$ varv/min. Radien (r) avrundas till 25 m (r är avståndet från rotationscentrum till bladet), se Figur 23.



Figur 23: Rotationsrörelse. Egen figur

Antaganden:

Varvtalet (n) antas vara konstant, 15 varv/min (erhållet från SeaTwirl AB).

Fria variabler:

Inga fria variabler.

Lösning:

Antal g beräknas med följande formler:

$$\omega = \frac{2\pi}{60} n \quad (1)$$

$$v = \omega r \quad (2)$$

$$F = m \frac{v^2}{r} \quad (3)$$

$$F = mG \quad (4)$$

(1), (2), (3) och (4) ger:

$$G = \frac{\left(\frac{2\pi * n}{60}\right)^2 * r}{g} = 6,28 [g]$$

Slutsats:

Centripetalkraften som är en reaktionskraft orsakad av centrifugalaccelerationen orsakar tyngdaccelerationen 6,28 g som är en del av den totala belastningen som pulserar mellan 0 och 11g. Resterande belastning antogs komma från yttre påfrestningar som vind och dylikt. Dessa observerades alltså men behandlades ej i detta arbete.

4.6.1.2 Antal skruvar vid pulserande radiell last

Här eftersöks den erforderliga mängden skruvar som behövs för att bära upp den cykliska lasten. Denna initierande beräkning ligger till grund för fortsatta beräkningar.

Sökt: Erforderlig mängd skruvar för att bära upp den cykliska lasten.

Givet:

Pulserande massacceleration mellan $G_{min} = 0 g$ och $G_{max} = 11 g$. Bladets massa $m_{blad} = 3500 kg$. $g = 9.82 m/s^2$. Skruvens utmattningssträckgräns $\sigma_{skruv}^{g,max} = 35 MPa$ [18]. $d_1 = 0,026211 m$ (M30) [8]

Antaganden:

Skruvarna ska dras genom bladet och måste därför vara minst 500 mm, för att skruvarna ska klara av vridmomentet vid förspänning antas M30 som skruvstorlek.

Fria variabler:

Inga fria variabler.

Lösning:

Först konstaterar vi utmattning varför vi tar fram

$$G_{amplitud} = \frac{G_{max} - G_{min}}{2} = 5.5 g$$

Den cykliska kraften $F_{a,blad}$ för ett stag ges av

$$F_{a,blad} = \frac{m_{blad} * G_{amplitud}}{2} \approx 94.5 kN$$

En M30 skruv har tvärsnittsarean

$$A_{skruv} = \frac{\pi * d_1^2}{4} = 539,5815 * 10^{-6} m$$

Den erforderliga mängden skruvar n_{skruv} ges av

$$n_{skruv} = \frac{F_{a,blad}}{A_{skruv} * \sigma_{skruv}^{max}} = 5,0048 \text{ st}$$

Slutsats:

Skruvantalet måste avrundas uppåt till $n_{skruv} = 6$. Ett jämnt antal skruvar är också bättre ur konstruktionssynpunkt.

4.6.1.3 Skjuvspänning i skruvar

Sökt:

Maximal skjuvspänning, τ_{skruv}

Givet:

$F_{tan} = 250000N$ (erhållet från SeaTwirl AB)

$A_{skruv} = 539,5815 * 10^{-6} m$

$n_{skruv} = 6st$

Antaganden:

Fallet betraktas som statiskt där $F_{tan} = 250000N$ (förenklat). Tyngdkraften som orsakas av stagets egentyngd är mindre än F_{tan} , därför beräknas endast skjuvspänningen orsakade av F_{tan} . $\sigma_{skruv} = 640 \text{ MPa}$ [19], skruven antas utsättas för ren skjuvspänning (skjuvning i endast en riktning), enligt Von Mises [20] fås

$$\tau_{max} = \frac{\sigma_{skruv}}{\sqrt{3}} \approx 370 \text{ MPa}$$

Lösning:

Lasten F_{tan} fördelas på två stag

$$\tau_{skruv} = \frac{F_{tan}}{2 * n_{skruv} * A_{skruv}} \approx 38,61 \text{ MPa} < \tau_{max}$$

Slutsats:

Skjuvningen i skruvarna utgör ingen risk för brott.

4.6.1.4 Skjuvning skum

Skjuvning uppstår mellan skummet (Divinycell H250) och laminathylsan samt mellan skummet och innerbalkarna. Genom att ta reda på tillåten skjuvarea på för skummet (A_{H250}) kan denna jämföras med skummets kontaktareor mot laminathylsan ($A_{mantel}^{laminat}$) och innerbalken (A_{balk}^{min}).

Sökt: A_{H250}

Givet:

$$D_{\text{laminat}} = 62 \text{ mm.}$$

$$\tau_{H250} = 2,8 \text{ MPa [9].}$$

$$L_{\text{hylsa}} = 0,42 \text{ m}$$

$$A_{\text{Balk}}^{\text{min}} = 0,043175 \text{ m}^2 \text{ (Minsta kontaktarean mellan balk och skum)}$$

Antaganden:

P.g.a. att data för utmattning hos H250 saknas betraktas detta endast som ett statiskt fall vid skjuvning av skum och utgår ifrån att kraften $F_{\text{förband}}$ som är den maximala kraften. $F_{\text{förband}}$ är den approximerade kraften som ansätts på ett skruvförband.

Lösning:

Inledningsvis undersöks vilken area som krävs för att ta upp skjuvspänningarna orsakade av den statiska lasten $F_{\text{förband}}$

$$F_{\text{förband}} = \frac{m_{\text{blad}} * G_{\text{max}}}{2 * n_{\text{skruv}}} \approx 31,506 \text{ kN} \quad (5)$$

$$\tau_{H250} = \frac{F_{\text{förband}}}{A_{H250}} \quad (6)$$

(5) och (6) ger

$$A_{H250} = \frac{F_{\text{förband}}}{\tau_{H250}} \approx 0,00113 \text{ m}^2$$

$$A_{\text{balk}}^{\text{min}} > A_{H250}$$

$$A_{\text{mantel}}^{\text{laminat}} = D_{\text{laminat}} * \pi * L_{\text{hylsa}} = 0,0818 \text{ m}^2 > A_{H250}$$

Slutsats:

Hylsornas kontaktarea mot skummet klarar av skjuvning. Kontaktarean mellan skummet och inner-balkarna är större än A_{H250} och klarar därför av skjuvningen.

4.6.1.5 Skjuvning hylsa

Skjuvning uppstår mellan stålhylsa och laminathylsa, därför undersöks skjuvspänningen och kontaktarean mellan dessa.

Sökt: $A_{\text{laminat, erf}}$

Givet:

$$D_{\text{hylsa}} = 42 \text{ mm}$$

$$F_{\text{förband}} = 31,506 \text{ kN}$$

$$\tau_{\text{laminat}} = 57,7 \text{ MPa (Värdet är erhållet från SeaTwirl AB)}$$

$$L_{\text{hylsa}} = 0,42 \text{ m (approximerat eftersom att hylsorna är olika långa)}$$

Lösning:

$$\tau_{laminat} = \frac{F_{förband}}{A_{laminat,erf}} \quad (7)$$

(7) ger

$$A_{laminat,erf} = \frac{F_{förband}}{\tau_{laminat}} \approx 0,000546m^2$$
$$A_{Mantel}^{Hylsa} = D_{hylsa} * \pi * L_{hylsa} = 0,0554m^2 > A_{laminat,erf}$$

Slutsats:

Kontaktarean mellan hylsa och laminat är fullt tillräcklig för att överföra skjuvspänningen. Observera att denna arean är den minsta skjuvarean i konstruktionen, därför är det här som limfogen undersöks.

4.6.1.6 Skjuvning av lim i kontaktyta mellan hylsa och laminathylsa

Trots att laminatet i detta fall är laminerat direkt på stålhylsan är förbandsmetoden ett limförband. Vi undersöker därför om detta förband håller. Det lim som används som exempel är ett epoxylim av typ EB-260 där max skjuvspänning har hämtats från [21].

Sökt:

Max skjuvspänning i limfog mellan hylsa och laminat hylsa.

Givet:

$$A_{Mantel}^{Hylsa} = 0,0554m^2$$
$$F_{förband} = 31,506kN$$
$$\tau_{EB-260}^{max} = 31 MPa$$

Lösning:

$$\tau_{laminat} = \frac{F_{förband}}{A_{Mantel}^{Hylsa}} \approx 5,7 MPa < 31 MPa$$

Slutsats:

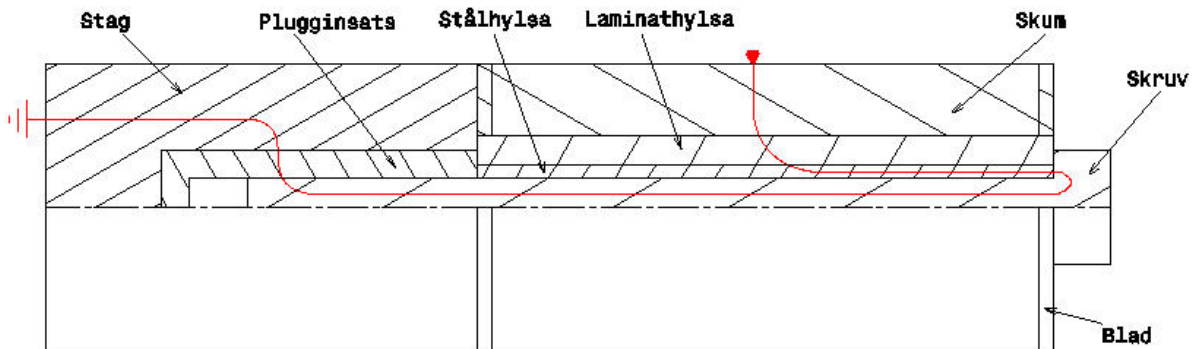
Här syns tydligt att skjuvspänningen i limförbandet är mycket lägre än den tillåtna skjuvspänningen. Då detta är den minsta skjuvytan i konstruktionen bevisar den att alla andra skjuvytor också kommer att hålla.

4.6.2 Koncept 1

För koncept 1 så illustreras först kraft-vägen för att visa hur kraften passerar genom förbandet och ge förståelse för vidare beräkningar. Enkla beräkningar utförs sedan på plugginsatserna och skruvförbandet för att säkerställa att alla komponenter har rimliga dimensioner.

4.6.2.1 Kraftväg

Förspänningen på skruvförbandet orsakar en inre kraftloop mellan insats, hylsa och skruv. Innerbalken i bladet tar upp två krafter, vindens tryckkraft och konstruktionens centripetalkraft. Kraften går genom balken till skummet via skjuvning i limförband och vidare från skummet till laminathylsan och sedan stålhylsan via skjuvning i limförband, se Figur 24. Kraften fortsätter genom stålhylsan till skruvhuvudet och sedan ner genom skruven och ut genom plugginsatsen via skjuvning i limförband till staget som betraktas som jord. Nedan i Figur 24 ser vi en mycket schematisk beskrivning av kraftflödet.



Figur 24: Mycket förenklad bild av kraftväg. Egen figur

4.6.2.2 Plugginsatser

Sökt:

Klarar plugginsatserna av lastfallet

Givet:

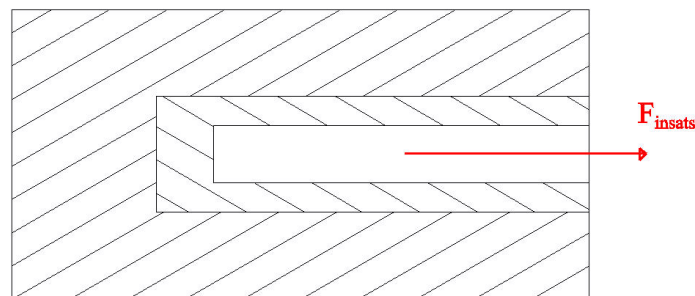
$F_{max} = 700 \text{ kN}$ [16] (Figur 25. kraftens angreppspunkt.)

$F_{a,stag} = 94,5 \text{ kN}$

$n_{skruv} = 6\text{st}$

$G_{max} = 11 \text{ g}$

$m_{blad} = 3500 \text{ kg}$



Figur 25: Genomsnittsbild av plugginsats. Egen figur

Lösning:

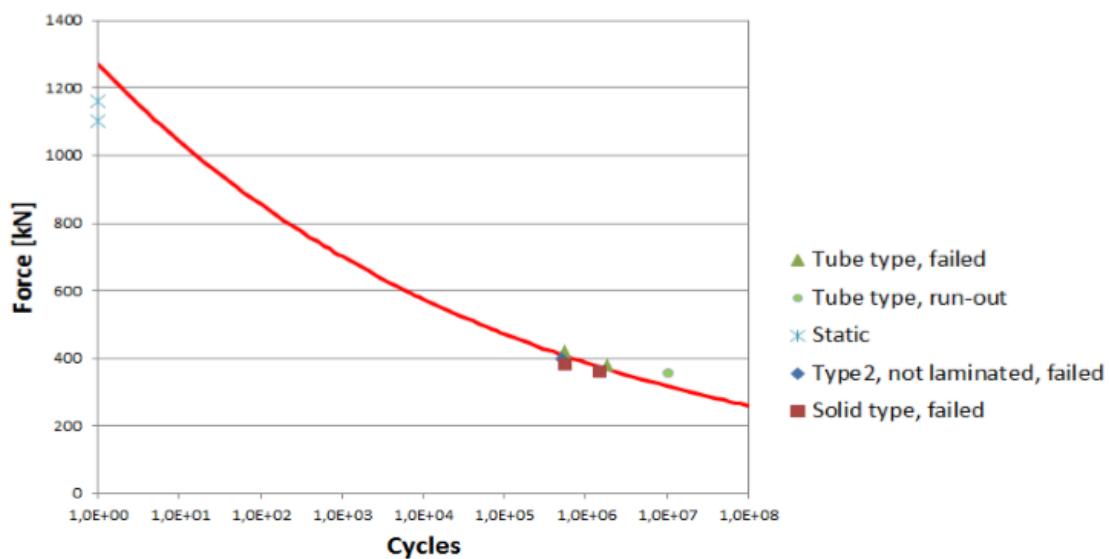
För att undersöka om plugginsatserna håller för statiska last jämförs F_{insats} med F_{max}

$$F_{insats} = \frac{m_{blad} * G_{max}}{2 * n_{skruv}} \approx 31,51 \text{ kN} < F_{max}$$

Den cykliska lasten ($F_{a,blad}$) delas med antalet skruvar (n_{skruv}) för att ta fram lasten på varje insats.

$$F_{a,insats} = \frac{F_{a,dtsg}}{n_{skruv}} \approx 18,89kN$$

Genom att jämföra $F_{a,insats}$ och utmattningskurvan i Figur 26 så framgår det att insatserna belastas under utmattningsgränsen.



