



CHALMERS

UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



Lageranordning för havsbaserad vertikalt vindkraftverk

Bearing arrangement for offshore vertical axis wind turbine

Examensarbete, 15 hp, Maskinteknik

Darko Doneski

Alaa Al-sarraf

Institutionen för industri- och materialvetenskap

CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA

Göteborg, Sverige 2017

Examinator: Magnus Evertsson

Förord

Denna rapport är ett examensarbete på 15 högskolepoäng vid kandidatprogrammet Maskinteknik, Institutionen för industri- och materialvetenskap. Projektet har tilldelats av SeaTwirl AB och gjordes i samarbete med projektbeställaren och handledare på Chalmers tekniska högskola (CTH) i Göteborg. Examensarbetet är utfört av Darko Doneski och Alaa Al-sarraf vid Chalmers tekniska högskola.

Vi vill börja med att tacka SeaTwirl AB som gav oss möjligheten att kunna utföra detta examensarbete. Vi vill även tacka Andreas Börjesson som har varit vår handledare på SeaTwirl för sitt engagemang, tid och energi att svara på våra frågor under arbetets gång. Ett stort tack även till Marcus Johansson och Magnus Evertsson som har varit våra handledare på CTH för stöd, hjälp och vägledning som var nödvändig för att styra projekt i rätt riktning.

Göteborg, Sverige, 2018-01-25

Darko Doneski

Alaa Al-sarraf

Sammanfattning

Ett produktutvecklingsprojekt har genomförts för SeaTwirl AB. SeaTwirl ett företag i Göteborg som jobbar med att utveckla ett flytande havsbaserad vertikalt vindkraftverk. Syftet med projektet har varit att ta fram flera lösningar för lagerarrangemang som går att montera och demontera till SeaTwirls nästa vindkraftverk Sea Twirl S2. En förstudie för att sammanställa de faktiska kraven för produkten har genomförts. Baserat på informationen från förstudien och genom användning av olika metoder genererades och utvärderades ett flertal olika koncept innan de gick vidare till detaljkonstruktion. Vissa av koncepten som togs vidare till detaljkonstruktion förbättrades jämfört med konceptfasen. Arbetet resulterade i tre lösningsförslag på hur lageranordningen i vindkraftverket kan se ut samt monterings- och demonteringsgång för dessa.

Abstract

A product development project has been carried out for SeaTwirl AB. SeaTwirl is a company in Gothenburg that are developing a floating sea-based vertical axis wind turbines. The purpose of the project has been to develop several alternative solutions of bearing arrangements that can be mounted and dismounted for SeaTwirl's next unit. A feasibility study to conclude the actual needs of the product has been done. Based on the information from the feasibility study and by using different methods, different concepts were generated and evaluated before proceeding to detail construction. Some of the concepts that went on to detail construction were improved compared to the solutions in the conceptual phase. The work resulted in three proposed solutions for the bearing arrangement in the wind turbine as well as mounting and dismounting steps for these.

Innehållsförteckning

1.	Inledning	5
1.1.	Bakgrund.....	5
1.2.	Målformulering	6
1.3.	Syfte.....	6
1.4.	Avgränsningar.....	6
1.5.	Precisering av frågeställningen	6
1.6.	Problemformulering.....	7
2.	Teoretiskt ramverk	8
2.1.	Vertikala vindkraftverk.....	8
2.1.1.	Komponenter i vertikalt vindkraftverk	9
2.2.	SeaTwirls havsbaserade vertikala vindkraftverk	10
2.3.	Lager.....	11
2.3.1.	Radiallager.....	11
2.3.2.	Axiallager	17
2.3.3.	Hydrodynamiska smorda lager	19
2.3.4.	Coopers delbara lager	19
2.3.5.	Magnetiska lager	20
2.4.	Lagertillbehör	21
2.4.1.	Låsmuttrar.....	21
2.4.2.	Lagerhus.....	24
3.	Metod	25
3.1.	Förstudie.....	25
3.2.	Kravspecifikation.....	26
3.3.	Konceptframtagning.....	26
3.4.	Konceptutvärdering och konceptval	28
3.5.	Detaljkonstruktion i CATIA V5 (CAD).....	29
4.	Resultat.....	30
4.1.	Förstudie.....	30
4.2.	Beskrivning av befintlig produkt	31
4.3.	Kravspecifikationen.....	33
4.4.	Val av lagerkombinationer.....	35
4.5.	Benchmarking.....	36
4.6.	Konceptframtagning.....	37
4.7.	Konceptutvärdering och konceptval	45
4.8.	Detaljkonstruktion	47
4.8.1.	Koncept 2.....	47
4.8.2.	Koncept 3.....	49
4.8.3.	Koncept 8.....	52
5.	Slutsats	55
6.	Diskussion.....	56
7.	Referenser	58

1. Inledning

Följande kapitel ger en beskrivning av bakgrund samt syfte med projektet, de mål som ska uppnås och avgränsningar.

1.1. Bakgrund

Vind är en förnybar energikälla som är miljövänlig och inte förorenar vatten eller luft. Eftersom vind är kostnadsfri så uppkommer nästan inga kostnader när vindkraftverket väl är byggd vilket är gynnsamt utifrån ekonomisk synpunkt. Dessa två aspekterna är viktiga då elektrisk energi utvinns på ett miljövänligt sätt. Det finns två olika huvudtyper av vindkraftverk med avseende på orienteringen som turbinaxeln har, horisontella och vertikala vindkraftverk. Vindkraftverk består av bland annat en turbin som roterar med hjälp av rörelsemängden från luften och generator som omvandlar rörelseenergin till elenergi.

SeaTwirl som är uppdragsgivaren är ett företag som utvecklar ett flytande vertikalt vindkraftverk. Vertikala vindkraftverk är oberoende av vindriktning vilket betyder att turbinen roterar oavsett vilket håll vinden blåser ifrån. Det är en av fördelarna med vertikala vindkraftverk eftersom ett traditionellt horisontellt vindkraftverk måste riktas för att fånga vinden.

Tanken bakom SeaTwirl projektet är att vindkraftverket som ska flyta på havsytan skall kunna placeras på olika ställen oberoende av havsdjupet. I dagsläget byggs traditionella vindkraftverk som placeras ute till havs på ett havsdjup mellan 40–50 meter.

Sedan 2015 testkörs en prototyp i Lysekil som har en effekt på 30 kW och just nu jobbar SeaTwirl med att utveckla ett större vindkraftverk som de kallar "SeaTwirl S2" som ska ha en effekt på 1MW.

Efter ett möte med Gabriel Strängberg (VD för SeaTwirl) och Erik Steinholtz (projektledare på SeaTwirl) kom det till kännedom att SeaTwirl behöver ideer för lösningar på lageranordning till deras SeaTwirl S2. Lageranordningen som företaget behöver till deras vindkraftverk skall placeras i generatorhuset och fungera på så sätt att turbinaxeln roterar fast generatorhuset förblir i en och samma position.

1.2. Målformulering

Vid projektets slut ska projektgruppen ha tagit fram flera olika konceptlösningar på lagerarrangemang för SeaTwirls S2 som ska kunna ta upp de laster som verkar på vindkraftverket samt går att montera och demontera. Projektet beräknas vara färdigställt i slutet av januari 2018 och arbetet ska utföras genom att studera olika lagertyper, och använda ingenjörsmässiga problemlösningsmetoder utifrån de krav som ställs. De olika koncepten skall redovisas i form av skisser, text och CAD ritningar för de bättre koncepten. En skriftlig rapport lämnas in vid projektets slut.

1.3. Syfte

Syftet med projektet är att ta fram flera lösningar för lageranordning till SeaTwirl S2. För att utföra detta så måste hänsyn tas till de tre större sektioner som ingår i systemet vilka är turbin och torn, generatorhus och flytkropp. Hänsyn skall även tas till de olika laster som verkar på lageranordningen samt de komponenter som befinner sig i generatorhuset. Designen för lageranordningen skall utformas utifrån kravet att det ska vara monterbart och demonterbart.

1.4. Avgränsningar

Fokus under projektet kommer läggas på att hitta lösningar på hur en lageranordning kan anpassas till problemet. Tillverkning och materialval av lagerkomponenter, samt underhåll av lageranordningen kommer inte att behandlas i detta projekt. Hänsyn kommer inte tas till generatorhusets utformning även om det behöver omkonstrueras utifrån de olika koncepten.

1.5. Precisering av frågeställningen

- Finns det befintliga lösningar tillgängliga på marknaden?
- Vilken lagerkombination är mest lämplig för verket med avseende på lasterna?
- Hur kan lageranordningen monteras och demonteras så lätt som möjligt?

1.6. Problemformulering

SeaTwirl är ett företag som utvecklar ett havsbaserad vertikalt vindkraftverk som kommer att lanseras år 2020. Eftersom vindkraftverket har en roterande vertikal axel behöver lösningar för lageranordningen hittas som möjliggör denna rotation. De olika koncepten skall genereras så att den tar upp de förekommande lasterna i form av radiella och axiella krafter samt moment. Hänsyn ska även tas till andra aspekter så som montering och demontering av lageranordningen för att effektivt kunna göra reparationer och underhållning.

2. Teoretiskt ramverk

I detta kapitel presenteras den kunskap som läsaren behöver för att förstå projektet. Informationen som har samlats in under detta kapitel kommer från litteratursökning på olika databaser, intervjuer och konsultation med SeaTwirl.

2.1. Vertikala vindkraftverk

I jakten på nya förnybara energikällor har vinden visat sig vara ett av de billigare alternativen för energiutvinning, vilket har gett upphov till utveckling av moderna tekniker för omvandling av vindenergi till elektrisk energi. Ett sätt att omvandla vindens energi är vindkraftverk. Vertikala vindkraftverk eller VAWT (vertical axis wind turbine) har fått sitt namn efter sin rotationsaxel som är placerad i vertikal riktning med avseende på marken och det var först år 1931 en lösning på vertikalt vindkraftverk presenterades av Georges Jean Marie Darrieus (se fig.1). Generatoren kan placeras på marknivå, vilket gör installationen och underhållet enklare. Vidare förväntas en VAWT producera mindre akustiskt brus än en HAWT (horizontal axis wind turbine). Det har hävdats i recensionen "A Review of Research on Large Scale Modern Vertical Axis Wind Turbines at Uppsala University" av Senad Appelfjörd, Sandra Eriksson och Hans Bernhoff att anledningen till att HAWT är vanligare kommersiellt beror på investeringsprioriteringar i stället för tekniska fördelar [1].



Figur 1. En figur där två olika typer av vindkraftverk visas, VAWT till vänster och HAWT till höger. [22]

2.1.1. Komponenter i vertikalt vindkraftverk

Vertikala vindkraftverk har till skillnad från horisontella vindkraftverk färre rörliga delar. De större komponenterna i ett VAWT är rotorn, tornet, och generator. Sedan finns det även mindre komponenter som tätningar, lagringar, förband, bromsar och elektriska komponenter. I detta kapitel beskrivs funktionerna och påverkan av rotorn, tornet och generatorn på vindkraftverket som en enhet.