Figur 26: Utmattnings-kurva för Fiberline Composites plugginsats. Figur tillhandahållen av Fiberline Composites [5].

4.6.2.3 Skruvförband plugginsats

Här undersöks ett skruvförband vid användning av plugginsats enligt tekniken som beskrivs i Mägi och Melkerssons bok om maskinelement [8]. Tillvägagångssättet är helt hämtat från denna bok och kommer inte att refereras till vidare genom beräkningen.

Sökt:

σ_s , σ_k , $\sigma_{a,s}$ och $\sigma_{a,k}$ för att säkerställa att förbandet håller vid både statisk och dynamisk last.

Givet:

Givna värden som är relevanta för beräkningen redovisas i Tabell 1.

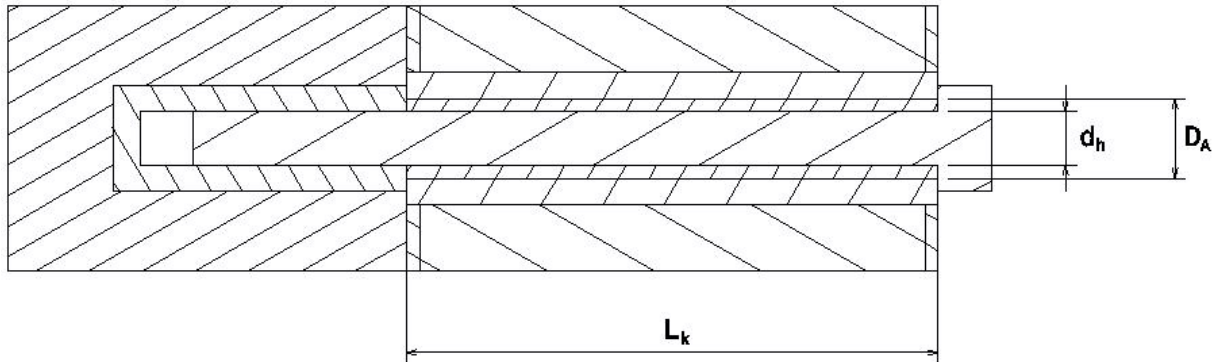
Tabell 1. Värden för beräkningar

n_{skruv}	6 st	G_{min}	0g
L_k	0,42m	G_{max}	11g
d_h	0,033 m	$\sigma_{stål}^{max}$	634 MPa
D_A	0,042m	$\sigma_{stål}^{a,max}$	406 MPa
A_{skruv}	$539,5815 * 10^{-6}m$	σ_{skruv}	640 MPa

E_{skruv}	200 GPa	$\sigma_{a,skruv}$	35 MPa
$E_{stål}$	200 GPa		

Stålet som används är Stainless AISI, martensitic, AISI 410, intermediate temper [9] och används till bl.a. till skruvar, muttrar och hylsor.

Figur 27 visar en förenklad bild av förbandet och några av de mått som anges.



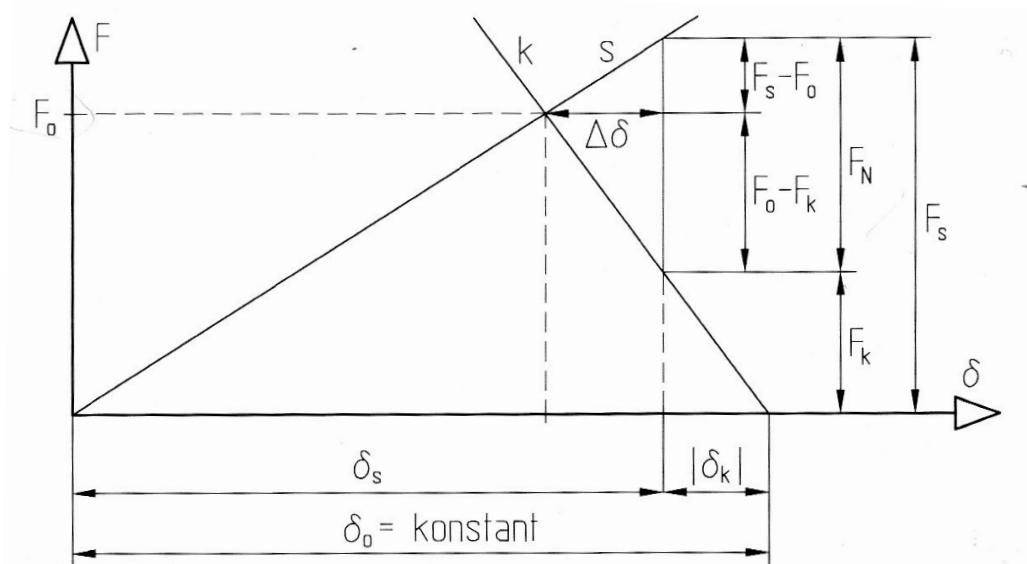
Figur 27: Förenklad bild av förbandet. Egen figur

Antagande:

Förspänningskraften beräknas genom att anta att spänningen orsakad av förspänningen är 70% av skruvens sträckgräns, $\sigma_{skruv} = 640 \text{ MPa}$ ($\sigma_{a,skruv} = 35 \text{ MPa}$) [19]. Insatsen antas vara stel.

Lösning:

Sambandet mellan de olika krafterna i skruvförband kan beskrivas med ett F- δ -diagram, se Figur 28.



Figur 28: F- δ -diagram [8].

Vi börjar med att räkna ut förspänningskraft F_0

$$F_0 = \sigma_{skruv} * 0,7 * A_{skruv} = 241,73 \text{ kN}$$

Hylsan betraktas som en tunn hylsa och arean för denna beräknas med formeln

$$A_{ekv} = \frac{\pi}{4} (D_A^2 - d_h^2)$$

Skruvens styvhetsfaktor (c_s) och rörets styvhetsfaktor (c_k)

$$c_s = \frac{A_{skruv} * E_{skruv}}{L_k}$$

$$c_k = \frac{A_{ekv} * E_{stål}}{L_k}$$

Yttre pålagd pulserande last $F_{N,min}$ och $F_{N,max}$ beräknas enligt

$$F_{N,min} = \frac{m_{blad} * G_{min}}{2 * n_{skruv}} = 0$$

$$F_{N,max} = \frac{m_{blad} * G_{max}}{2 * n_{skruv}} = 31,51 \text{ kN}$$

Tvåan kommer av att enbart en fog undersöks. n läggs till för att enbart ett skruvförband undersöks.

Fjäderkrafterna ($F_{s,min}$ och $F_{s,max}$) och krafterna i hylsan ($F_{k,min}$ och $F_{k,max}$) beräknas nedan

$$F_{s,min} = F_0 + \frac{c_s}{c_s + c_k} F_{N,min} = F_0 = 241,73 \text{ kN}$$

$$F_{s,max} = F_0 + \frac{c_s}{c_s + c_k} F_{N,max} = 257,62 \text{ kN}$$

$$F_{k,min} = F_0 - \frac{c_k}{c_s + c_k} F_{N,max} = 226,12 \text{ kN}$$

$$F_{k,max} = F_0 - \frac{c_k}{c_s + c_k} F_{N,min} = F_0 = 241,73 \text{ kN}$$

Statiska maxlaster

$$\sigma_s = \frac{F_{s,max}}{A_{skruv}} = 477,45 \text{ MPa} < \sigma_{skruv}$$

$$\sigma_k = \frac{F_{k,max}}{A_{ekv}} = 455,98 \text{ MPa} < \sigma_{stål}^{a,max}$$

Med den pulserande skruvkraften $F_{a,s}$ och skruvens tvärsnittsarea A_{skruv} beräknas amplitudspänningen $\sigma_{a,s}$.

$$F_{a,s} = \frac{F_{s,max} - F_{s,min}}{2} = \frac{F_{s,max} - F_0}{2} \approx 7,95 \text{ kN}$$

$$\sigma_{a,s} = \frac{F_{a,s}}{A_{skruv}} = 14,73 \text{ MPa} < \sigma_{a,skruv}$$

Hylsan utsätts också för en pulserande kraft, $F_{a,k}$, som tillsammans med hylsans tvärsnittsarea A_{ekv} beräknas amplitudspänningen $\sigma_{a,h}$.

$$F_{a,k} = \frac{F_{k,max} - F_{k,min}}{2} = \frac{F_0 - F_{k,min}}{2} \approx 7,81 \text{ kN}$$

$$\sigma_{a,k} = \frac{F_{a,k}}{A_{ekv}} = 14,73 \text{ MPa} < \sigma_{stål}^{a,max}$$

Slutsats:

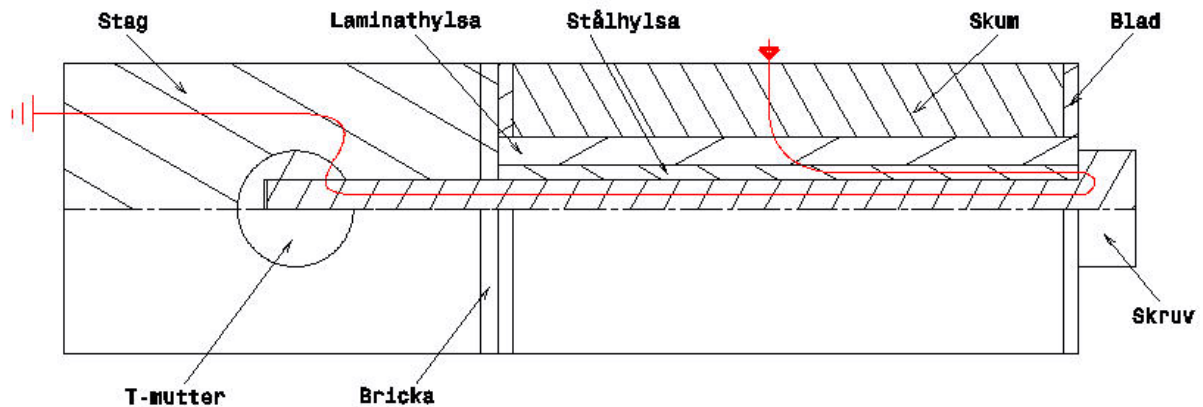
Skruvförbandet kommer att klara av den förspänningskraft och last som bladet orsakar. Spänningen i hylsan ligger under sträckgränsen om seghärdat stål används. Om seghärdat stål inte kan tänkas användas och t.ex. vanligt normaliserat konstruktionsstål används istället måste diametern på hylsan ökas vilket bidrar till en högre vikt på konstruktionen.

4.6.3 Koncept 2

För koncept 2 så illustreras först kraft-vägen för att visa hur kraften passerar genom förbandet och ge förståelse för vidare beräkningar. Grundläggande beräkningar utförs sedan på skruvförbandet och T-bultarna för att säkerställa att alla komponenter har rimliga dimensioner.

4.6.3.1 Kraftväg

Vid användning av T-insatser ser kraft-vägen ut på liknande sätt som för plugginsatser, skillnaden är att kraften går via kontaktryck mellan en T-mutter och stagets laminat istället för via skjuvning i ett limförband vid tidigare används plugginsats. Förspänningen av skruvförbandet med T-insatser orsakar en inre kraftloop mellan skruv, hylsa, bricka, stag och T-mutter. Nedan i Figur 29 visas en mycket schematisk beskrivning av kraftflödet.



Figur 29 Mycket förenklad bild av kraftväg. Egen figur

4.6.3.2 Skruvförband T-insatser

På samma sätt som Skruvförband plugginsatser beräknas spänningarna i skruvförbandet för T-insatser. Beräkningarna gav följande resultat:

$$\sigma_s \approx 480,1 \text{ MPa} < \sigma_{skruv}^{max}$$

$$\sigma_{hylsa} \approx 456,0 \text{ MPa} < \sigma_{stål}^{max}$$

$$\sigma_{laminat} \approx 30,07 \text{ MPa} < \sigma_{glasfiber}^{max}$$

$$\sigma_{a,s} \approx 16,07 \text{ MPa} < \sigma_{skruv}^{g,max}$$

$$\sigma_{a,hylsa} \approx 13,36 \text{ MPa} < \sigma_{stål}^{g,max}$$

$$\sigma_{a,laminat} \approx 0,8809 \text{ MPa} < \sigma_{glasfiber}^{g,max}$$

Beräkningarna presenteras utförligt i bilaga 4.

Slutsats:

Skruvförbandet kommer att klara av den förspänningskraft och last som bladet orsakar. Spänningen i hylsan ligger under sträckgränsen om seghärdat stål används. Om seghärdat stål inte kan tänkas användas och t.ex. vanligt normaliserat konstruktionsstål används istället måste diametern på hylsan ökas vilket bidrar till en högre vikt på konstruktionen.

4.6.3.3 Hålkanttryck T-insats

Sökt: T-mutterns erforderliga diameter ($D_{T-mutter}$) i förhållande till tillåtet hålkanttryck för komposit och stål.

Givet:

$$d_h^{grov} = D_{skruvhål} = 0,035 \text{ m}.$$

$$\sigma_{kontakt}^{max} = 100 \text{ MPa} \text{ (värdet är tillhandahållet av SeaTwirl AB)}$$

$$\sigma_{a,kontakt}^{max} = 30 \text{ MPa} \text{ (värdet är tillhandahållet av SeaTwirl AB)}$$

$$F_{s,max} = 259,08 \text{ kN} \text{ (bilaga 4)}$$

$$F_{a,s} = 8,67 \text{ kN} \text{ (bilaga 4)}$$

Antagande:

Tjockleken på laminatet ($t_{laminat}$) är 0,09m. Formfaktor $K_t = 3$ [20].

Lösning:

Till en början konstateras likheten

$$\sigma_{kontakt}^{max} = \frac{3 * F_{s,max}}{A_{kontakt}} \quad (8)$$

$$\sigma_{a,kontakt}^{max} = \frac{3 * F_{a,s}}{A_{kontakt}} \quad (9)$$

Sedan definieras $A_{kontakt}$ i enighet med Dahlbergs definition av projicerad kontaktarea [20] och med subtraktion av hålarean för skruven

$$A_{kontakt} = D_{T-mutter} * t_{laminat} - \frac{D_{skruvhål}^2 * \pi}{4} \quad (10)$$

Vi tittar på tjockleken på muttern vid statisk maximal last genom att ta (8) och (10)

$$D_{T-mutter} = \frac{\frac{3 * F_{s,max}}{\sigma_{kontakt}^{max}} + \frac{D_{skruvhål}^2 * \pi}{4}}{t_{laminat}} = 0,0192m$$

På samma sätt undersöker minsta diameter vid dynamisk last genom att ta (9) och (10)

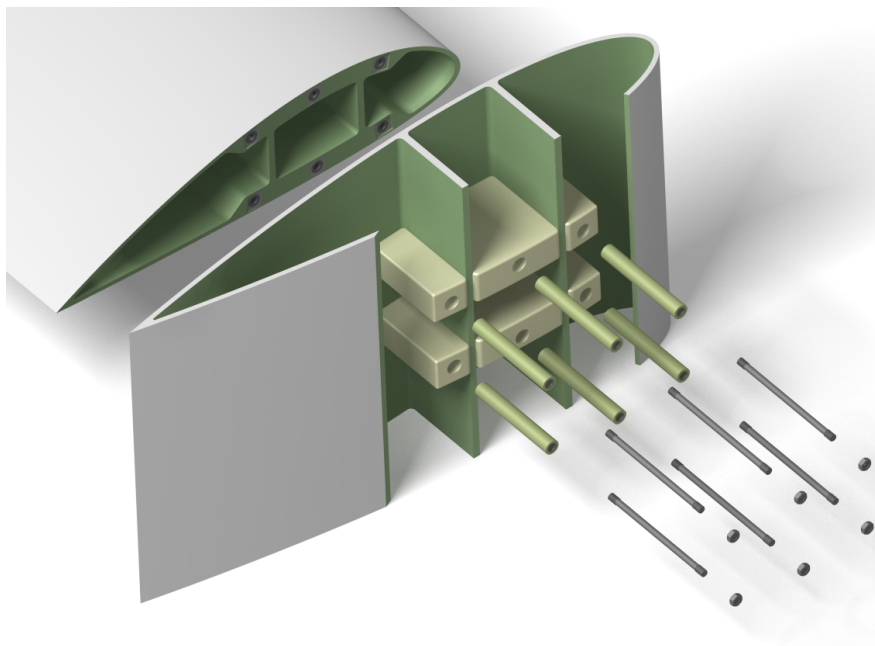
$$D_{T-mutter} = \frac{\frac{3 * F_{a,s}}{\sigma_{a,kontakt}^{max}} + \frac{D_{skruvhål}^2 * \pi}{4}}{t_{laminat}} = 0,0970m$$

Slutsats:

Diametern för T-muttern måste vara större än 97mm, $D_{T-mutter}$ väljs till 100mm (0,01m).

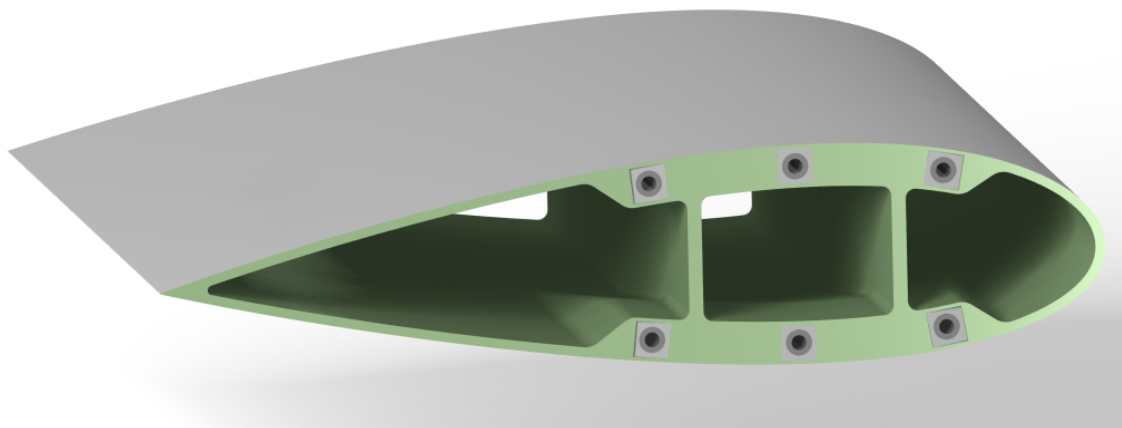
4.7 Vidareutveckling av koncept 1

Detta kapitel tar endast upp förändringar på koncept 1, se kapitel 4.2.1 för att få en utförlig beskrivning av funktioner, tillverkning och montering. Beräkningarna resulterade i mer exakta dimensioner, dessa redovisas i form av 2D-ritningar i bilaga 5, se även sprängd vy i Figur 30. Vid vidareutveckling av koncept 1 väljs två innerbalkar istället för en. Orsaken är att om endast en balk används blir det svårt att centrera sex skruvar kring den approximerade tyngdpunkten i bladet utan att göra hål i innerbalken. Detta bör undvikas då det minskar hållfastheten i balken. Två balkar ger även mer area mellan balkarna och skummet vilket är bättre vid fördelning av skjuvspänning.



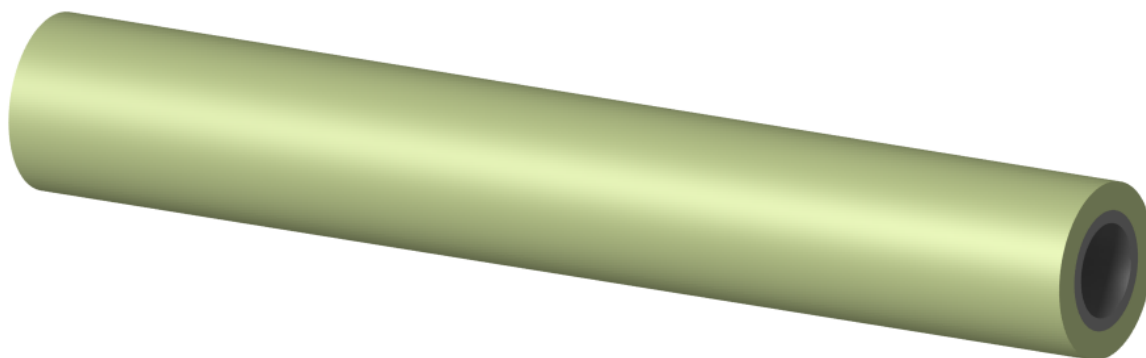
Figur 30: Sprängd vy av Koncept 1 med genomskäring av bladet. Egen figur

Plugginsatser för M30-skruvar väljs, se motivering i kapitel 4.5. Valet att använda plugginsatser för M30-skruvar leder till att laminatet behöver vara tjockare (90 mm) för att rymma plugginsaterna, se Figur 31.



Figur 31: Stag med M30-plugginsater. Egen figur

För att minska skillnaden i styvhet vid övergången mellan hylsorna och skummet omsluts hylsorna med glasfiber (glasfiber har högre styvhet än skum och lägre än stål), se Figur 32. Detta gäller för både koncept 1 och koncept 2.



Figur 32: Stålhylsa med laminat. Egen figur

4.7.1 Uppskattad vikt och materialkostnad

För att få en bild av konceptets vikt används 3D-modellen i Catia. Där plockas de olika komponenternas volymer ut och dess vikt beräknas tillsammans med materialegenskaperna beskrivna i Tabell 2. Egenskaper för konstruktionsmaterial till koncept 1. Tabell 2.

Tabell 2. Egenskaper för konstruktionsmaterial till koncept 1.

Material	Vikt	Pris
Stål	7800 kg/m ³	13 sek/kg
Glasfiber	1900 kg/m ³	295 sek/kg
Skum (H250)	250 kg/m ³	145 sek/kg
Plugginsats	9 kg/st	2000 sek/st

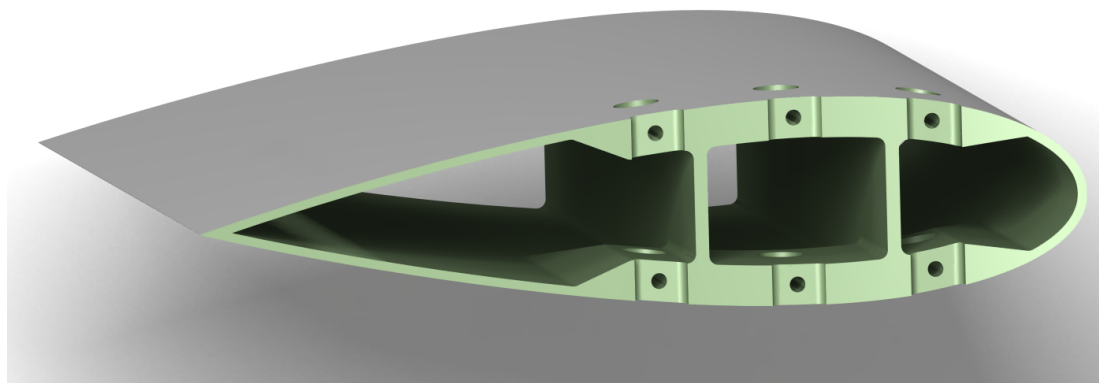
Den beräknade massan för varje komponentgrupp finns redovisad i Tabell 3. Här finns även materialpriset per komponentgrupp utskriven. Materialpriset är beräknat med varje komponentgrupps massa och med kilopriset från Tabell 2 med undantag från plugginsatserna som har en specificerad massa och ett specificerat pris per enhet. Allt detta resulterar i en totalt till stag och blad en adderad massa på ungefär 180kg och ett totalt materialpris på 39000sek.

Tabell 3. Beräknad massa och pris för konstruktionens komponenter samt total summa

Komponenter	Material	Massa (kg)	Materialpris (sek)
Stag (Adderat glasfiber)	Glasfiber	74,10	21859,5
Plugginsatser	(Ej specificerat)	54,00	12000
Skruvar och muttrar	Stål	15,60	202,8
Skum	Divinycell H250	18,75	2717,78
Hylsor	Stål	7,44	96,72
Laminat kring hylsor	Glasfiber	7,60	2242
Total ≈		180	39000

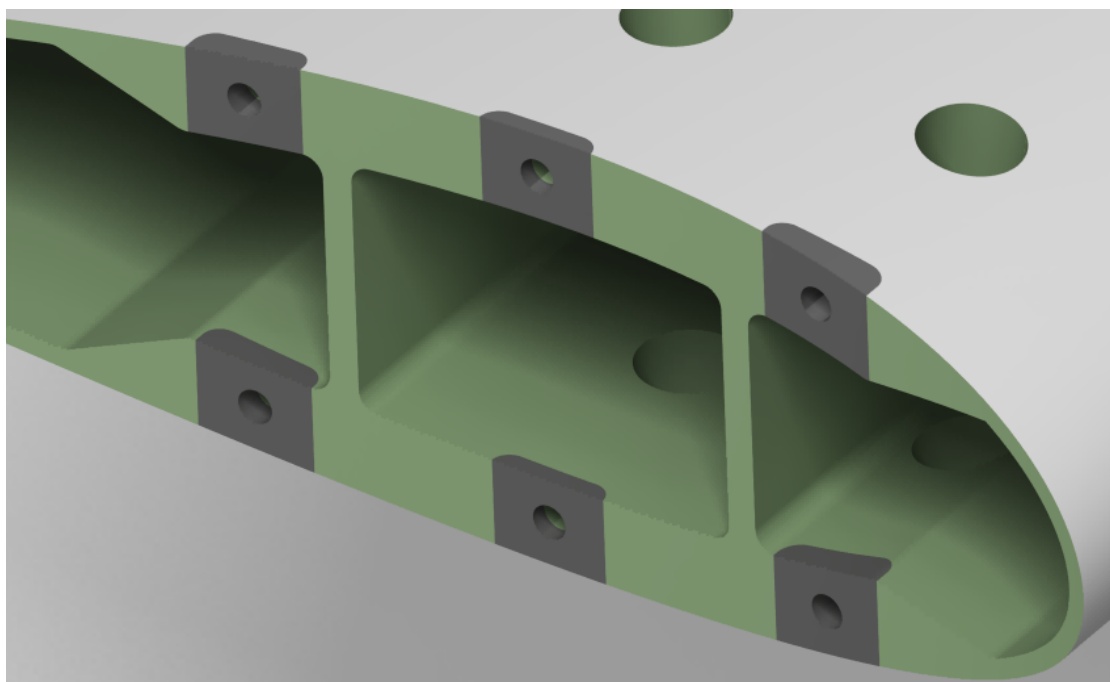
4.8 Vidareutveckling av koncept 2

Då bladets utformning är gemensam för koncept 1 och koncept 2 så ser vidareutvecklingen av den delen av konstruktionen likadan ut. Utöver övergripande förfining som radieövergångar och andra åtgärder för att undvika geometriskt orsakade spänningskoncentrationer gjordes större ingrepp i konstruktionen. Utifrån beräkningarna utförs följande förändringar i staget. Laminatets tjocklek vid T-insatserna ökas från 70mm till 90mm. Detta för att ge gott om plats för M30-skruvarna att gå genom laminatet longitudinellt och även för att ge större projicerad kontaktyta för att undvika hålkantsbrott vid T-insatsen. I samma avseende ökas T-insatsens från 60mm till 100mm. En iso-vy över staget ses i Figur 33.