2.1.1.1. Rotor

Rotorn är den komponent av vindkraftverket som har funktionen att fånga vindens rörelsemängd och omvandla den till en rotationsrörelse. Den vanligaste rotorn i ett vertikalt vindkraftverk är Darrieus-rotorn som designades av Darrieus år 1931. Hur bladen är konstruerade på en sådan rotor kan variera men den mest vanliga är H-rotorn där bladen är raka och fixerade till tornet med balkar. Lösningar med böjda blad förekommer också och de är fixerade på toppen och botten av tornet.

En nackdel med böjda blad hos rotorn är att bladen är svåra att tillverka samt att en sådan rotor vanligtvis ligger väldigt nära marken där vindhastigheten är lägre och vindskjuvning (vindar som blåser i olika riktningar och olika hastigheter) kan orsaka strukturproblem. H-rotorn kan placeras på ett högre torn och är normalt inte nära marken, samt att den har bättre aerodynamisk prestanda än Darrieus-rotorn, men har större böjningsmoment på bladen. Dessutom har H-rotorn en enklare konstruktion p.g.a. de raka bladen, vilket gör det billigare och lättare att tillverka [2].

2.1.1.2. Torn

Rotorn i en VAWT befinner sig på toppen av tornet som sitter fast i marken. Ett torn är tillverkat av flera olika koniska rör som monteras ihop och av stål. Tornet liksom rotorn utsätts för olika krafter som varierar i storlek och riktning. De krafterna som påverkar tornet är den konstanta tyngdkraften av vindkraftverket men även den roterande kraften från rotorn, vindkraften och vindens vibrerande krafterna från tvärgående riktning [2]. Hänsyn till de krafterna måste tas då de påverkar inte bara tornet utan även lageranordningen.

2.1.1.3. Generator

Generatoren är den delen av vindkraftverket där rotns rotation omvandlas till elektrisk energi. Den kan placeras på marknivå och på så sätt är generatorns vikt mindre viktig. Generatoren kan därför optimeras med tanke på effektivitet och kostnad istället för att fokusera på låg vikt och volym eftersom det inte påverkar vindkraftverkets konstruktion i samma utsträckning som för HAWT [2].

2.2. SeaTwirls havsbaserade vertikala vindkraftverk

SeaTwirls vertikala vindkraftverk har som alla andra vertikala vindkraftverk en rotationsaxel i vertikal riktning, men det som gör SeaTwirls vertikala vindkraftverk speciell är att den flyter på havets yta. Vindkraftverkets delar som turbin, torn och flytkropp byggs ihop och roterar som en enhet. Ovanför vattnets yta, runt tornet, mellan vattenytan och turbinen sitter ett slutet, lagrat generatorhus. Generatorhuset och de andra sektionerna är förankrade i havsbotten med hjälp av kedjor.

SeaTwirls vindkraftverk kan placeras ute på havet där vattendjupet ligger på cirka 60 meter eller mer, till skillnad från de kommersiella havsbaserade vindkraftverk som är begränsade till grundare vatten. Det betyder att vindar som är starkare och mer tillförlitliga kan utnyttjas [3].

2.3. Lager

”Funktionskravet på ett lagringselement är tvåfaldigt: att möjliggöra relativrörelse och överföra laster (krafter och moment)” (Melkersson; Mägi, 2006, 210) [9]. Lager består av två ringar, en yttering och en innerring, rullningskropp som möjliggör rörelsen, och i vissa fall tätningar och hållare. I ett lagerarrangemang finns det flera olika komponenter som behöver tas hänsyn till. Axeln och lagerhuset är några av de komponenterna [4]. De mest vanliga lagren kan innehålla rullkroppar i form av kulor eller rullar. Hos kullager består rullkropparna av härdade sfäriska kulor som kraftigt minskar friktionen mellan rörliga delar, men eftersom kontaktområdet endast är en punkt, har de inte stor kapacitet att bära laster. Å andra sidan när det gäller rullager är kontaktytan en linje i stället för en punkt och fördelar belastningen över ett större område. De har en mycket hög kapacitet att bära laster.

För att ett lager ska fungera tillfredställande hänsyn måste tas till lagerglappet. Lagerglapp är det totala avståndet som lagerringen kan förflyttas i förhållande till andra ringen i radiell- eller axiell riktning.

Kullager ska generellt varken ha något driftsglapp eller förspänning. Cylindriska rullager, nålrullager, sfäriska rullager och CARB toroidrullager ska däremot ha ett litet radiellt glapp under drift. Koniska rullager och vinkelkontaktlager ska förspännas för att öka styvheten hos lagerarrangemanget. Med förspänning menas att lagret får ett negativt driftglapp [4].

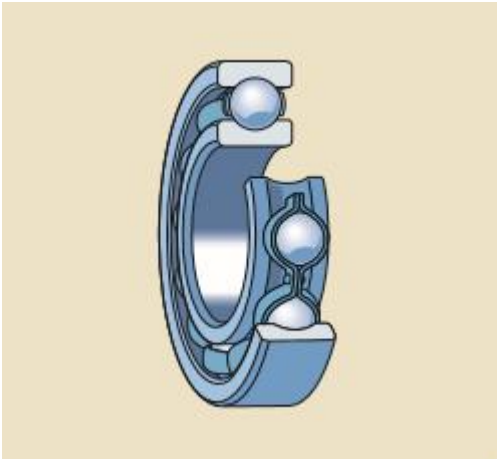
Lager kan sedan delas upp i olika kategorier och de lagringarna som ska behandlas i projektet presenteras nedan.

2.3.1. Radiallager

Radiallager är den typen av lager som tar upp krafterna som verkar vinkelrätt mot axelns centrumlinje. Det finns olika typer av radiallager och de klassificeras utifrån form och rullkropp. Vissa radiallager kan även ta upp axiella krafter dvs. krafter som är parallella med axelns centrumlinje. För att ett radiallager ska kunna utföra sina funktioner är yttringen oftast tätt placerad till en struktur som inte roterar och innerringen är tätt placerad på en axel som roterar. Nedan följer en lista av de mest vanliga lagringarna i SKF katalogen med beskrivning av deras egenskaper.

- **Spårkullager**

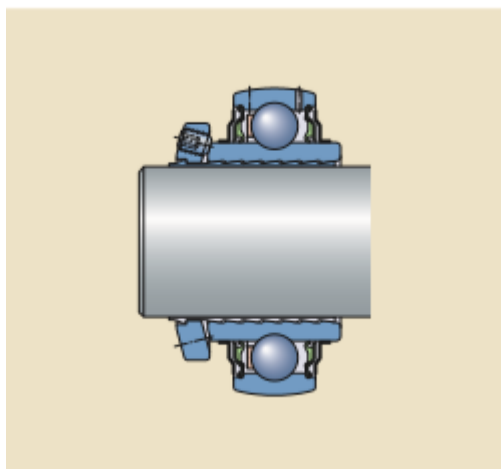
Spårkullager är den vanligaste lagervarianten och illustreras i Figur 2. De har en enkel design, är självsammanhållande och tål höga och mycket höga rotationshastighet. Spårkullager kan konstrueras på två olika sätt, och det är med en(enradiga) samt med två(tvåradiga) rader löpbanespår. Tvåradiga spårkullager klarar större radiella krafter än enradiga, men en nackdel med dem är att de finns bara i öppet utförande dvs. utan tätningar och kapsling [4].



Figur 2. Ett spårkullager.

- **Y-lager**

Y-lager är ett tätat spårkullager med bred innerring och sfärisk ytterring. Lagret tar både radiella och axiella krafter. Innerringen på lagret innehåller olika låsanordningar och på så sätt möjliggör snabb och enkel montering på axeln [4]. Ett y-lager illustreras i Figur 3.

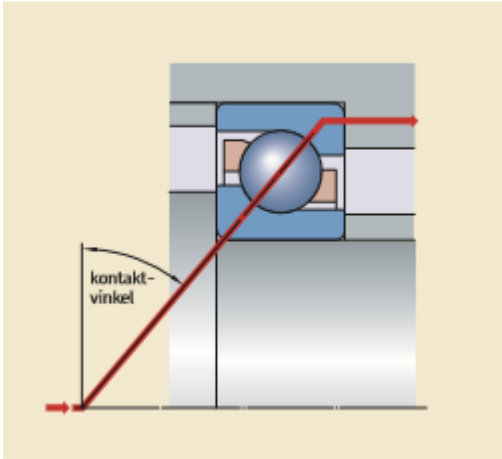


Figur 3. Ett Y-lager.

- **Vinkelkontaktkullager**

Ett spårkullager som möjliggör överföring av kombinerade belastningar där både axiella och radiella krafter förekommer. En kontaktvinkel α uppstår

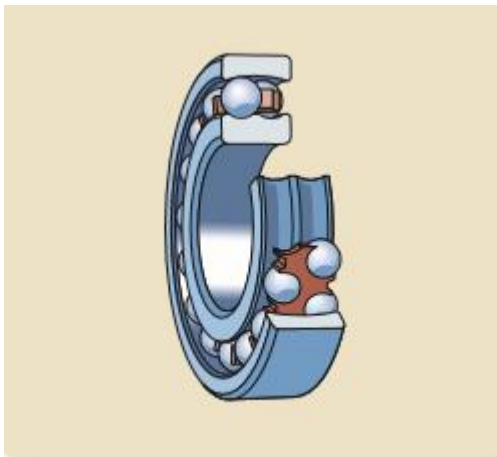
mellan linjen som förenar kontaktpunkterna mellan kulan och löpbanorna i radialplanet, och en linje som är vinkelrät mot lagrets centrumlinje. Ett vinkelkontaktlager där även kontaktvinkeln α syns är illustrerat i Figur 4. En ökad storlek på α ökar även lagrets axiella bärförmåga [4].



Figur 4. Ett vinkelkontaktkullager där kontaktvinkeln α visas.

- **Sfäriska kullager**

Det sfäriska kullagret innehåller två rader av kulor som har två löpbanor på innerringen och en gemensam löpbanor på ytterringen (se Figur 5. Ett sfäriskt kullager.). Lagret klarar både axiella och radiella krafter. Det klarar av snedställning av axeln i förhållande till lagerhuset. En annan fördel med just denna typ av lager är att det har lägre friktionskoefficient än andra lager, vilket i sin tur minskar temperaturen vid höga varvtal [4].

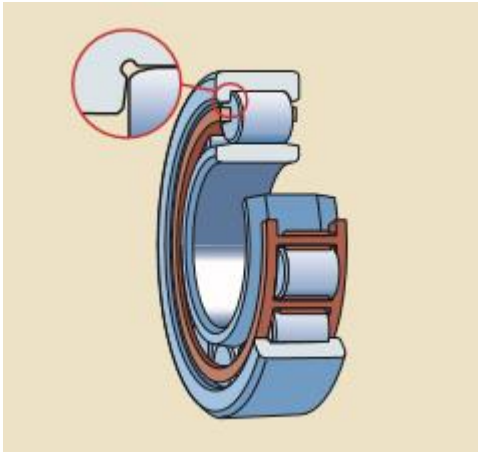


Figur 5. Ett sfäriskt kullager.

- **Cylindriska rullager**

Ett lager som klarar av höga radiella belastningar, snabba accelerationer och höga hastigheter. Vanligast av alla cylindriska rullager är det enradiga lagret med hållare på rullarna. Huvuddelarna i ett cylindriskt rullager är inner- och

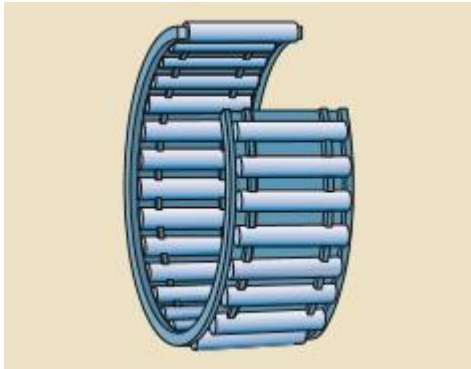
ytterring som är kopplade med cylindriska rullar som överför lasterna. Ofta tillverkas lagret med hållare vilket ökar bärförmågan hos lagret [4].



Figur 6. Ett cylindriskt rullager med en förstoring på en kontaktpunkt i hörnet.

- **Nållager**

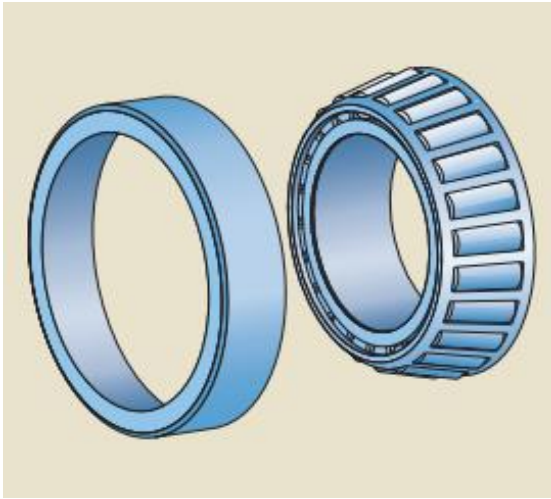
Nållager består av många rullar som har en liten diameter i förhållande till deras längd. Även fast rullarna har liten diameter så har lagret stor bärförmåga av radiella krafter. Detta medför att det kan användas i begränsade utrymmen för att bära last i radiell led [4].



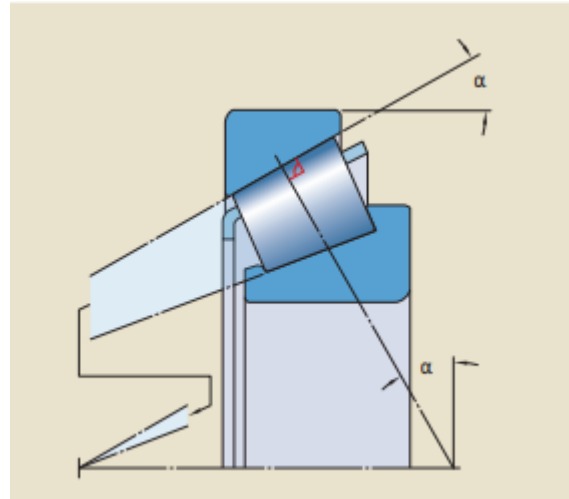
Figur 7. Ett nållager.

- **Koniska rullager**

Hos denna typ av lager är rullarna liksom löparbanorna koniska. Detta medför att lagret kan samtidigt ta upp radial- och axialbelastningar. Bärförmågan av axiella krafter ökar med ökande kontaktvinkel α , som i sin tur ökar med ökande värde på beräkningsfaktorn e . Enradiga koniska rullager är isärtagbara vilket underlättar montering och demontering av lagret [4].



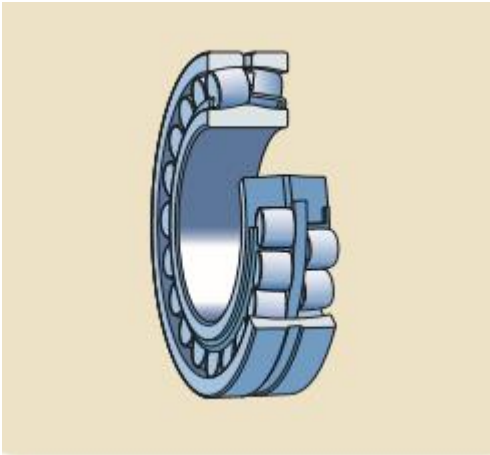
Figur 8. Ett koniskt rullager.



Figur 9. Kontaktytan för rullarna i koniska rullager.

- **Sfäriska rullager**

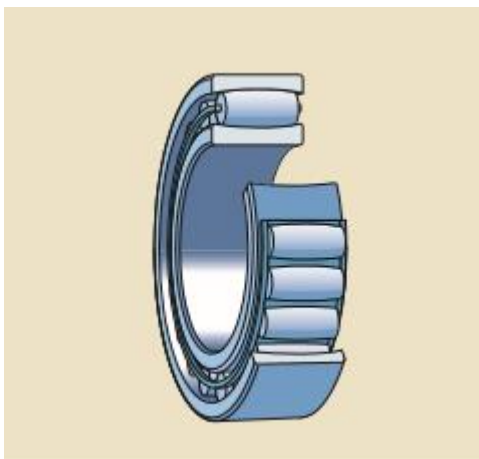
Sfäriska rullager är konstruerade att klara av snedställningar av axeln i förhållande till lagerhuset och samtidigt självinställande. De kan överföra stora radiella och axiella belastningar i båda riktningarna. Sfäriska rullager är isärtagbara, vilket möjliggör montering och demontering av ytterringen separat från innerringen och rullningskropparna [4].



Figur 10. Ett sfäriskt rullager.

- **CARB toroidrullager**

CARB är en kombination av cylindriska rullager och sfäriska rullager vilket gör att lagret har självinställande egenskaper samt tar upp axiella förskjutningar. Fördelarna med CARB toroidrullager i lagerarrangemang är att det ger lägre ljud och vibrationsnivåer, men sparar även utrymme. Lagret tar stora radiella belastningar [4].



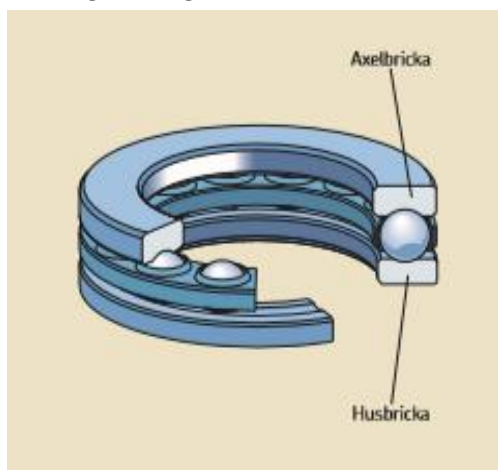
Figur 11. Ett CARB toroidrullager.

2.3.2. Axiallager

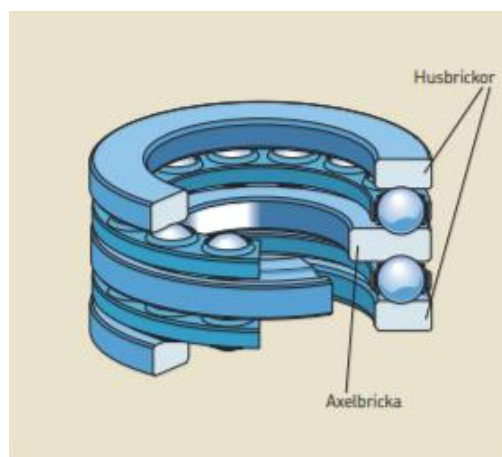
Axiallager tar upp de krafter som verkar parallellt med axelns centrumlinje. Det finns olika typer av axiallager och vissa av de kan även ta upp radialbelastningar. Nedan följer en lista av de lagringarna i SKF katalogen med beskrivning av deras egenskaper.

- **Axialkullager**

Det är en typ av lager som är konstruerad för att ta upp axialbelastningar. Begränsningen gör att lagret inte får utsättas för radialbelastningar. Det finns två typer av axiallager, enkelverkande och dubbelverkande axialkullager. Enkelverkande axiallager kan ta axelbelastningar och styra en axel i en riktning, medans dubbelverkande axialkullager har samma funktion men fungerar i båda riktningarna. Lagerdelarna som axelbrickan, husbrickan och kulkransen kan monteras var för sig som gör det enkelt att montera och demontera lagret [4].



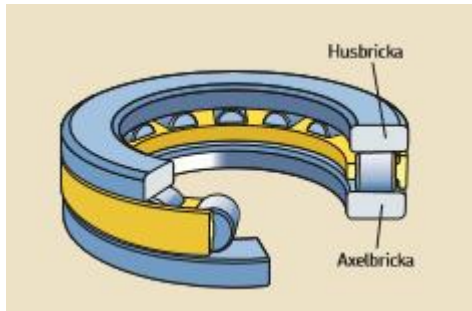
Figur 13. Ett axialkullager där husbrickan och axelbrickan är utpekade.



Figur 12. Ett dubbelverkande axialkullager.

- **Cylindriska axialrullager**

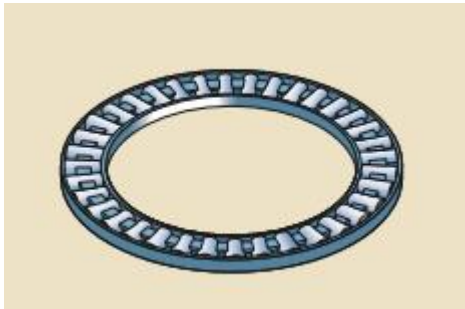
Cylindriska axialrullager kan ta stora axialbelastningar och även stötblastningar men lagret får inte utsättas för radialbelastningar. Det som utmärker det cylindriska axiallagret är att det är styvt och tar inte upp mycket plats. Det finns två typer av axiallager, enkelverkande och dubbelverkande axialkullager. Lagerdelarna är isärtagbara som betyder att de kan monteras separat [4].



Figur 14. Ett cylindrist axialrullager där husbrickan och axelbrickan är utpekade.

- **Axialnålrullager**

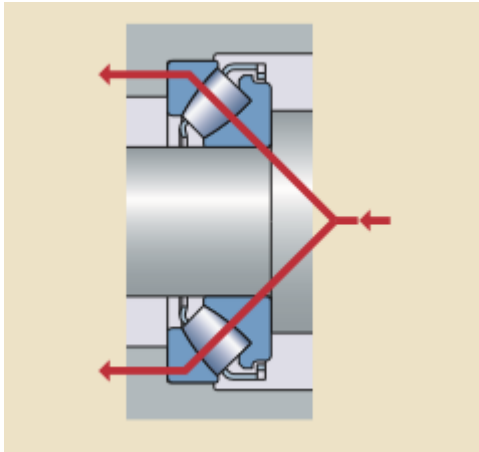
Lagret är konstruerad av en hållare och ett stort antal nålrullar och kan ta upp stora axial- och stötbelastningar. Axialnålrullager är styva och behöver ett litet utrymme. Möjlighet finns för dubbelverkande axialnålrullager genom att sätta ihop två axialnålrullagerkransar och två lagerbrickor med en mellanbricka. Dubbelverkande lager klarar av axialbelastningar från båda riktningar [4].



Figur 15. Ett axialnålrullager.