Figur 33. Isovy över stag för koncept 1. Egen figur

Det konstateras även att mötet mellan stålhylsan och stagets laminat sker på för liten yta. Då detta är ett konceptprojekt observeras detta och åtgärdas provisoriskt med en bricka för att sedan lämnas till framtida arbete. Dessa provisoriska brickor finns att se i Figur 34.



Figur 34. Provisoriska brickor för spänningsfördelning. Egen figur

4.8.1 Uppskattad vikt och materialkostnad

Massa och pris beräknas för koncept 2 på samma sätt som för koncept 1, se därför avsnitt 4.7.1 för tillvägagångssätt. Här landar koncept 1 på en totalt adderad massa på 212kg och ett totalt materialpris på 37000kr, se Tabell 4.

Tabell 4 Beräknad massa och pris för konstruktionens komponenter samt totalt summa.

Komponenter	Material	Massa (kg)	Materialpris (sek)
T-insatser	Stål	31,2	405,6
Brickor	Stål	17,3	224,9
Stag (Adderat glasfiber)	Glasfiber	104,5	30827,5
Skruvar och muttrar	Stål	23,4	304,2
Skum	Divinycell H250	18,8	2718,75
Hylsor	Stål	7,4	96,2
Laminat kring hylsor	Glasfiber	7,6	2242
Total ≈		212	37000

5 Slutsats

5.1 Slutgiltiga koncept

Arbetet resulterade i två koncept som betraktas som realiserbara och som överlämnas för vidareutveckling till SeaTwirl AB. Även om båda koncepten är realiserbara anses Koncept 1 vara det bästa konceptet av dessa två. Koncept 1 har visserligen 2000 kronor högre materialkostnader men koncept 2 anses vara mer komplicerad att tillverka. Koncept 2 använder T-insatserna som kräver fler moment vid tillverkning och montering jämfört med koncept 1 som använder plugginsatser. Här antas alltså tillverkningskostnaden bli dyrare för T-insatser än för plugginsatser vilket väger upp för den något dyrare materialkostnaden hos plugginsatserna. Koncept 1 väger dessutom ca 30 kg mindre än koncept 2 vilket i sig är en avgörande faktor. Slutligen väger koncept 2 mer än 200 kg vilket gör att det i detta skede av konstruktionsprocessen inte uppfyller kraven. För att förtydliga kan vidare kontrollberäkningar och viktoptimering leda till att det väger mindre än 200kg vilket är anledningen till att det inte valts bort helt.

5.2 Tillvägagångssätt

Materialvalen under projektets gång har ej varit specifika, förutom skummet Divinycell H250 då detta ansågs vara en svagare punkt och krävde därför mer precision. Det har observerats att material med de egenskaper som efterfrågats existerar. För att vara på den säkra sidan användes konstant siffror utifrån "worst case scenario" vid beräkningar. Exempelvis då vikten skall minimeras och densiteten för ett material enligt en källa varierar mellan två tal har det högre talet använts. På så sätt har en säkerhetsmarginal byggts in i konstruktionen via beräkningarna. Framtida mer exakta materialval skall alltså enbart kunna förbättra konstruktionen och ej stjälpa den. En stor erfarenhetsbrist vad gäller användande av fiberkompositer har under hela arbetet existerat. Användning av fiberkompositer i de konstruerade koncepten bör betraktas därefter.

Tillverkningsmetoder och tillverkningskostnad har endast tagits upp på en grundläggande nivå under arbetets gång. Tillverkningskostnad togs ändå upp som en viktig parameter i konceptvalet och bedömdes där utifrån vilka material som användes och vilken precision som efterfrågades. Detta gav då en bild stark nog att jämföra konceptens prestation inom detta område med varandra. På det här stadiet med rådande resurser var det dock omöjligt att få en faktisk siffra på tillverkningskostnaden.

Beräkningarna visar att koncepten håller för de laster som fogen utsätts för. Dessa beräkningar är dock grundläggande vilket gör att lösningarna inte med säkerhet kommer att klara av de laster som de kommer att utsättas för. Mer utförliga beräkningar på hållfasthet hade kunnat genomföras i ett tidigare skede av projektet för att ge en mer realistisk bild av koncepten i relation till varandra. P.g.a. begränsade resurser (kunskap, erfarenhet och tid) valdes det befintliga tillvägagångssättet av urval. Konstruktionsmässigt har måttoleranser utelämnats ur arbetet. Hålltoleranser har dock observerats i form av ett provisoriskt spel på 1-2mm vid hållpassning.

5.3 Framtida arbete

Vidare FEM-beräkningar bör genomföras för att säkerställa konceptets hållfasthet. P.g.a. att konservativa antaganden har gjorts vid dimensionering av koncepten kan FEM-beräkningar också tydliggöra om något är överdimensionerat. Vid beräkning av skummet har endast enkla skjuvningsberäkningar genomförts. Om vidare beräkningar visar att skummet inte håller p.g.a. andra faktorer kan extra laminat appliceras i bladet för att öka hållfastheten. Alla beräkningar av skjuvning förenklades till statiska fall, detta p.g.a. begränsade kunskaper av skjuvning och utmattning. Detta bör tas hänsyn till vid framtida arbete.

Brickorna till koncept 2 är, som nämnt tidigare, provisoriska och inkluderades endast för att observera att någon form av brickor behövs för att hylsorna i bladet inte ska krossa laminatet i staget vid belastning. Vidare arbete kräver därför rekonstruktion av brickorna. En metod eller lösning för hur hålbilden ska kunna projiceras från staget till bladet måste tas fram för att säkerställa god passform mellan stag och blad.

Ett av önskemålen var att bladen skulle vara segmenterade, detta är en god ide då det möjliggör en smidigare transport. Det visade sig dock vara svårt att applicera vid fogen. Då segmentering teoretiskt sätt går att applicera vart som helst på bladet kan det vara gynnsamt att undersöka om det finns något annat område än vid T-fogen där detta kan tillämpas.

Referenser

- [1] SeaTwirl AB, "Produkter," 07 02 2018. [Online]. Available: <https://seatwirl.com/sv/produkter/>.
- [2] SeaTwirl, "SeaTwirl homepage," 08 05 2018. [Online]. Available: <https://seatwirl.com/>.
- [3] National Aeronautics and Space Administration, "NACA airfoils," 04 05 2018. [Online]. Available: <https://www.nasa.gov/image-feature/langley/100/naca-airfoils>.
- [4] M. Peeters, G. Santo, J. Degroote och W. Van Paepegem, "The Concept of Segmented Wind Turbine Blades: A Review," MDPI, Ghent, 2017.
- [5] Fiberline Composites A/S, "Fiberline Composites - Create More With Less," 05 05 2018. [Online]. Available: <http://fiberline.com/>.
- [6] E. Hau, Wind Turbines, Berlin: Springer, 2013.
- [7] LM Wind Power, "ADWEN AND LM WIND POWER PARTNER TO PRESENT THE LONGEST BLADE IN THE WORLD," 21 06 2016. [Online]. Available: http://cws.huginonline.com/L/160830/PR/201606/2021942_5.html.
- [8] M. Mägi och K. Melkersson, Lärobok i maskinelement, Göteborg: EcoDev International AB, 2017.
- [9] CES Edupack, 2017.
- [10] K. Benzarti, L. Cangemi och F. Dal Maso, "Transverse properties of unidirectional glass/epoxy composites: influence of fibre surface treatments," Institut Français du Pétrole, Division Chimie Appliquée, Rueil-Malmaison, 2000.
- [11] K. Drechsler, S. Zaremba, L. Avila Gray och L. Eberl, "The effect of fiber undulation on the strain field for pinned composite/titanium joints under tension," i *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 103, 2017.
- [12] R. Kumar, E. Saether och D. Chang, DESIGN GUIDE FOR BOLTED JOINTS IN COMPOSITE STRUCTURES, Hawthorne, California: Northrop Corporation, Aircraft Division, 1986.
- [13] V. Kumar, S. Shankar och L. Shankar, "Experimental Study on Effect of Stacking Sequence, Clearance and Clamping Torque on Strength of FRP Composite Bolted Joints," Elsevier Ltd., n/a, 2017.
- [14] A. Johnson och G. Sims, "Mechanical properties and design of sandwich materials," National Physical Laboratory, Teddington, 1986.
- [15] H. Johannesson, J.-G. Persson och D. Pettersson, Produktutveckling - Effektiva metoder för konstruktion och design, Stockholm: Liber AB, 2013.
- [16] Fiberline Composites A/S, "Blade root reinforcements," 21 03 2018. [Online]. Available: <https://fiberline.com/wind-turbine-components/blade-root-reinforcements>.
- [17] Diab International AB, "Divinycell - H," 05 05 2018. [Online]. Available: <http://www.diabgroup.com/en-GB/Products-and-services/Core-Material/Divinycell-H>.
- [18] Svenska Nätverket för Skruvförband, "Handbok för skruvförband - Utmattning," 18 04 2018. [Online]. Available: http://extra.ivf.se/sfn_handbok/template.asp?lank=188.
- [19] Svenska Nätverket för Skruvförband, "Handbok för skruvförband - Skruvars hållfasthet," 18 04 2018. [Online]. Available: http://extra.ivf.se/sfn_handbok/template.asp?lank=200.
- [20] T. Dahlberg, Teknisk hållfasthetslära, Lund: Studentlitteratur AB, 2001.

- [21] Epoxyset inc, "EB-260," 07 05 2018. [Online]. Available: <https://www.epoxysetinc.com/products/eb-260/>.
- [22] Fiberline Composites, "Blade root reinforcements," 04 05 2018. [Online]. Available: <https://fiberline.com/wind-turbine-components/blade-root-reinforcements>.

Bilagor

Bilaga 1: Produktspecifikation

Chalmers		Dokumenttyp	Produktspecifikation				
		Projekt	Konstruktion av T-fog för vertikalt vindkraftverk				
Utfärdare: Jacob Hällgren, Anders Götvall			Skapad: 2018-01-24				
			Modifierad: 2018-02-01, 2018-03-05, 2018-05-08				
	Kriterier		Målvärde	K/O	Vikt	Verifieringsmetod	
1.	Funktion(er)						
	1.1 Sammanfoga strut och vinge	Skall sammanfoga tvärsnitt Naca 0018 (vertikalt) och 0023 (horisontellt)		K		Modell	
	1.2 Sammanfoga 2-delad vinge			Ö	1	Modell	
2.	Prestanda						
	2.1 Goda aerodynamiska egenskaper			Ö	5	Ockulärbesiktning	
	2.2 Klara de laster som anges	Klara av vingens egentynngd och de krafter som uppstår vid rotation		K		Beräkningar	
3.	Livslängd						
	3.1 Livslängd	Dimensionera mot utmattning (10^6 cykler)		K		Beräkningar	
	3.2 Klara av marina förhållanden	Material måste ha hög tolerans mot söt- och saltvatten		K		Teoretiskt underlag	
	3.3 Klara av UV-strålning	Material utsätts för UV-strålning måste ha hög tolerans mot UV-strålen		K		Teoretiskt underlag	
4.	Montering/hantering/underhåll						
	4.1 Smidigt underhåll/montering			Ö	2	Uppskatning	
	4.2 Smidig transport	Ska möjliggöra transport av vinge på vanliga vägar		Ö	2	Ockulärbesiktning	
5.	Dimensioner						
	5.1 Vikt	Max 200kg		K		Beräkningar	
	5.2 Minimera vikt			Ö	5	Modell/beräkningar	
7.	Ekonomi						
	7.1 Minimera materialkostnader			Ö	4	Beräkningar	
	7.2 Minimera tillverkningskostnader			Ö	4	Teoretiskt underlag	