- **Sfäriska axialrullager**

Sfäriska axialrullager är byggda att klara stora radiella och axiella belastningar samt klara av höga varvtal. Lagret har löparbanor som är konstruerade för att ha plats för ett stort antal av asymmetriska rullar. Eftersom rullkropparna i lagret är sfäriska tillåter det en snedställning av axel i förhållande till lagerhuset. Lagret är isärtagbar vilket betyder att husbrickan inte nödvändigt monteras tillsammans med axelbrickan och rullsatsen [4].



Figur 16. Ett sfäriskt axialrullager där belastningen som verkar på lagret syns.

2.3.3. Hydrodynamiska smorda lager

Glidlager eller hydrodynamiska smorda lager använder olika typer av smörjningsmedel för att ta upp belastningar. Medlets egenskaper och flödes hastighet spelar stor roll i lagrets bärförmåga. Det finns två olika sätt att använda den metoden på, det ena är genom att använda plana blocklager som tar upp axiella belastningar och det andra är att använda radiallager som tar upp radiella belastningar. Det finns även rörformiga cylindriska, helomslutande lager som tillhör hydrodynamiska lager och kallas bussningar. Lagret har en tjocklek på några millimeter och fästs vid last upptagande konstruktionen genom limning, pågjutning, eller krympning [9].

2.3.4. Coopers delbara lager

Företaget Cooper uppfann år 1907 den delbara lagerenheten. Cooper kom på den lösningen och den typer av lager för att göra reparationer enklare att utföra och därmed gör att stilleståndstiden för maskinen under underhåll minskar.

Denna typ av lager har lägre bärförmåga men den är lätt och billig att upprätthålla. Fördelarna med coopers rullager är att de kan monteras i svåra och instängda utrymmen som gör att montering kan ske utan att demontera andra komponenter. På grund av att lagret är delbar så kan det bli enklare med att lyfta, hantera och även byta lagret när det behövs.

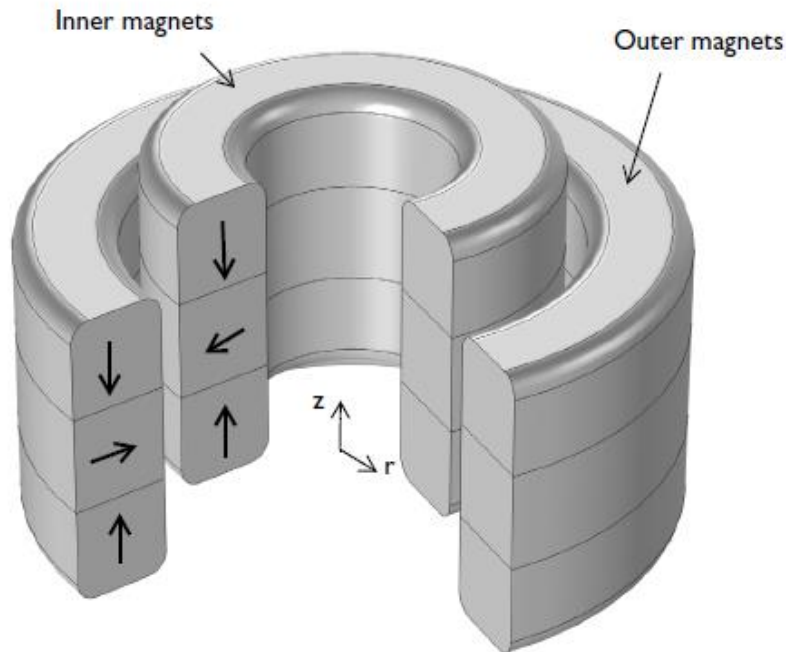
Alla mätningar och justeringar genomförs vid tillverkning så ändringar inte uppstår på plats vid montering. Delbara Cooper lager förekommer i olika former och design, dvs det finns både axiella och radiella delbara lager [5].



Figur 17. Ett cylindriskt delbart lager.

2.3.5. Magnetiska lager

Ett lager som använder den magnetiska kraften för att ta upp laster. Magnetiska lager är uppdelade i två delar, inner magnet och ytermagnet. Eftersom profilerna inte kommer i kontakt med varandra erhålls bara luftmotståndet som betyder att det blir inga kraftförluster och att teoretiskt sätt så har lagret en oändlig livslängd och kräver nästan inga reparationer. Dock blir lagret varm och då måste kylmedel användas för att sänka temperaturen. Magnetiska lager har inga gränser på hur stora belastningar de tar för att ju större lagret är desto mer last klarar det av och desto mer kommer det att kosta. Det kan vara både positivt och negativt eftersom lagret har inga begränsningar men det måste vara betydligt större och väger mer än vanliga lager. De kan ta upp både radiella och axiella belastningar [6].



Figur 18. Ett magnetiskt lager där inre och yttre magneterna är utpekade.

2.4. Lagertillbehör

För att låsa fast lagret på en axel finns det olika låsanordningar som kan tillämpas och två av dessa beskrivs i detta kapitel.

2.4.1. Låsmuttrar

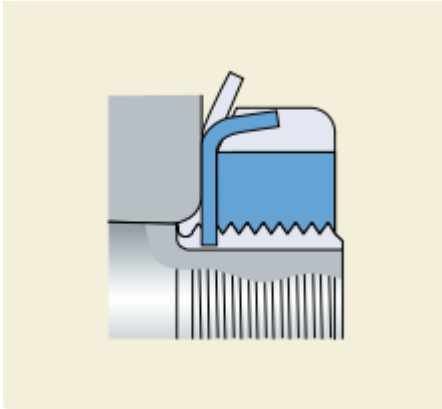
Låsmuttrar används för att låsa och fixera lager på axlar. Låsmuttrar underlättar monteringen av lager och gör ingen skada på axeln.

Vid användning av en låsmutter måste man försäkra att muttern sitter fast och är tillräckligt spända för att minska risken att det lossnar. Vid val av en låsmutter måste hänsyn tas till olika faktorer som t.ex. axelns läge dvs om den pekar i radiell, axiell eller båda riktningarna, hur mycket den kommer att belastas och hur ofta muttern tas loss [10].

De olika låsmuttrarna förekommer i fem olika typer:

- **Låsbricka**

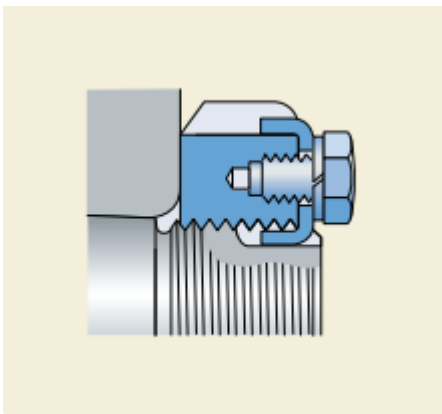
Låsbricka används tillsammans med mutter. Den griper i ett kilspår som finns i axeln och låser muttern genom att en av tungorna böjs ner i en av öppningarna på muttern [10].



Figur 19. En låsbricka.

- **Låskramp**

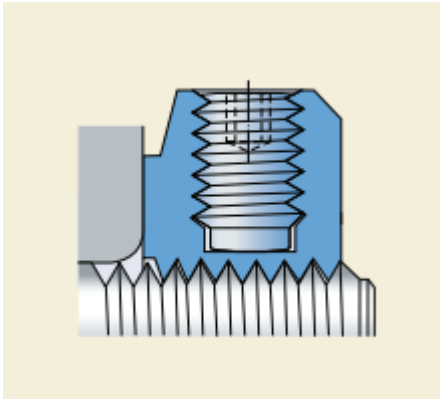
Den monteras på en mutter genom att använda en skruv. Krampan spänns fast i ett spår i muttern och en kil i axeln [10].



Figur 20. En låskramp.

- **Låsskruvar**

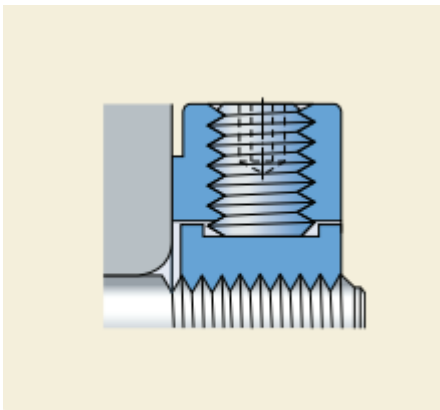
Mutterns gänga pressas mot axelgängen med hjälp av en skruv för att stoppa rörelsen på muttern. Det behövs varken låsbricka eller kilspår i axeln [10].



Figur 21. Låsskruvar.

- **Låsanordning**

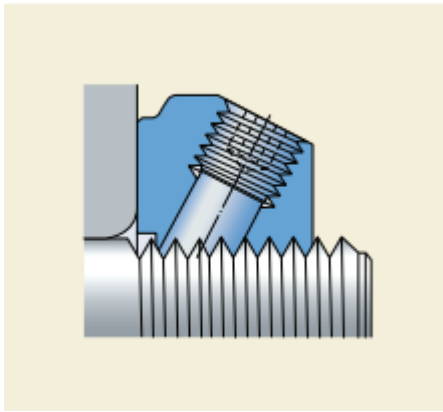
Låsanordningen fungerar på så sätt att en stålinsats används som en integrerad del av muttergången som pressas mot axelgången med hjälp av en stoppskruv för att förhindra att muttern rör sig. Det behövs varken låsbricka eller kilspår i axeln [10].



Figur 22. En låsanordning.

- **Låstappar**

Tre låstappar som placeras och monteras på jämnt avstånd från varandra runt mutterns omkrets. En stoppskruv används för att pressa låstappen mot axeln men en skruv som har samma lutning som mutterns gängflanker [10].



Figur 23. Låstappar.

2.4.2. Lagerhus

Lagerhus används för att göra det enkelt att installera lager och axlar, samtidigt som lagret får ett skydd, förlänger drifttiden och göra det enklare att utföra reparationer vid behov. Det förekommer i många storlekar och kan utformas för att uppfylla specifika designkrav samt andra krav som laster och varvtal [8].



Figur 24. Olika typer av lagerhus [16].

3. Metod

Under projektgången kommer en mängd olika metoder att användas för att fullfölja projektet. De olika metoderna är uppdelade i fyra olika kategorier: förstudie, konceptgenerering, konceptutvärdering och konceptval och detaljkonstruktion.

3.1. Förstudie

Metoderna i förstudiefasen har som uppgift att ge en beskrivning av den befintliga produkten, samt hitta krav och önskemål genom att utföra intervjuer och djupare analys.

- **Intervju**

Huvudsyftet med intervjuerna är att få en uppfattning av vilka krav och önskemål som ställs på produkten men även få en inblick i hur olika lagerarrangemang kan se ut i olika situationer. Därför ska intervjuer utföras med en produktutvecklingsingenjör på SeaTwirl AB, samt med en applikationsingenjör på SKF. Dessa intervjuer ska utföras i form av möten, telefonsamtal eller mejl.

För att genomföra intervjuerna ska semistrukturerade och öppna frågor användas för att skapa en bredare diskussion vilket ger utrymme för nya idéer. På så sätt kan även de som intervjuas framföra sina åsikter och tankar.

- **Beskrivning av nuvarande produkt**

För att ge en tydligare förståelse av den befintliga produkten ska prototypen SeaTwirl S1 analyseras där mest fokus ligger i själva lagerarrangemanget och de begränsade områden till lagerarrangemanget. Beskrivningen leder till en bättre förståelse kring funktionerna och de begränsningar som systemet har. Denna produkt ska även användas som referens till de olika matriserna senare under projektet.

3.2. Kravspecifikation

En kravspecifikation är ett dokument som skapas utifrån problemformuleringen tidigt i produktutvecklingsprocessen. Den har till uppgift att specificera de olika kraven och önskemål som måste uppfyllas. Dokumentet är en grund för alla tekniska designaktiviteter och säkerställer att alla relevanta faktorer från intressenterna redovisas. Intressenter som involveras i projektet är beställaren och kunderna [17].

3.3. Konceptframtagning

Följande metoder ska resultera i skapande av de första koncepten:

- **Benchmarking**

Metoden används för att skapa en referenspunkt för att veta vart de olika koncepten underpresterar. Benchmarking handlar om att undersöka marknaden för att se vad för befintliga lösningar det finns redan för problemet. Genom benchmarking kan andra intressanta idéer dyka upp som kan sedan utvecklas för att skapa ett bättre koncept [11].

- **Brainstorming**

Brainstorming är en metod som genomförs av en grupp med olika kompetenser för att försöka komma på så många användbara idéer som möjligt. Gruppmedlemmarna kombinerar vad de har för förslag och utmanar varandra för att i slutändan komma på mer kreativa och lämpliga lösningar.

Med hjälp av post-it lappar skrivs ner alla idéer som dyker upp och sedan visas de tydligt på en tavla där alla gruppmedlemmar kan se.

Tanken bakom brainstormingen är att tänka fritt och skriva ner alla lösningar till problemet. Bedömningen på om lösningen är användbar eller fungerar görs senare [17].

- **Val av lagerkombinationer**

För att välja de lämpligaste lagerkombinationerna till uppgiften ska de olika typerna av lager rangordnas. Då gjordes olika undersökningar för de olika typerna av lager

genom att studera bärformågan för de olika lagren. De typerna som har störst bärformåga i radiell och axiell riktning sällades i en tabell. Slutligen paras de olika lagertyperna som finns kvar ihop för att bilda olika lagerkombinationer som skall appliceras i de olika koncepten. Kravet för kombinationerna är att de tar upp radiell och axiell kraft.

- **Konceptgenerering**

För att skapa och förbättra nya koncept används sex taktiker. De sex taktikerna är: *Re-use*, *Re-fine*, *Re-duce*, *Re-inforce*, *Re-form*, *Re-place* [18]. Taktikerna beskrivs nedan.

Re-use

En befintlig lösning används som kan hittas till exempel genom benchmarking. Här behöves det inte göra någon ändring i lösningen och detta leder till att tid sparas och förenklar arbetet.

Re-fine

Ett delsystem som inte uppfyller något krav kan utvecklas i lösningen för att det ska vara mer passande till problemet.

Re-duce

När en lösning har andra funktioner som inte behövs för att lösa problemet, kan de onödiga funktionerna tas bort. Detta är bra för då minskas produktionskostnader och skapar mer fokus på huvudproblemet.

Re-inforce

När en lösning uppfyller de flesta kraven men det behövs att göra en tillökning av delsystemen för att det ska uppfylla alla krav.

Re-form

Med denna teknik så görs stora förändringar hos befintliga lösningar genom att förbättra de delsystem som finns kvar. Detta gör att lösningen kan vara lämplig för en annan marknad. *Re-form* taktiken används bara i följd av en planering.

Re-place

Här skapas en helt ny lösning som löser huvudproblemet och uppfyller alla krav. Taktiken är också den svåraste eftersom en ny design behöver skapas eller bygga en ny maskin för att skapa det nya systemet.

3.4. Konzeptutvärdering och konceptval

I det avsnittet diskuteras olika metoder för att bestämma och utnämna de mest passande koncepten för projektet.

- **Elimineringsmatris**

Elimineringsmatris är en metod som används tidigt i utvärderingsprocessen då antalet konceptlösningar är större för att sälla bort de koncept som inte uppfyller de kriterier som är givna i matrisen och välja vilka koncept som går vidare i processen. De koncept som går direkt vidare till nästa steg ska uppfylla alla dessa kriterier [17]. Vissa kan behöva undersökas ytterligare för att bestämma ifall de ska gå vidare eller elimineras. Genom att skriva tecken +, - och ? väljs om lösningen är tillräcklig bra att gå vidare med, om den ska elimineras eller om den ska undersökas ytterligare och sedan bestämma om den ska fullföljas eller elimineras. De olika kriterierna bedömer om lösningsalternativen:

- löser huvudproblemet
- uppfyller kraven
- kan realiseras i verkligheten
- är inom kostnadsramen
- stabil konstruktion

- **Pughs matris**

Det är en metod som används för att ta reda på vilka är de bästa koncepten i ett projekt genom att eliminera andra koncept som är mindre bra eller inte uppfyller alla krav. Alla koncept som har tagits fram jämförs med en referensprodukt [17]. Om ett koncept är bättre än referensen i en kategori då får konceptet ett "+". Om ett koncept är sämre än referensen i en kategori då får konceptet ett "-". Om konceptet uppfyller samma krav som referensen då får konceptet ett "0". För att bestämma vilka

koncept har högst bedömning summeras alla “+” som ett koncept har fått och subtraherar alla “-”. De som har störst summa går vidare.

3.5. Detaljkonstruktion i CATIA V5 (CAD)

Datorstödd design (CAD) är ett system som hjälper till vid skapande, modifiering, analys eller optimering av en design. CAD-mjukvara används för att öka designerns produktivitet, förbättra kvaliteten på designen, förbättra kommunikationen genom dokumentation och skapa en databas för tillverkning. CAD-mjukvara för mekanisk konstruktion använder antingen vektorbaserad grafik för att avbilda föremålen för traditionell ritning eller kan också producera rastergrafik som visar det övergripande utseendet på utformade objekt. I detta projekt användes mjukvaran CATIA V5 för att skapa 3D modeller av de genererade koncepten [15].

4. Resultat

I detta kapitel presenteras de resultat som togs fram med hjälp av de metoder som har använts. Resultaten presenteras i åtta olika punkter: förstudie, beskrivning av befintlig produkt, kravspecifikation, val av lagerkombination, benchmarking, konceptframtagning, elimineringsmatris, pughs matris och detaljkonstruktion.

4.1. Förstudie

I detta kapitel redovisas de resultat som togs fram under förstudiefasen.

- **Intervjuer**

Gruppen hade en intervju med en applikationsingenjör från SKF som heter Torbjörn Holmqvist och jobbar med Coopers delbara lager. Nedan följer de frågor som ställdes och de svar som erhöles:

- **Vad är skillnaden mellan vanliga lager och delbara lager i livslängd och bärförmåga?**

"Delbara lagers bärförmåga är nästan lika stor som halva bärförmågan för ett standard lager samt att livslängden kommer att vara kortare ungefär en tredje/fjärdedel av ett standard lager. Det betyder att om delbara lager ska uppfylla kraven för bäringsförmåga och livslängd så måste de vara mycket större i storlek än de standard lagen."

- **Vad har man för monteringsmetoder?**

"För delbara lager så monteras lager delarna med varandra och på axeln med hjälp av skruvar."

- **Hur långt tid tar det att montera respektive demontera lagret jämfört med vanliga lager?**

"Delbara lager är användbara när de ska sättas fast i slutet på en axel där man inte kommer åt axeländan eller när man har olika kablar och andra kroppar på lagringen.

Att använda Coopers delbara lager kan absolut underlätta montering och demonteringen i sådana fall.”

- **Hur ser framtiden ut? finns det nya idéer och lösningar för problemet**

”Roterande lager är inte alltid lösningen till ett sådant problem. Dynamiska glidlager eller svängkranslager kan vara andra alternativ för att lösa problemet.

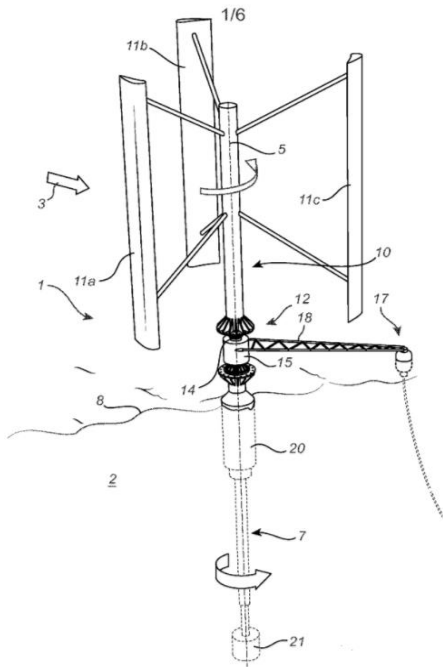
Svängkranslager kan också tillverkas i delar när dimensionerna blir så stora. Men svängkranslager används för låga varvtal. 20 rpm eller högre kan vara för högt för svängkranslager.”

- **Kommentarer gällande intervju**

Torbjörn Holmqvists åsikt om delbara lager när det gäller projektet är att det kan göra monteringen/demonteringen av lageranordningen betydligt enklare om man jämför med andra typer av lager, men att delbara lager är sämre när det kommer till livslängd och bäringsförmåga. Det är också ett av de dyra alternativen för att lösa problemet.

4.2. Beskrivning av befintlig produkt

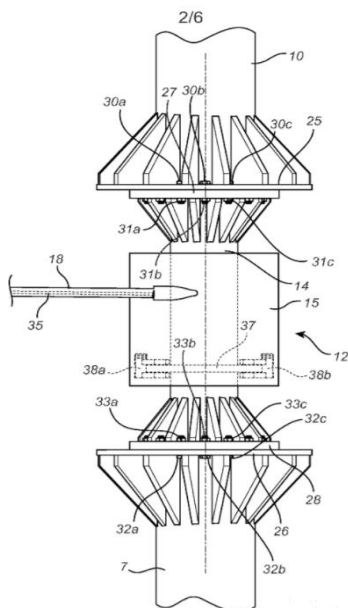
Produkten som valdes som referens är en helt fungerande prototyp som kallas SeaTwirl S1 (se figur 25). Denna prototyp har kapacitet att producera en effekt på 30 kW och har en längd på 31 meter. SeaTwirl S1 har varit i drift sedan juli 2015 utanför Lysekils kust och har klarat av alla väderförhållande som uppstår i det området.



Figur 25. SeaTwirl S1 [19].