Bilaga 2: Vikt och materialkostnader för förfinade koncept

Materialdata				
Material	Vikt (kg/m ³)	Pris (sek/kg)		
Stål	7800	13	(CES edupack)	
Glasfiber	1900	295	(CES edupack)	
Kolfiber	1500	356	(CES edupack)	
Skum (H250)	250	145	(Diab International AB, 2018)	
	Vikt (kg/st)	Pris (sek/st)		
Plugginsats	4	1200	(Vi antar att insatsen har samma densitet som stål)	
Initial koncept				
Koncept 1				
Komponenter	Material	Volym (m ³)	Massa (kg)	Materialpris (sek)
Adderad glasfiber	Glasfiber	0,044736842	85	25075
Skrubar, muttrar och hylsor	Stål	0,003589744	28	364
Skum	H250	0,152	38	5510
Plugginsatser	Plugginsatser	-	40	12000
Total	-	-	191	42949
Koncept 2				
Komponenter	Material	Volym	Massa (kg)	Materialpris (sek)
Adderad glasfiber	Glasfiber	0,044736842	85	25075
Skrubar, muttrar och hylsor	Stål	0,003846154	30	390
Skum	H250	0,152	38	5510
T-muttrar	Stål	0,004102564	32	416
Total	-	-	185	31391
Koncept 3				
Komponenter	Material	Volym	Massa (kg)	Materialpris (sek)
Adderad glasfiber	Glasfiber	0,063684211	121	35695
Skrubar, hylsor och muttrar	Stål	0,003589744	28	364
Skum	H250	0,176	44	6380
Total	-	-	193	42439
Koncept 4				
Komponenter	Material	Volym	Massa (kg)	Materialpris (sek)
Adderad kolfiber	Kolfiber	0,036666667	55	19580
Skrubar, hylsor och muttrar	Stål	0,002564103	20	260
Skum	H250	0,54	135	19575
Total	-	-	210	39415
Koncept 5				
Komponenter	Material	Volym	Massa (kg)	Materialpris (sek)
Adderad kolfiber	Kolfiber	0,015	22,5	8010
Skrubar, hylsor och muttrar	Stål	0,003589744	28	364
Skum	H250	0,2	50	7250
Total	-	-	100,5	15624

Bilaga 3: Pughs matris

Kriterier	Viktning	Referens	Koncept 1	Koncept 2	Koncept 3	Koncept 4	Koncept 5
		koncept 1					
Låg vikt	5			1	-1	-1	1
Låg materialkostnad	4			1	0	1	1
Låg tillverkningskostad	4			-1	-1	-1	-1
Låg aerodynamisk påverkan	5			0	-1	-1	0
Smidig transport	2			0	-1	1	-1
Smidig montering	2			-1	-1	-1	-1
Antal +					0	1	0
Antal -					5	4	5
Summa					-5	-3	-5
Viktad Summa				3	-18	-10	1
Kriterier	Viktning	Referens	Koncept 1	Koncept 2	Koncept 3	Koncept 4	Koncept 5
		koncept 3					
Låg vikt	5		1	1		1	1
Låg materialkostnad	4		0	1		1	1
Låg tillverkningskostad	4		1	1		1	-1
Låg aerodynamisk påverkan	5		1	1		0	1
Smidig transport	2		1	1		1	0
Smidig montering	2		1	1		-1	0
Antal +			5			3	1
Antal -			0			3	3
Summa			5			0	-2
Viktad Summa			18	22		13	10
Kriterier	Viktning	Referens	Koncept 1	Koncept 2	Koncept 3	Koncept 4	Koncept 5
		koncept 4					
Låg vikt	5		1	1	1		1
Låg materialkostnad	4		-1	1	-1		1
Låg tillverkningskostad	4		1	1	-1		0
Låg aerodynamisk påverkan	5		1	1	0		0
Smidig transport	2		-1	-1	-1		-1
Smidig montering	2		1	1	1		1
Antal +			4		3		1
Antal -			1		2		3
Summa			3		1		-2
Viktad Summa			10	18	-3		9

Kriterier	Viktning	Referens	Koncept 1	Koncept 2	Koncept 3	Koncept 4	Koncept 5
		koncept 5					
Låg vikt	5		-1	-1	-1	-1	
Låg materialkostnad	4		-1	-1	1	-1	
Låg tillverkningskostad	4		1	1	1	0	
Låg aerodynamisk påverkan	5		0	0	-1	0	
Smidig transport	2		1	1	0	1	
Smidig montering	2		1	1	0	-1	
Antal +			5		3	2	
Antal -			0		0	1	
Summa			5		3	0	
Viktad Summa			-1	-1	-2	-9	
Kriterier	Viktning	Referens	Koncept 1	Koncept 2	Koncept 3	Koncept 4	Koncept 5
		koncept 2					
Låg vikt	5		-1		-1	-1	1
Låg materialkostnad	4		-1		-1	-1	1
Låg tillverkningskostad	4		1		-1	-1	-1
Låg aerodynamisk påverkan	5		0		-1	-1	0
Smidig transport	2		0		-1	-1	-1
Smidig montering	2		1		-1	-1	-1
Antal +							
Antal -							
Summa							
Viktad Summa			-3		-22	-22	1
tot			24	42	-45	-28	21

Bilaga 4: Beräkningar T-insats

Här undersöks ett skruvförband vid användning av T-insats enligt tekniken som beskrivs i Mägi och Melkerssons bok om maskinelement [8]. Tillvägagångssättet är helt hämtat från denna bok och kommer inte att refereras till vidare genom beräkningen.

Sökt:

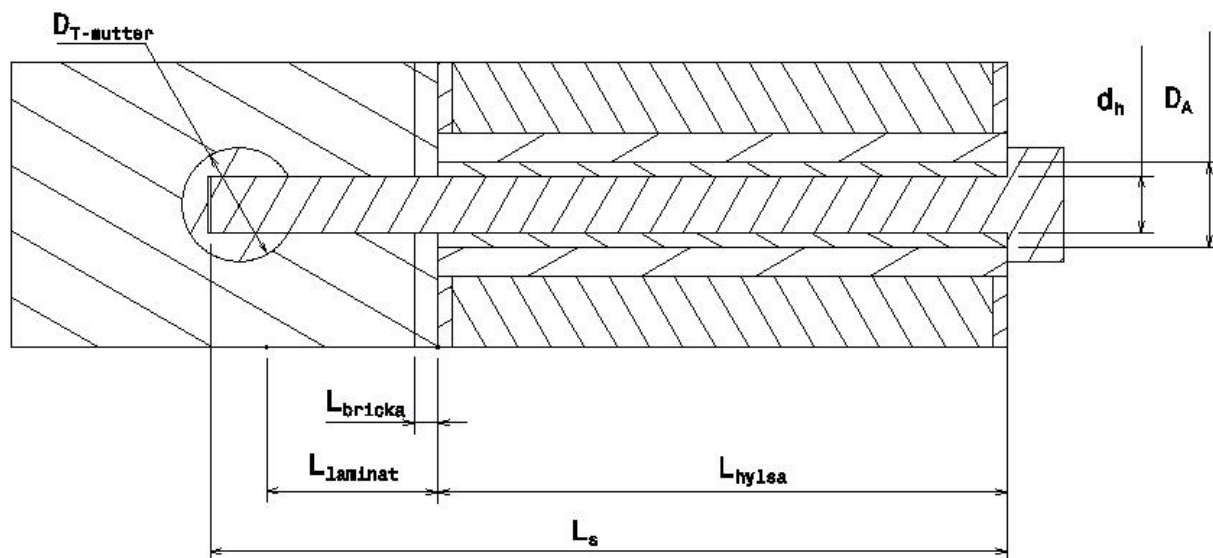
Vi söker σ_s , σ_{hylsa} , σ_{bricka} , $\sigma_{laminat}$, $\sigma_{a,s}$, $\sigma_{a,hylsa}$, $\sigma_{a,bricka}$ och $\sigma_{a,laminat}$ för att säkerställa att förbandet håller vid både statisk och dynamisk last.

Givet:

Stålet som används är seghärdat stål, se ref för värden på sträckgräns

n_{skruv}	6 st	G_{min}	0g
L_{hylsa}	0,5 m	G_{max}	11g
$L_{laminat}$	0,175 m	$E_{stål}$	200 GPa
d_h	0,033 m	$E_{laminat}$	40 GPa
$D_{A,hylsa}$	0,042 m	$\sigma_{stål}^{max}$	550 MPa
D_{T-bult}	0,06 m	$\sigma_{stål}^{a,max}$	406 MPa
$t_{laminat}$	0,09 m	$\sigma_{laminat}^{max}$	100 MPa
$d_{laminat}$	0,035m	$\sigma_{laminat}^{a,max}$	30 MPa
A_{skruv}	$539,5815 * 10^{-6} m$		

Figur:

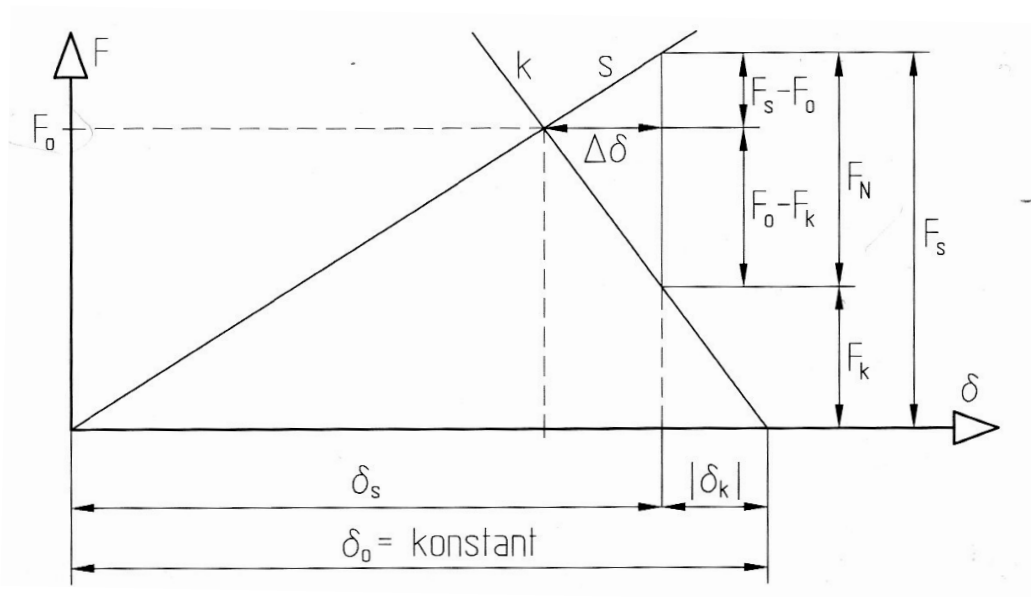


Antagande:

Förspänningskraften beräknas genom att anta att spänningen orsakad av förspänningen är 70% av skruvens sträckgräns, $\sigma_{skruv} = 640$ MPa ($\sigma_{a,skruv} = 35$ MPa) [19]. Skruvar och stålet antas ha samma E-modul (200 GPa).

Lösning:

Sambandet mellan de olika krafterna i skruvförband kan beskrivas med ett F- δ -diagram, se figur.



Vi börjar med att räkna ut förspänningskraft F_0

$$F_0 = \sigma_{skruv} * 0,7 * A_{skruv} \approx 241,73 \text{ kN}$$

Hylsan betraktas som en tunn hylsa och arean för denna beräknas med formeln ----

$$A_{hylsa} = \frac{\pi}{4} (D_A^2 - d_h^2)$$

Laminatet som kläms ihop betraktas som fall c. och där den klämda arean för denna beräknas med formeln

$$A_{laminat} = D_{T-bult} * t_{laminat} - \frac{\pi}{4} d_{laminat}^2$$

Brickan möter hylsan med den minsta kontaktarean A_{hylsa} , brickans area approximeras därför till A_{hylsa} .

Skruvens styvhetsfaktor (c_s) beräknas

$$c_s = \frac{A_{skruv} * E_{stål}}{L_k}$$

och de klämda delarnas styvhetsfaktorer (c_k)

$$c_{hylsa} = \frac{A_{hylsa} * E_{stål}}{L_{hylsa}}$$

$$c_{laminat} = \frac{A_{laminat} * E_{laminat}}{L_{laminat}}$$

$$c_{bricka} = \frac{A_{hylsa} * E_{stål}}{L_{bricka}}$$

$$c_k = \frac{1}{c_{hylsa}} + \frac{1}{c_{laminat}} + \frac{1}{c_{bricka}}$$

Yttre pålagd pulserande last $F_{N,min}$ och $F_{N,max}$ beräknas enligt. Tvåan kommer av att vi enbart tittar på en fog och n läggs till för att vi enbart undersöker ett skruvförband.

$$F_{N,min} = \frac{m_{blad} * G_{min}}{2 * n_{skruv}} = 0$$

$$F_{N,max} = \frac{m_{blad} * G_{max}}{2 * n_{skruv}} = 31,51 \text{ kN}$$

Fjäderkrafterna ($F_{s,min}$ och $F_{s,max}$) och krafterna i hylsan ($F_{k,min}$ och $F_{k,max}$) beräknas nedan

$$F_{s,min} = F_0 + \frac{c_s}{c_s + c_k} F_{N,min} = F_0 = 241,73 \text{ kN}$$

$$F_{s,max} = F_0 + \frac{c_s}{c_s + c_k} F_{N,max} \approx 259,08 \text{ kN}$$

$$F_{k,min} = F_0 - \frac{c_k}{c_s + c_k} F_{N,max} \approx 227 \text{ kN}$$

$$F_{k,max} = F_0 - \frac{c_k}{c_s + c_k} F_{N,min} = F_0 = 241,73 \text{ kN}$$

Statiska maxlaster

$$\sigma_s = \frac{F_{s,max}}{A_{skruv}} \approx 480,14 \text{ MPa} < \sigma_{skruv}^{max}$$

$$\sigma_{hylsa} = \frac{F_{k,max}}{A_{hylsa}} \approx 455,98 \text{ MPa} < \sigma_{stål}^{max}$$

$$\sigma_{bricka} = \frac{F_{k,max}}{A_{hylsa}} \approx 455,98 \text{ MPa} < \sigma_{stål}^{max}$$

$$\sigma_{laminat} = \frac{F_{k,max}}{A_{laminat}} \approx 30,07 \text{ MPa} < \sigma_{glasfiber}^{max}$$

Med den pulserande skruvkraften $F_{a,s}$ och skruvens tvärsnittsarea A_{skruv} beräknas amplitudspänningen $\sigma_{a,s}$.

$$F_{a,s} = \frac{F_{s,max} - F_{s,min}}{2} = \frac{F_{s,max} - F_0}{2} \approx 8,67 \text{ kN}$$

$$\sigma_{a,s} = \frac{F_{a,s}}{A_{skruv}} \approx 15,27 \text{ MPa} < \sigma_{skruv}^{g,max}$$

Hylsan utsätts också för en pulserande kraft, $F_{a,k}$, tillsammans med de klämda delarnas tvärsnittsarea beräknas (separat) amplitudspänningen för de klämda delarna.