- Generatorhus

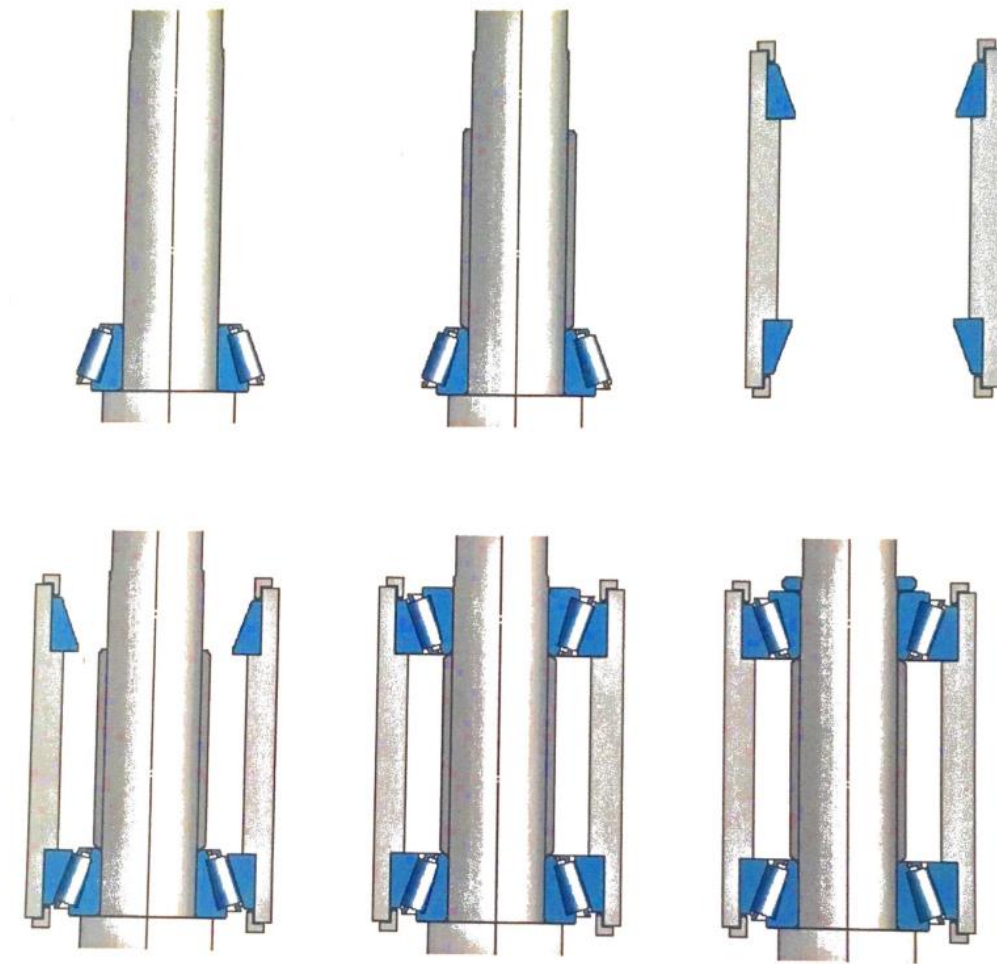
Generatorhuset är den delen av vindkraftverket där generatoren och de andra elektriska komponenter som är nödvändiga för produktion av elektrisk energi sitter. Även lagerarrangemanget befinner sig i generatorhuset. Själva skalet på generatorhuset används som skydd för dessa komponenter men även som fäste för en momentarm och vajrar som medför stabilitet i vindkraftverket (se figur 26).



Figur 26. Generatorhus och koppling mellan de olika axlarna för SeaTwirl S1 [19].

- Lagerarrangemang

Lösningen på lagerarrangemanget på S1 består av två koniska rullager som är monterade på axeln. Det understa lagret vilar på axeln och är kopplat till översta lagret med två rörliknande profiler som sitter på ut- och insidan av lagren. Dessa två profiler har som uppgift att överföra förspänning och belastningen mellan de två lagren. Monteringsförfarande för lageranordningen framgår i Figur 27.



Figur 27. Monteringsförfarande för lageranordning i SeaTwirl S1[20].

4.3. Kravspecifikationen

De olika kraven och önskemål med produkten har sammanställt i tabell 1. Alla önskemål har rangordnats på en skala mellan 1-5 som anger betydelsen av önskemålet.

Tabell 1. Preliminär kravspecifikation.

Chalmers		Kravspecifikation för lageranordning					
Utfärdare: Alaa och Darko			Skapad: 2017- 10-10				
	Kriterier		Målvärde	K/Ö	Vikt	Verifieringsmetod	Referens (kravställare)
	Funktion/er						
		Rostfritt	Hela livslängden	K		Materialteknik	Projektgrupp
		Inte rosta sönder					
		Monter/demonterbar	Hela livslängden	K		Design och ritteknik	SeaTwirl
		Man ska kunna montera/demonter lageranordningen					
		Tar upp axiella/radiella krafter	10 MPa	K		Hållfasthetsberökning	SeaTwirl
		Lageranordningen ska kunna klara av alla krafter som uppkommer					
		Tar upp moment	1 MNm	K		Hållfasthetsberäkning	SeaTwirl
		Lageranordningen ska kunna klara av moment som uppkommer					
1	Prestanda						
	1.1	Tåla vibrationer	Vibrationer från rotationen	K		Hållfasthetsberäkning	Projektgrupp
2	Miljö						
	2.1	Återvinningsbart	Återvinningsbara material	Ö	4	Materialteknik	Projektgrupp
3	Livslängd						
	3.1	Livslängd	15-20 år	K		Utmattningsprov	SeaTwirl
4	Underhåll						
	4.1	Lätt att reparera	Modul uppbyggnad	Ö	5	Test vid simulation	Projektgrupp
5	Pris						
	5.1	Pris	Så billigt som möjligt	Ö	3	Materialteknik/tillverkningsteknik	Projektgrupp
6	Storlek						
	6.1	Passa med roterande axel	Inre diameter 2m	K		Design och ritteknik	SeaTwirl
7	Vikt						
	7.1	Vikt	Väger så lite som möjligt	Ö	4	Design och materialteknik	Projektgrupp

4.4. Val av lagerkombinationer

Undersökningen resulterar i två olika tabeller som visar vilka lager är mest lämpliga att klara av de krafter som uppstår i vindkraftverket samt vilka monterings -och demonterings metoder kan användas för de valda typerna.

- Lagertyper

I första fasen sållades bort alla kullager eftersom deras bärförmåga inte är lika stor som rullager och då erhöles följande resultat:

Tabell 2. De olika lagertyperna som gick vidare och vad de klarar av för belastningar.

Radiell bärförmåga	Axiell bärförmåga	Axiell och radiell bärförmåga
Cylindriska rullager	Cylindriska axialrullager	Koniska rullager
Nålrullager	Axialnålrullager	Sfäriska axialrullager
Delbara lager	Delbara lager	Sfäriska rullager
Magnetiska lager	Magnetiska lager	Delbara lager
CARB		Magnetiska lager

- Lagerkombinationer

De olika lagren som kan kombineras för att uppfylla kravet att ta upp axiella och radiella krafter upp presenteras i Tabell 3. Det finns 63 olika kombinationer som kan användas för att kravet ska uppfyllas.

Tabell 3. Olika lagerkombinationer som klarar av radiella samt axiella belastningar.

LAGERTYP	Cylindriska rullager	Nållager	Sfäriska rullager	CARB	Cylindrisk Axialrullager	Axialnållager	Sfäriska axialrullager	Koniska rullager	Delbara lager	Magnetiska lager
Cylindriska rullager	-	-	+	-	+	+	+	+	-	-
Nållager	-	-	+	-	+	+	+	+	-	-
Sfäriska rullager	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-
CARB	-	-	+	-	+	+	+	+	-	-
Cylindriska axialrullager	+	+	+	+	-	-	+	+	+	-
Axialnållager	+	+	+	+	-	-	+	+	+	-
Sfäriska axialrullager	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-
Koniska rullager	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-
Delbara lager	-	-	+	-	+	+	+	+	-	-
Magnetiska lager	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+

Går att kombinera "+"

Går ej att kombinera "-"

För att till slut välja vilka lager som kan tillämpas i de olika koncepten användes bilaga 1 som betygsätter de mest vanliga lagertyperna utefter deras egenskaper. A är det bästa betyget och F är sämsta betyget. NR betyder att lagertypen inte rekommenderas för den valda funktionen.

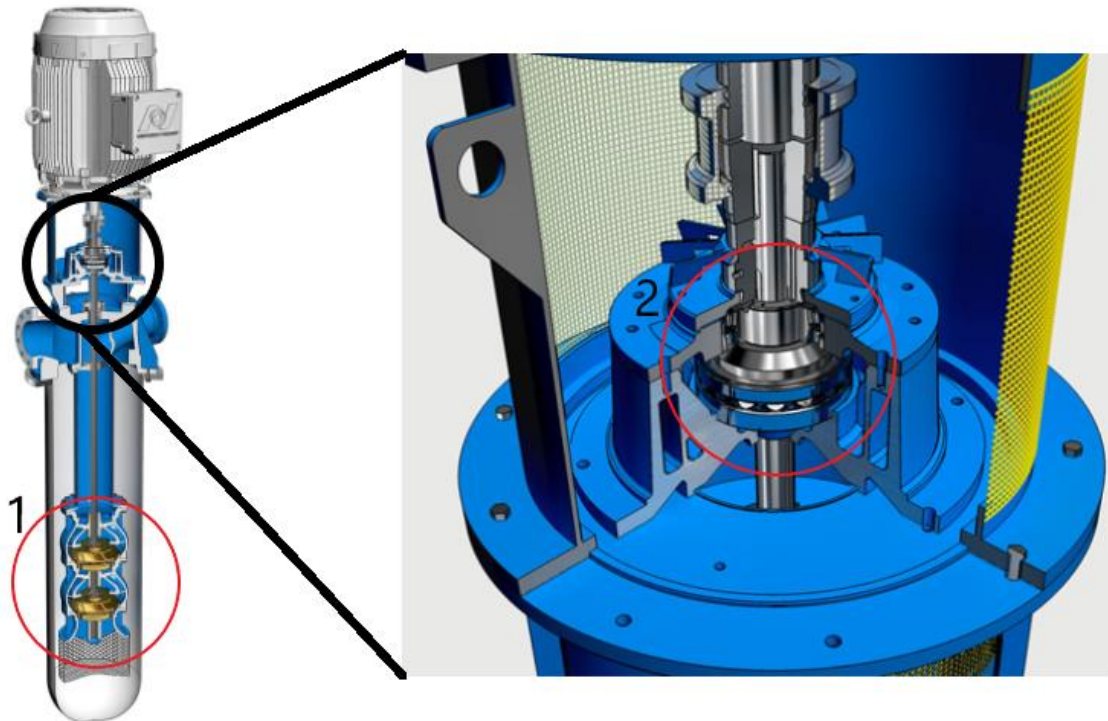
4.5. Benchmarking

En undersökning gjordes för att hitta befintliga produkter som löser samma eller liknande typ av problem. I undersökningen söktes lösningar där vertikala axlar används för att se hur lagringsproblemen är lösta i de produkterna. Benchmarking resulterade i olika idéer på hur en vertikal axel kan lagras och dessa idéer presenteras i punkt 4.6.

- **Vertikal pump**

En vertikal centrifugalpump är en pump som används för transport och cirkulation av vätskor från lägre till högre nivåer [13].

En sådan pump består av ett rör är nedgrävd i marken och en elektrisk motor som är monterad ovanpå röret. I mitten av röret ligger en axel som driver de andra komponenterna i pumpen med hjälp av en elektrisk motor. Lösning på hur denna axel är lagrad finns i figur 28.