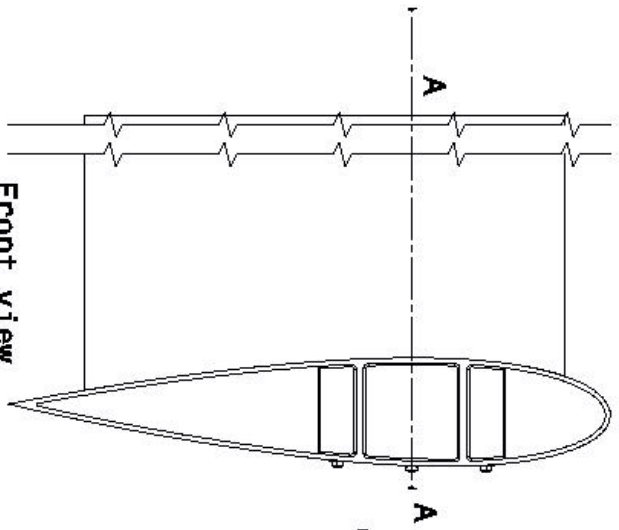
$$F_{a,k} = \frac{F_{k,max} - F_{k,min}}{2} = \frac{F_0 - F_{k,min}}{2} \approx 7,08 \text{ kN}$$

$$\sigma_{a,hylsa} = \frac{F_{a,k}}{A_{hylsa}} \approx 13,36 \text{ MPa} < \sigma_{stål}^{g,max}$$

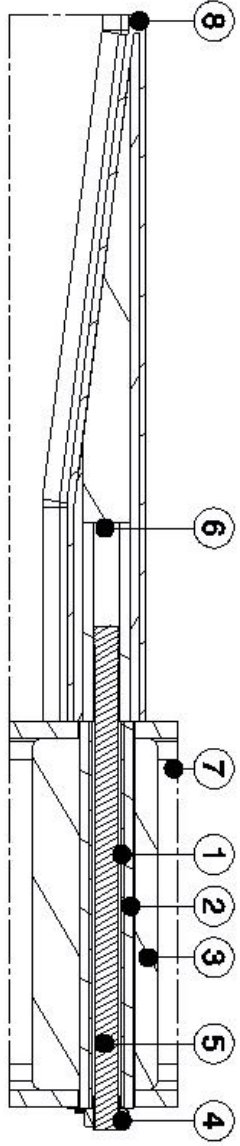
$$\sigma_{a,bricka} = \frac{F_{a,k}}{A_{hylsa}} \approx 13,36 \text{ MPa} < \sigma_{stål}^{g,max}$$

$$\sigma_{a,laminat} = \frac{F_{a,k}}{A_{laminat}} \approx 0,8809 \text{ MPa} < \sigma_{laminat}^{g,max}$$

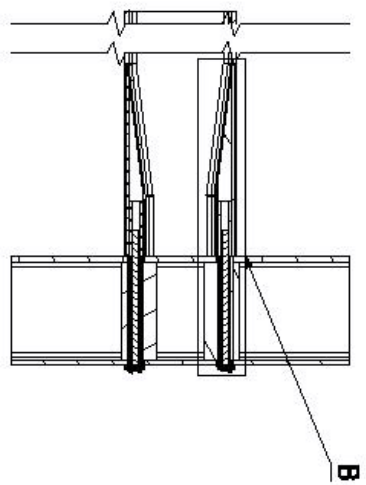
Koncept 1: Assembly



Front view
Scale: 1:25



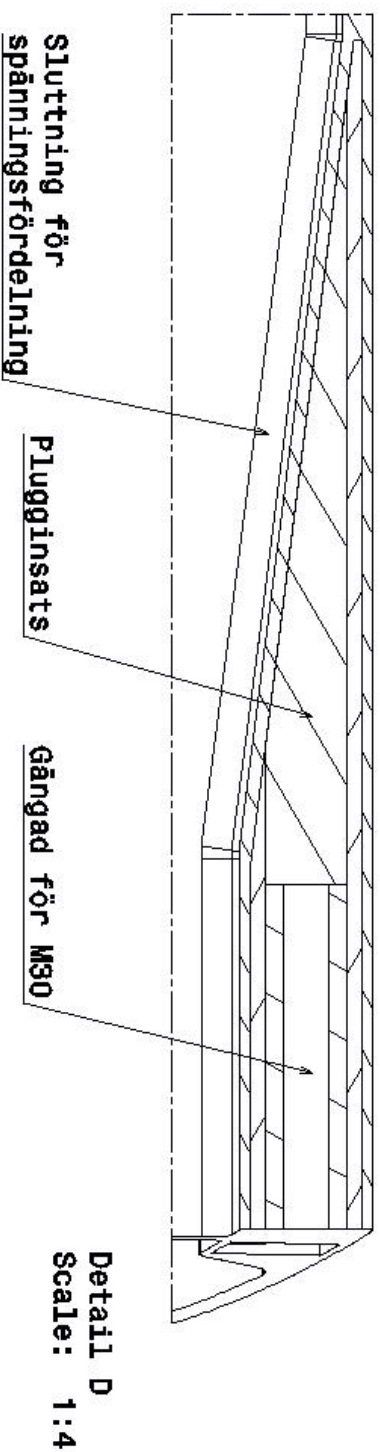
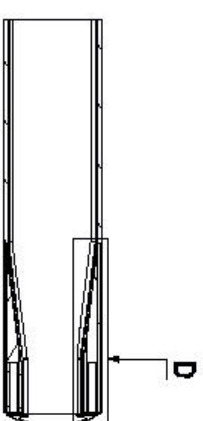
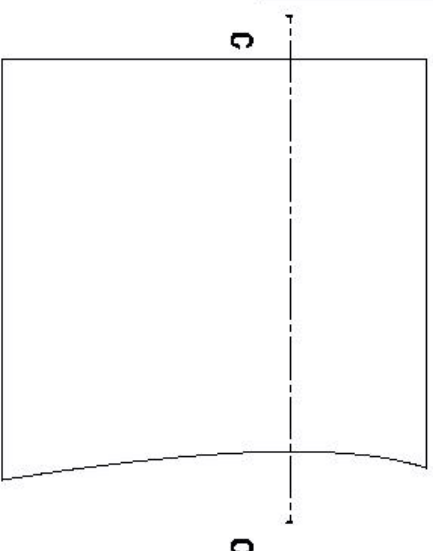
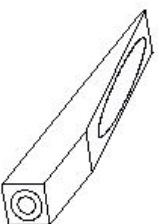
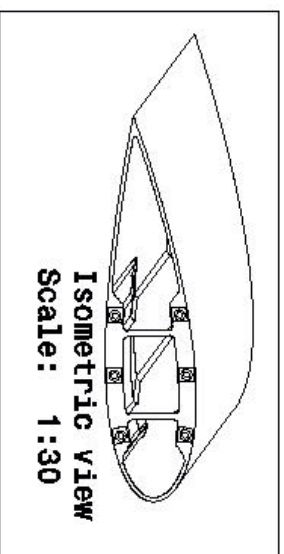
Detail B
Scale: 1:7



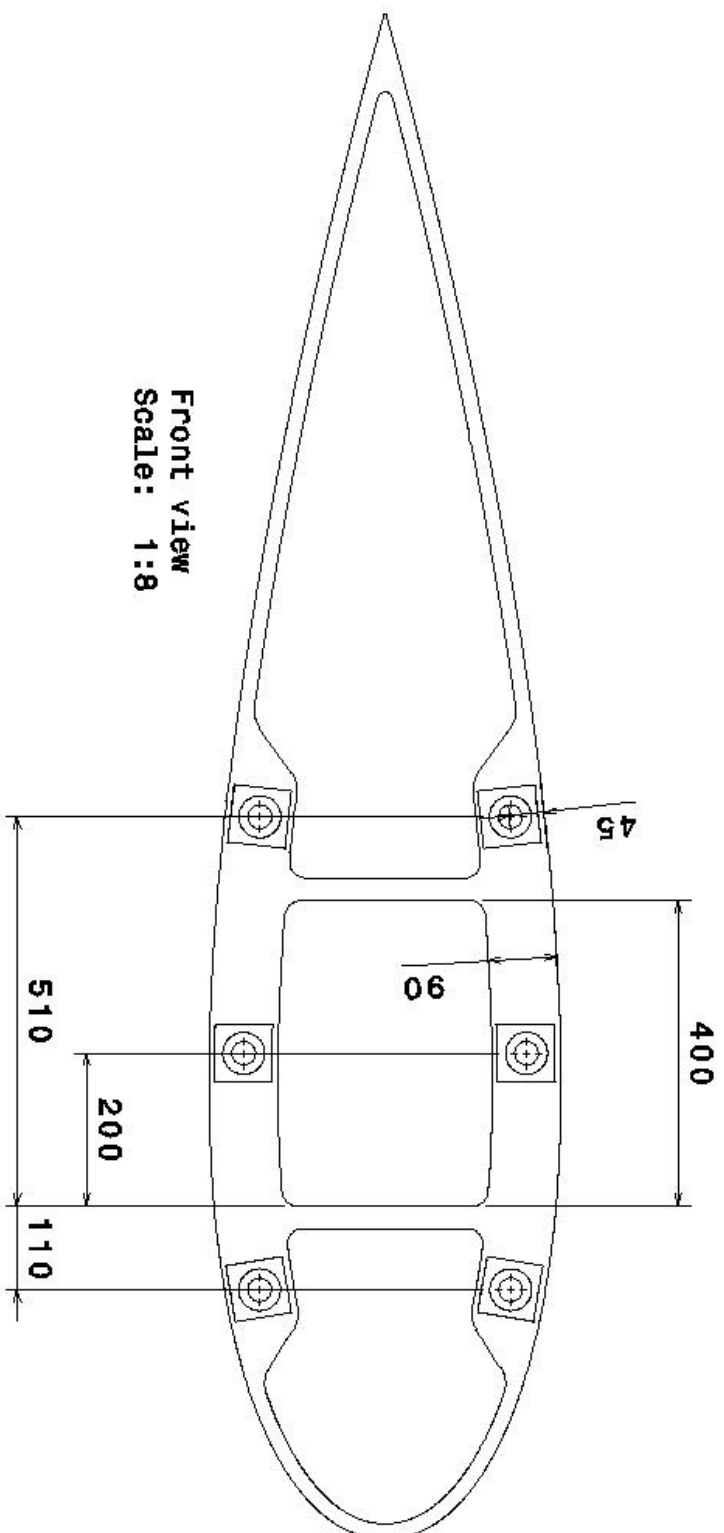
Section view A-A
Scale: 1:25

Part number	Component
1	stålhylsa
2	laminathylsa
3	skumkärna
4	M30 mutter
5	M30 skruv
6	Plugginsats
7	blad
8	stag

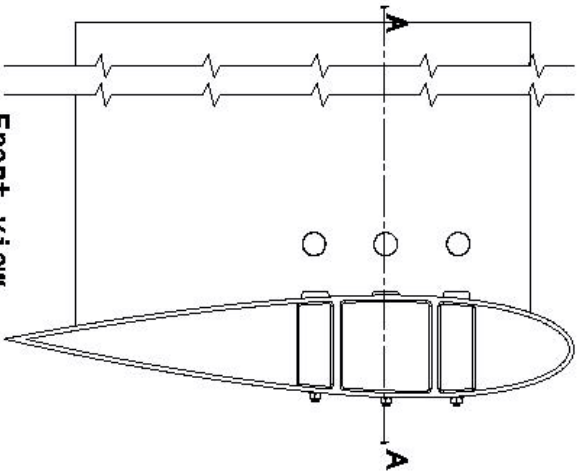
Koncept 1: Stag



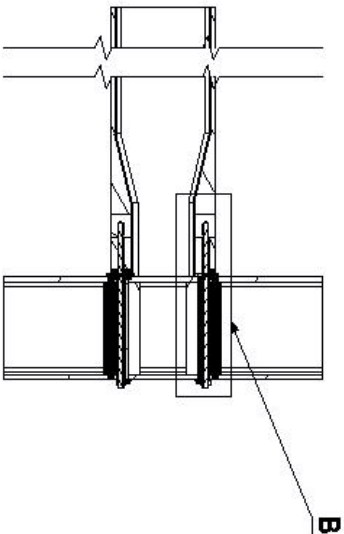
Koncept 1: Stag frontvy



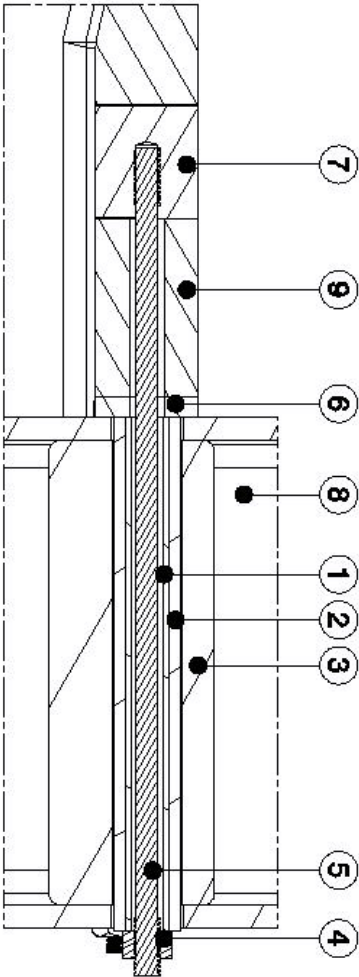
Koncept 2: Assembly



Front view
Scale: 1:25



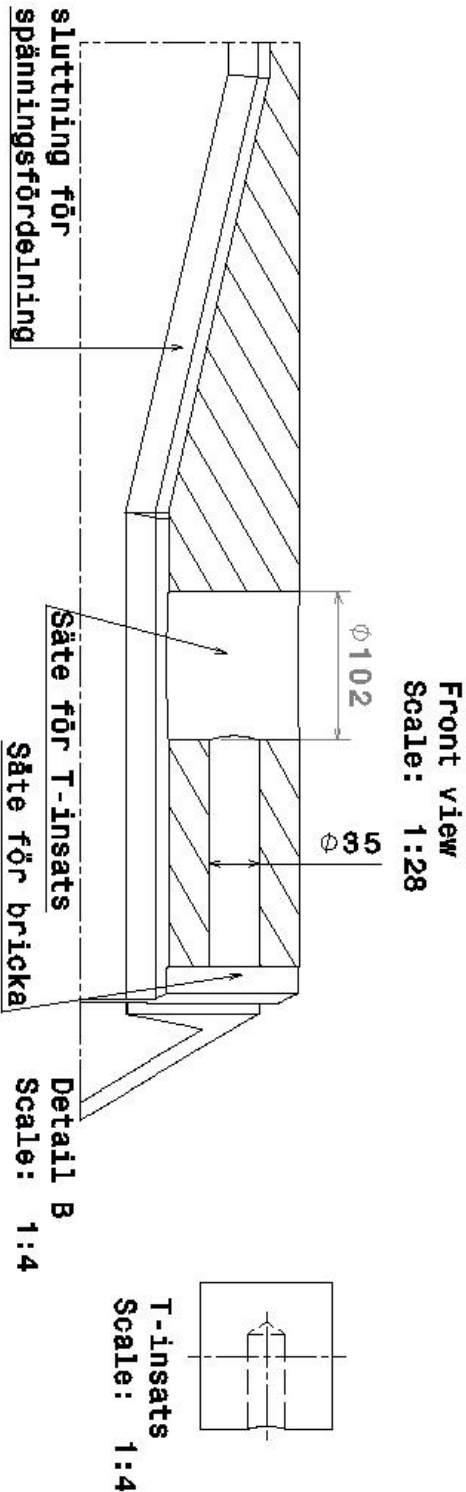
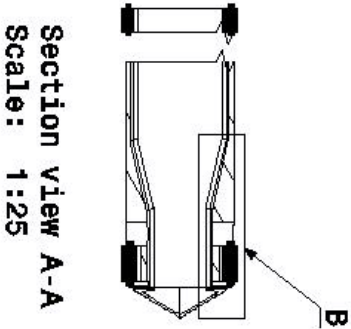
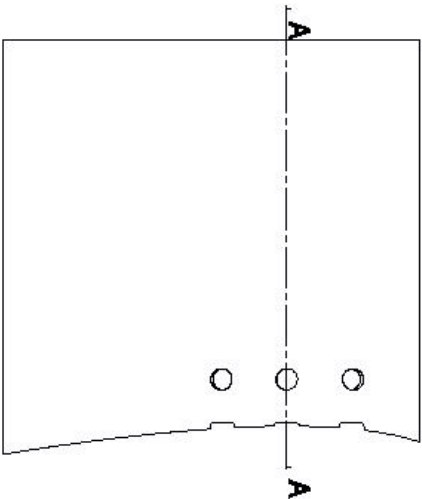
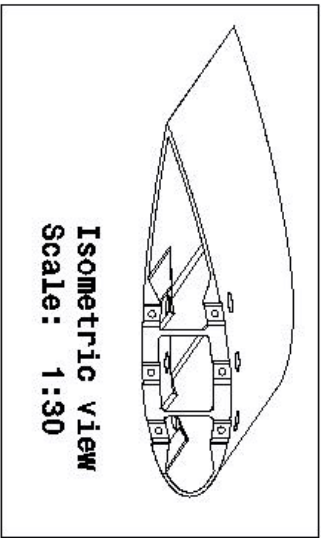
Section view A-A
Scale: 1:25



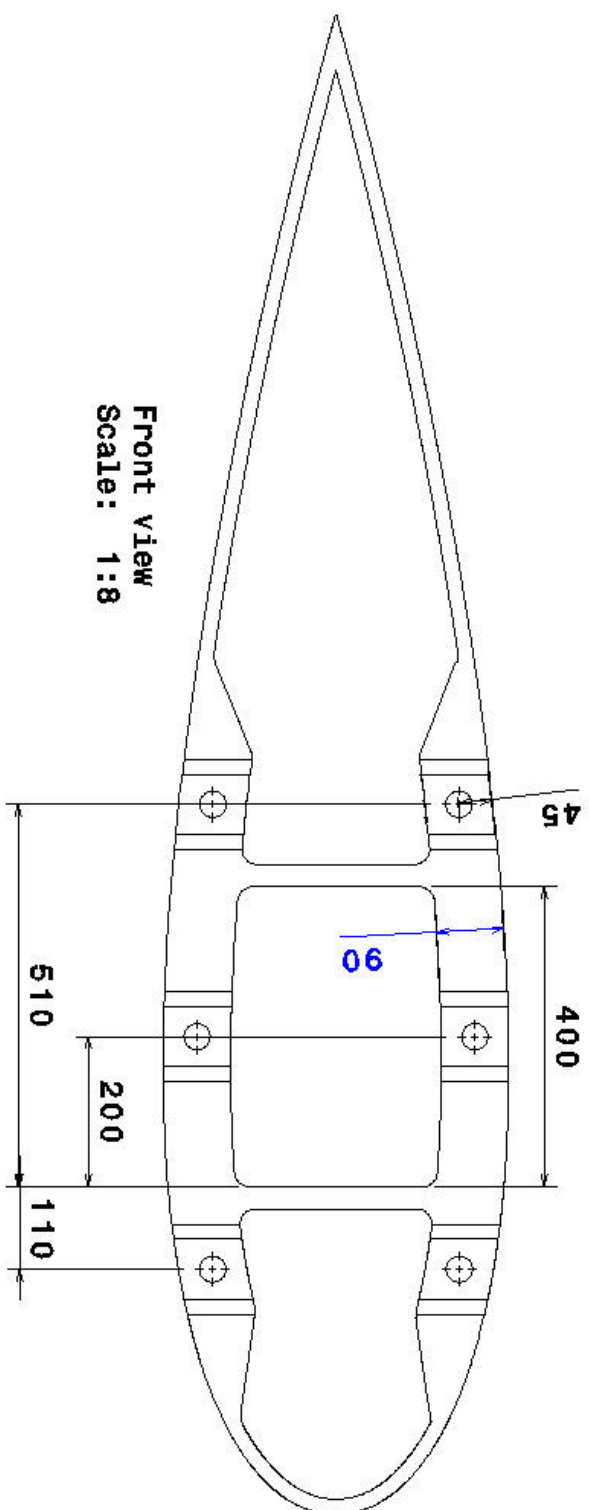
Detail B
Scale: 1:5

Part number	Part name
1	stålhylsa
2	laminathylsa
3	skumkärna
4	M30 mutter
5	M30 skruv
6	bricka
7	T-insats
8	blad
9	stag

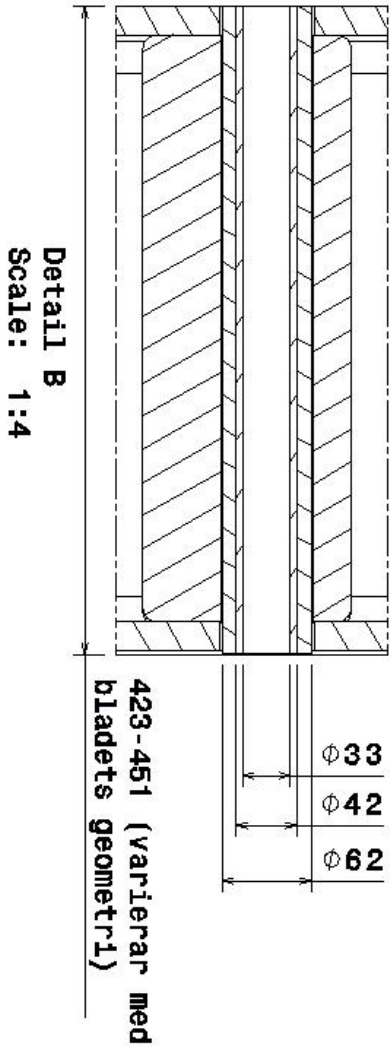
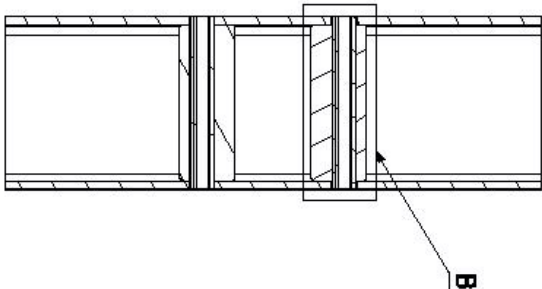
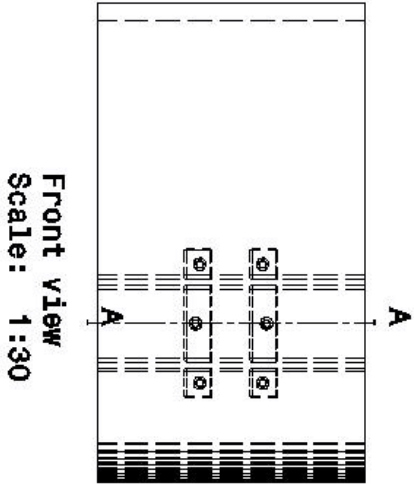
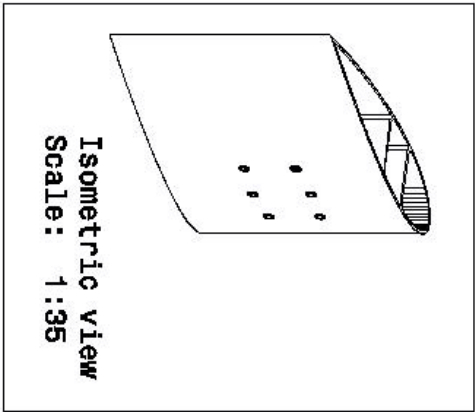
Koncept 2: Stag