Figur 28. En vertikal pump där de röda cirkelarna visar var lagringarna är placerade.

Innanför de röda cirkelarna i Figur 28 sitter lagringen för axeln. I cirkel nummer 1 används radiallyager medan i cirkel nummer 2 syns en kombination av axial- och radiallyager.

4.6. Konceptframtagning

Efter förstudiefasen och användning av de olika metoderna som beskrivits i metod delen har olika koncept tagits fram som skissades först på papper och sedan digitalt med mjukvaran Visio. Varje koncept som togs fram innehåller en lösning på ett lagerarrangemang för projektet. Två viktiga frågor besvarades framtagningen av koncepten:

- Vilka typer av lager kan kombineras för att lösa huvudproblemet?

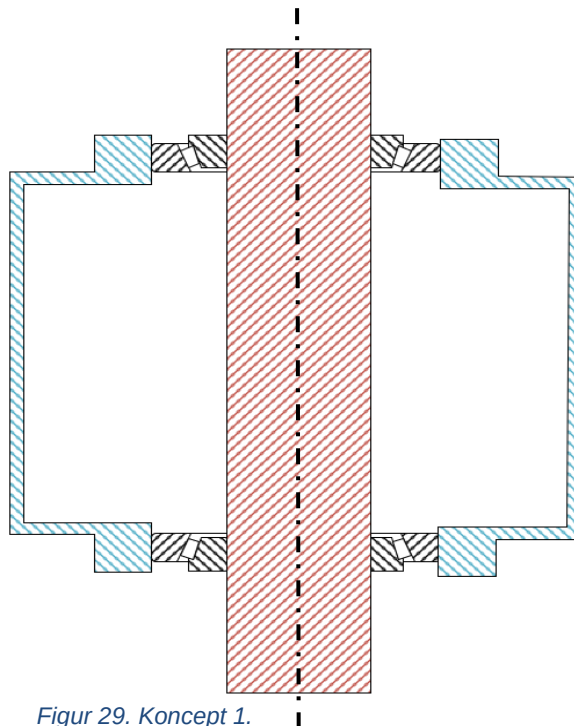
- Hur ska lagerkombinationen monteras och demonteras på axeln och generatorhuset?

- **Koncept 1**

Detta koncept bygger på att generatorhusets skal består av två delar. Två förlängda detaljer befinner sig vid varsin öppning av generatorhuset där axeln passerar. Dessa detaljer har funktionen att hålla ihop lagren när skalet är ihopsatt. Då sitter lagren utanför generatorhuset men innanför de förlängda detaljerna. De båda delarna sätts ihop med hjälp av skruvar. I detta koncept används två koniska rullager. Koniska lager klarar av belastningar i båda riktningar på ett bra sätt samt att det är enkelt att ta isär ytterringen från innerringen.

Montering och demontering sker i 2 steg:

1. montera lager 1 och 2 på axel
2. spänn fast dessa lager genom att sätta ihop generatorhusets två delar



Figur 29. Koncept 1.

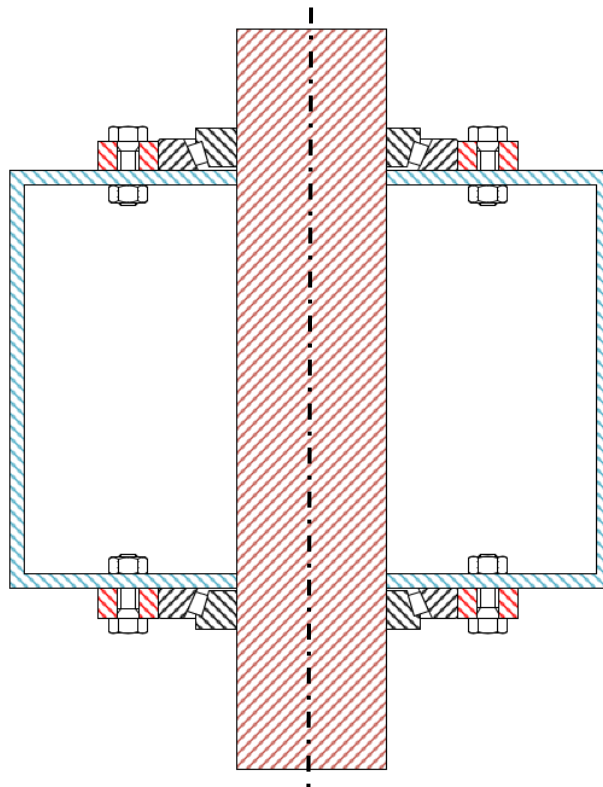
- **Koncept 2**

Detta koncept fungerar på så sätt att två lager av typen koniska rullager möjliggör rotation i axeln. De två lagren är placerade utanför generatorhuset men precis intill

toppen- och botten profilen. Ett runt lagerhus som innehåller genomgående hål parallella med rotationsaxeln är placerad på varje lager. Skruvar och muttrar håller flänsarna ihop med generatorhuset. På så sätt kan sparas tid för montering och demontering eftersom det inte krävs någon borttagning av generatorhusets delar för att komma åt lagren.

Montering sker i tre steg:

1. montera ytterringar och rullkroppar i respektive lagerhus
2. montera lagerhuset till generatorhuset med ett antal skruvar
3. montera innerringarna till lagren



Figur 30. Koncept 2.

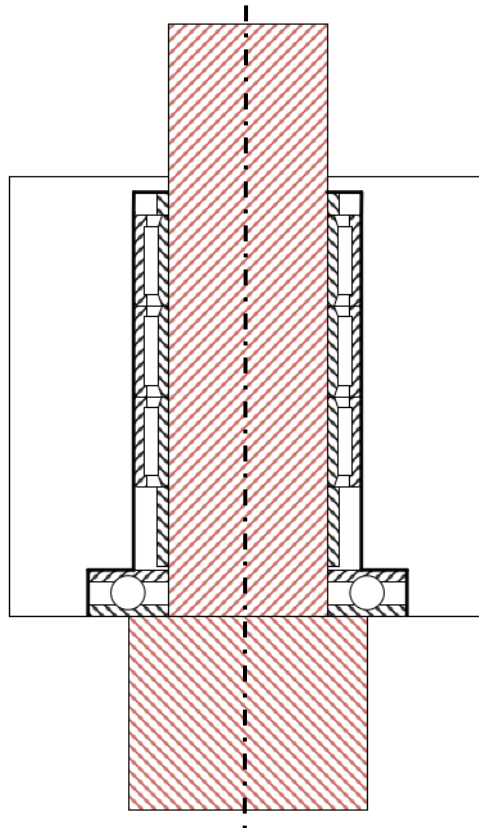
• **Koncept 3**

I detta koncept används ett cylindriskt axialrullager som vilar på en fläns och flera nålrullager som även de vilar på en fläns. Koppling mellan axel och generatorhus uppstår när ett lagerhus vars insida är i kontakt med lagren monteras fast i generatorhuset.

Montering sker i steg:

1. axiallagret appliceras på axeln
2. nålrullagret appliceras på axeln

3. lagerhuset appliceras på lagren



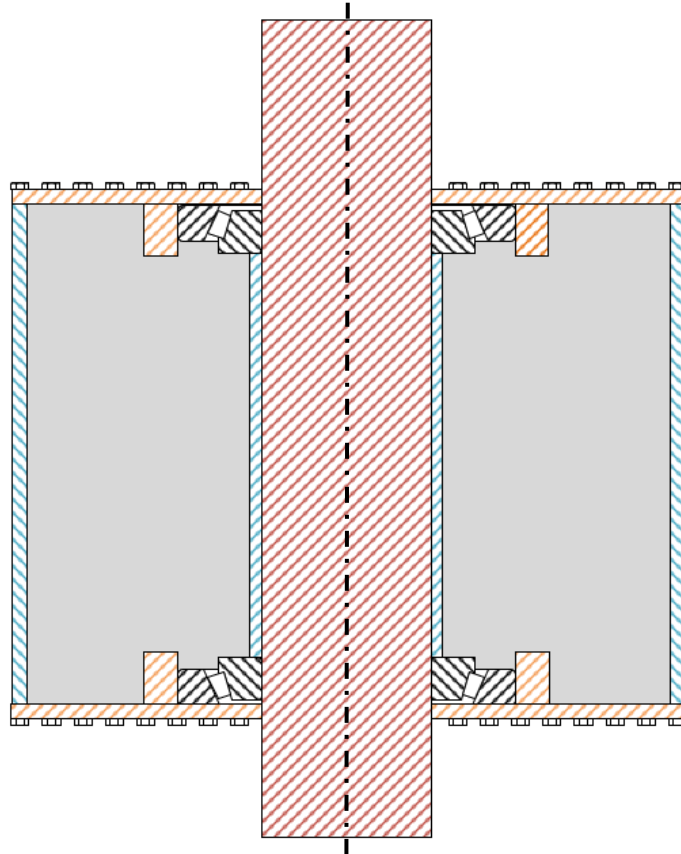
Figur 31. Koncept 3.

● Koncept 4

I detta koncept används två skivor som är placerade på toppen- och bottendelen av generatorhuset. Dessa skivor sitter fast till det runda skalet av generatorhuset med hjälp av skruvar. Två koniska rullager är monterade på insidan och varje skiva och sedan monterade på axeln. Anledning till koniska lager är att klara av belastningar i båda riktningar på ett bra sätt.

Montering och demontering sker i tre steg:

1. lagrarnas innerringar appliceras på axelns olika ändar
2. ytterringarna och rullkropparna monteras i respektive lagerhus som finns på båda skivorna
3. skivorna monteras på skalet med ett antal skruvar



Figur 32. Koncept 4.

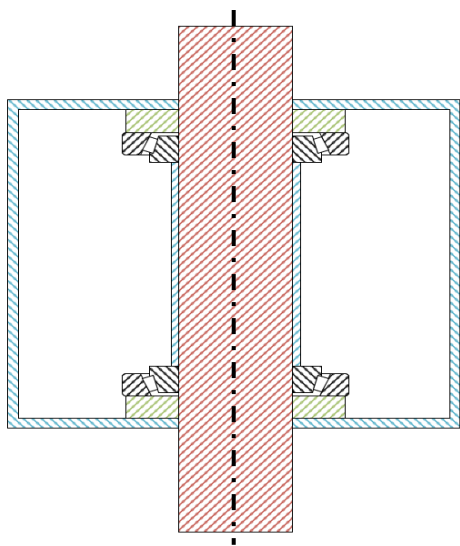
- **Koncept 5**

Tanken bakom konceptet är att två delbara koniska rullager används för denna anordning, eftersom de kan ta båda axiella och radiella krafter samt att de funkar bra för att bygga de som delbara lager.

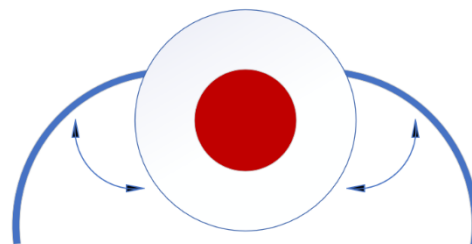
Lagren ligger på ett avstånd från varandra för att de ska ta upp moment.