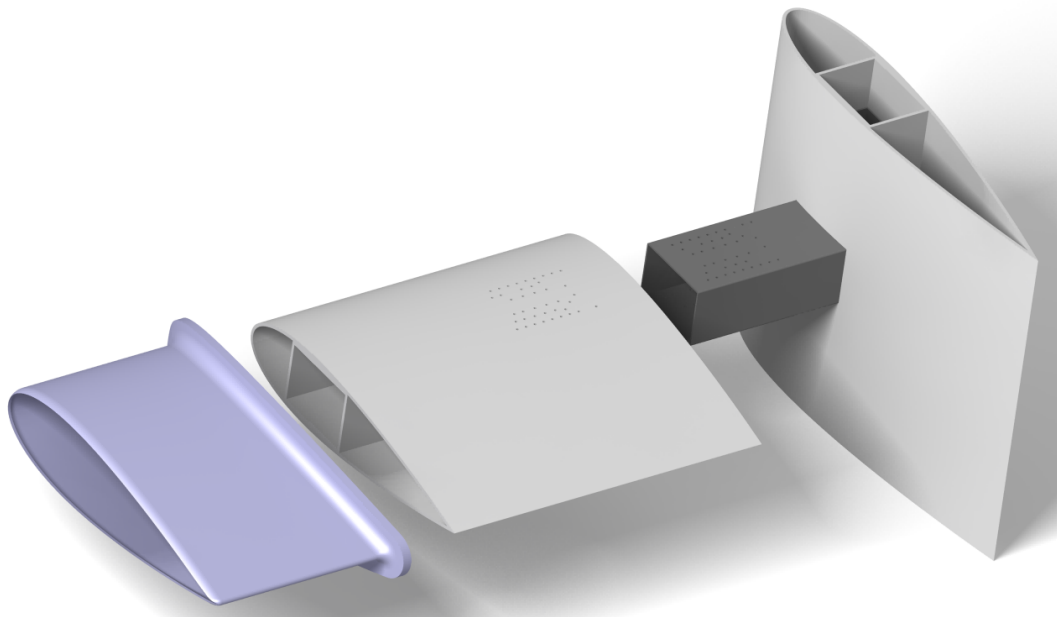
Koncept 2: Stag frontvy



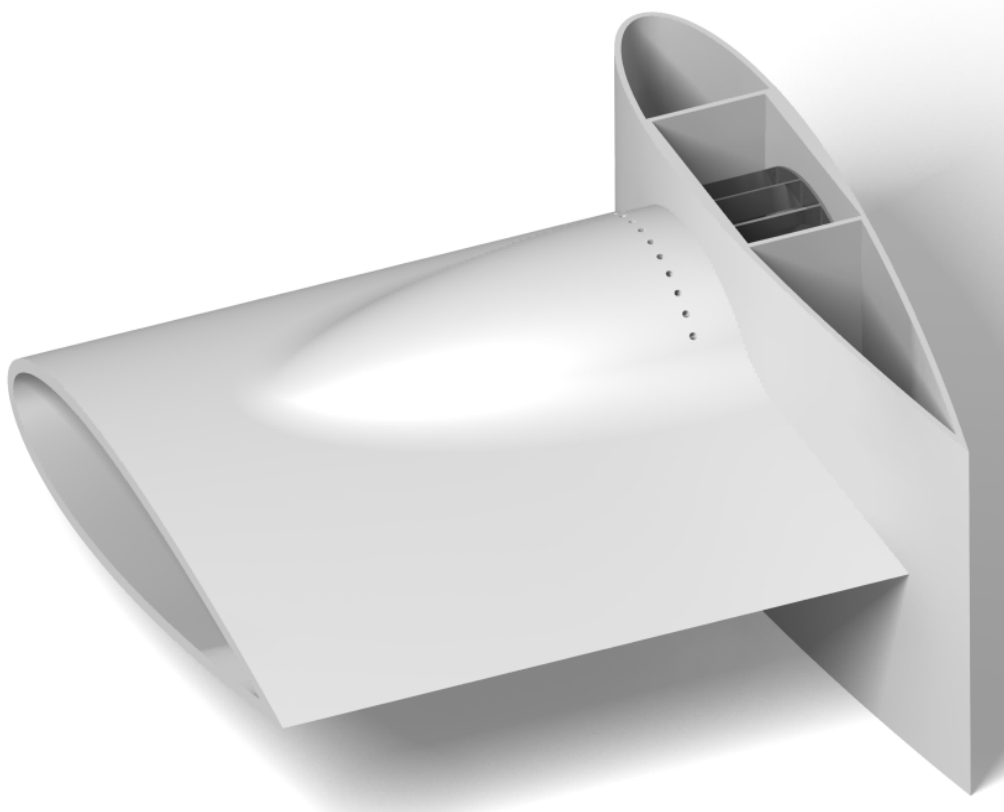
Koncept 1 och 2: Blad



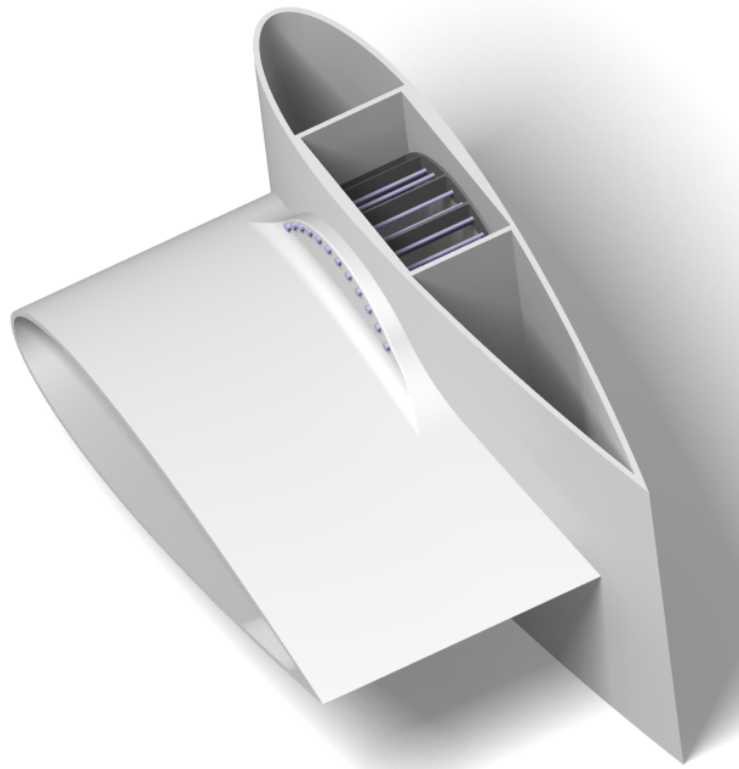
Bilaga 6: Bilder på initiala koncept



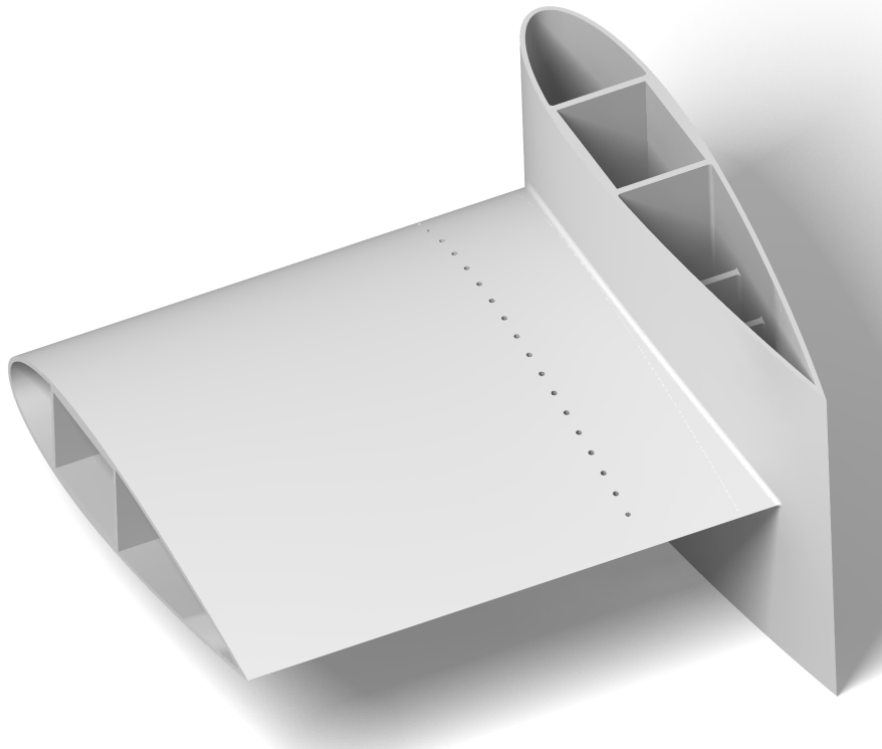
Figur 35: Koncept A



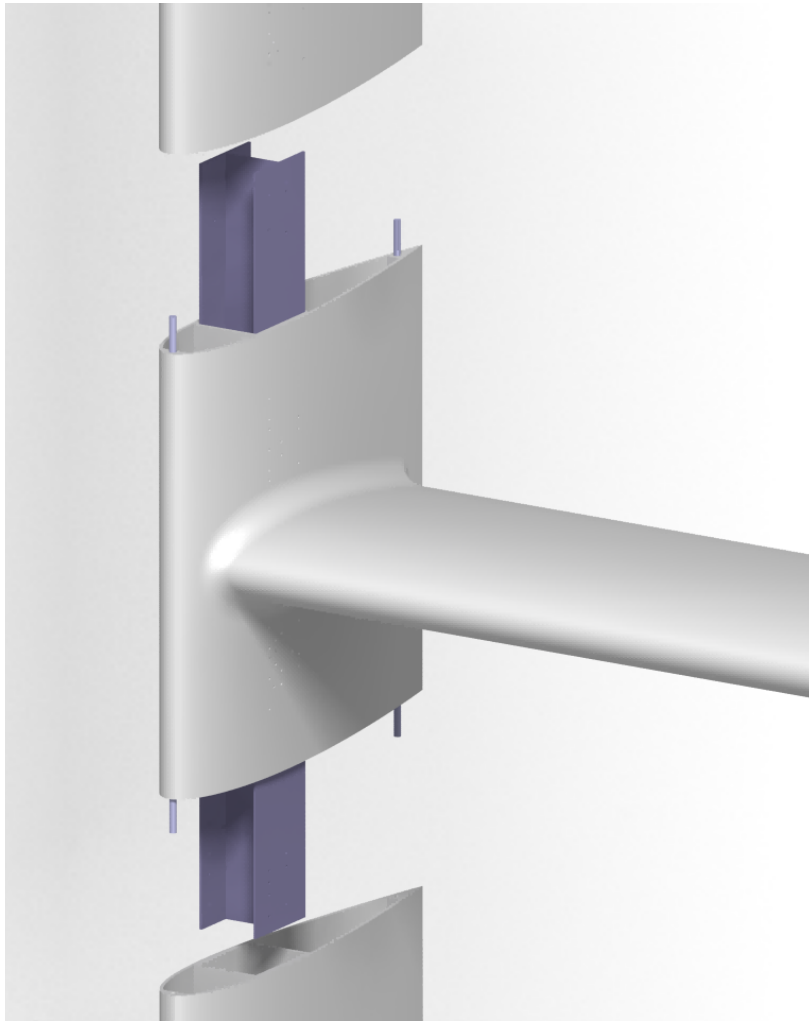
Figur 36: Koncept B



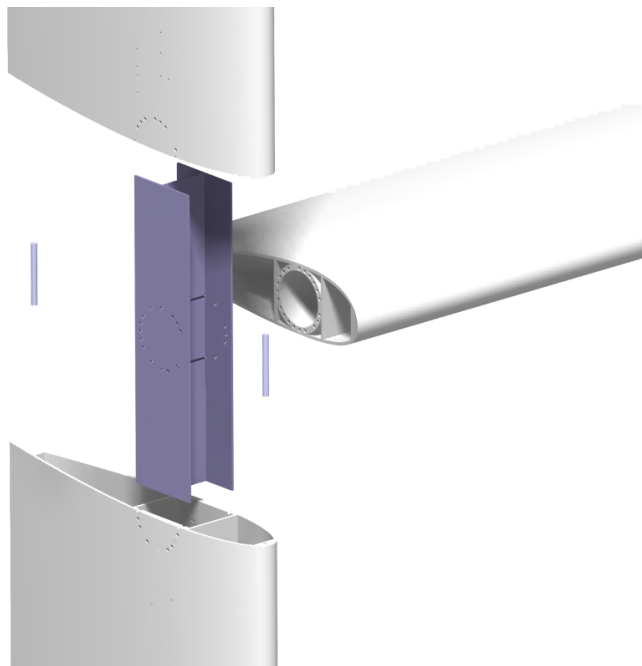
Figur 37: Konzept C



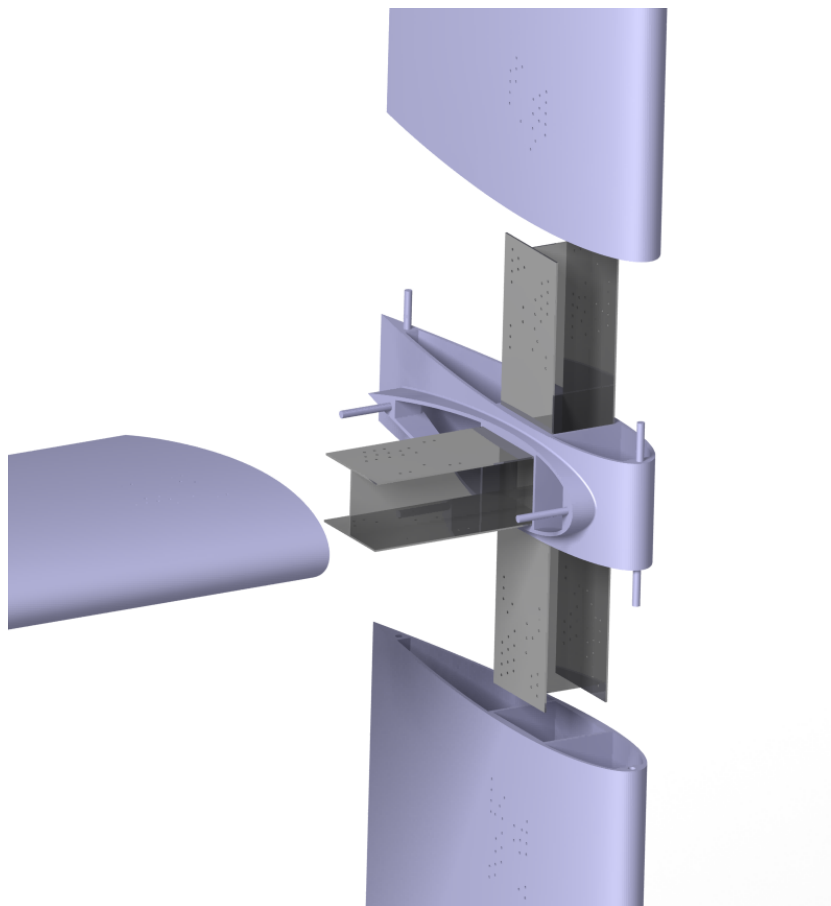
Figur 38: Konzept D



Figur 39: Koncept E



Figur 40: Koncept F



Figur 41: Koncept G