Generatorhusets skal består två skivor som stödjer sig på två låsmuttrar. Skalet mellan dessa skivor går att öppna på ena sidan och då fås en öppning på 240 grader (se figur 32).

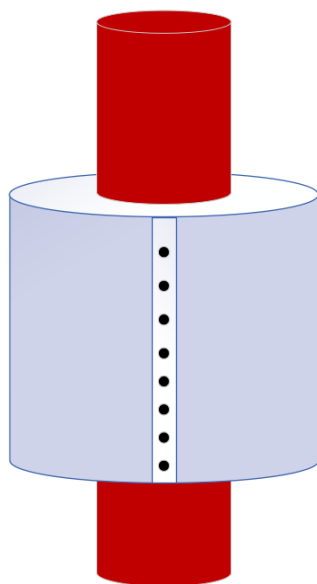
Vid montering eller demontering, kan generatorhuset öppnas och dela lagret i två delar och spänna fast det på axel eller ta loss den. Med den metoden behövs inte ta loss axel för att montera eller demontera lagren.



Figur 33. Lageranordning för koncept 5.



Figur 34. Öppet generatorhus (vy uppifrån).



Figur 35. Stängt generatorhus.

• **Koncept 6**

Eftersom generatorhuset och lageranordningen sitter fast på axeln, kan axeln göras demonterbar. Genom att ta loss den axel som är kopplad till generatorhuset kan den tas till land för att göra reparation och underhåll där. Samtidigt kan ett färdigmonterat och fungerande generatorhus som redan finns på en annan axel monteras på vindkraftverket. Lösningen leder till att stilleståndstiden för vindkraftverket minskar.

Här kan olika lagerkombinationer användas som kommer att monteras och demonteras på land.

Exempel på lager som kan användas:

Fall 1:

Lager 1: Sfäriska rullager är ett alternativ som kan vara aktuellt för projektet eftersom det klarar radiella och axiella belastningar från båda riktningar. Det kan tillverkas i rostfritt stål men det kan leda till att bärförmågan minskar i jämförelse med ett lager som är tillverkat i kromlegerat stål.

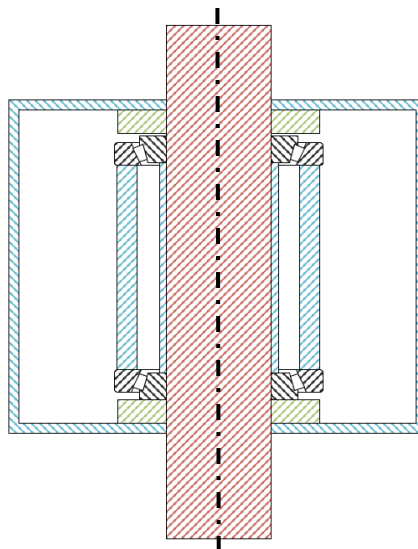
Lager 2: Cylindriska rullager har förmågan att ta upp stora radiella krafter samt snabba accelerationer och höga varvtal.

Fall 2:

Lager 1: Använd ett CARB lager. CARB lager kan ta stora radiella belastningar samt att de reducerar vibrationer och ljudnivån som uppkommer vid rotationen. Lagret har en lång livstid och den behöver inte repareras så ofta.

Lager 2: Axialnålrullager klarar av höga axiella belastningar och är passande till lageranordningen.

Lagren i båda fallen är fixerade på samma sätt som i referenslösningen (se figur 27).



Figur 36. Koncept 6.

- **Koncept 7**

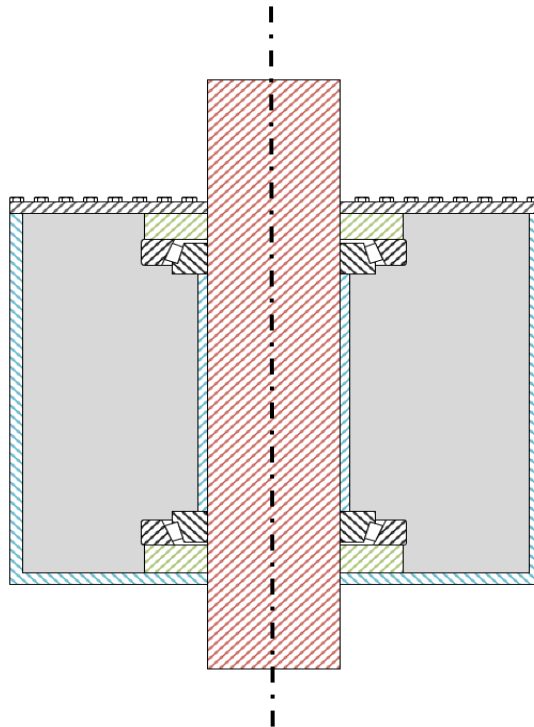
Lageranordningen i detta koncept är detsamma som referenslösningen och består av två koniska lager. För att komma åt lageranordningen lättare har en skiva använts på övre delen av generatorhuset som sitter fast på det yttre skalet med hjälp av ett antal skruvar. Tanken bakom det är att när demontering av lageranordningen sker så kan

skruvarna lossas för att sedan plocka bort den övre delen av generatorhuset (skivan).

Genom att använda koniska rullager kan monteringen och demonteringen göras betydligt enkelt, eftersom lagren är byggda så att innerringen med hållare och rullsats kan monteras separat från yttre ringen.

Steg för demontering:

1. Ta loss överdelen av generator huset.
2. Ta loss den övre låsbrickan.
3. Demontera första lagret. börja med yttre ringen och sedan inre ringen med de koniska rullar.
4. Ta loss det blåa röret (se figur 37) som håller lagren i plats.
5. demontera andra lagret. börja med yttre ringen och sedan inre ringen med de koniska rullar.



Figur 37. Koncept 7.

• **Koncept 8**

Lageranordningen består av två magnetiska lager. Den inre magneten för lagret fästs på en axel med hjälp av två låsmuttrar medans att den yttre magneten fästs på insidan av generatorhuset.

Vid demontering plockas generatorhuset bort och på så sätt kommer även yttre magneten av lagret följa med. Inre magneten kommer att sitta kvar på axeln. För att

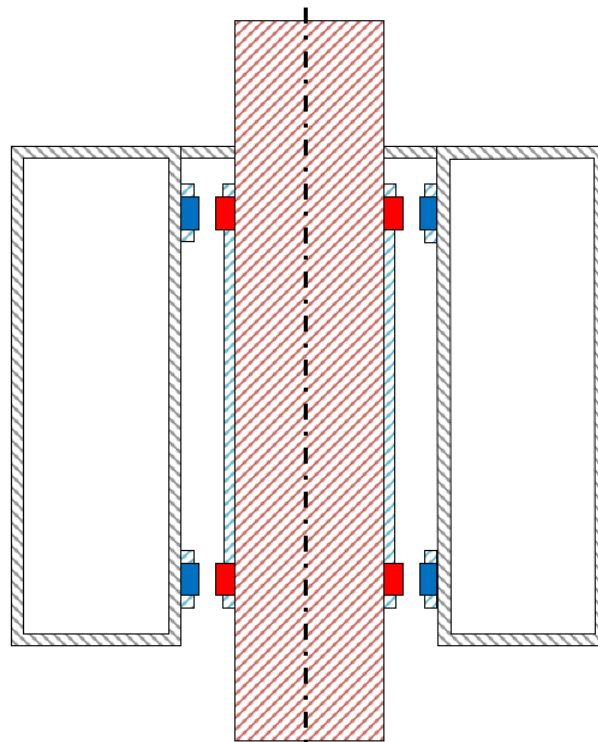
demontera den så tas låsmuttrarna bort och sedan tas den ut från samma håll som yttre magneten togs ut ifrån.

För att lösa problemet med värmeökningen som lagret genererar kan havets vatten utnyttjas och skapa ett system för att kyla ner magneterna och sänka temperaturen konstant.

Magnetiska lager valdes i det konceptet eftersom de har en oändlig livslängd, kräver få reparationer och har låga kraftförluster.

Steg för demonterings:

1. Lyft upp generatorhuset. Yttre magneterna kommer att följa med och inre magneterna kommer att sitta kvar på axeln.
2. För att ta loss magneterna (yttre och inre) ska låsbrickorna tas loss.



Figur 38. Koncept 8.

4.7. Konzeptutvärdering och konceptval

Nedan presenteras resultatet som framkom från de metoderna som har använts för utvärdering och val de koncepten.

- **Elimineringsmatris**

Genom att använda elimineringsmatris för de framtagna koncepten kunde de koncepten som inte uppfyller kraven för att arbeta vidare med filtreras bort (se Tabell 4). Gruppen valde att sätta ett frågetecken för alla koncept när de kom till kostnadsramen eftersom SeaTwirl har inte angett oss någon gräns.

Tre av koncepten gick inte vidare eftersom projektgruppen ansåg att de inte hade en stabil konstruktion. Det ledde till att de blev eliminerade.

Koncept 8 behövde gruppen söka mer information om, eftersom magnetiska lager har annorlunda egenskaper som skiljer sig från standard lager. Det är anledningen till varför den fick ett frågetecken men får ändå gå vidare till nästa steg.

fyra koncept gick även vidare till nästa steg eftersom de uppfyller alla krav.

Tabell 4. Elimineringsmatris.

Koncept	Lösar huvudproblem	Uppfyller krav	Realiserbar	Inom kostnadsram	Stabil konstruktion	Elimineringskriterier: (+) Ja (-) Nej (?) Mer info krävs Beslut: (+) Fullfölj lösning (-) Eliminera lösning (?) Sök mer info	
						Kommentar:	Beslut:
1	+	+	+	?	-		-
2	+	+	+	?	+		+
3	+	+	+	?	+		+
4	+	-	+	?	-		-
5	+	+	+	?	-		-
6	+	+	+	?	+		+
7	+	+	+	?	+		+
8	+	+	+	?	+		?

- **Pughs matris**

Koncepten som gick vidare från elimineringsmatrisen har studerats vidare och vid nästa steg rangordnades de genom att lägga in de i en Pughs matris.

Koncept 6 och 7 fick en lägre rangordning eftersom de fick minst summa.

koncept 2, 3 och 8 fick högsta och samma rangordning. Resultatet på summan för dessa koncept är markerad i grönt nedan i tabell 5.

Tabell 5. Pughs matris.

Kriterium	Alternativ					
	Referens (S1)	2	3	6	7	8
Korrosionsbeständigt	x	0	0	0	0	0
Monterbar/Demonterbar	x	+	+	+	+	+
Tar upp axiella och radiella krafter	x	0	0	0	0	0
Tar upp moment	x	0	0	0	0	0
Tåla vibrationer	x	0	0	0	0	0
Återvinningsbarhet	x	0	0	0	0	0
Stabil konstruktion	x	0	0	0	-	+
Livslängd	x	0	0	0	0	+
Lätt åtkomlighet	x	+	+	-	+	+
Pris	x	0	0	0	0	-
Storlek	x	0	0	0	0	-
Summa +		2	2	1	2	4
Summa 0		9	9	9	8	5
Summa -		0	0	1	1	2
Nettovärde		2	2	0	1	2
Rangordning		1	1	3	2	1
Vidareutveckling		Ja	Ja	Nej	Nej	Ja

4.8. Detaljkonstruktion

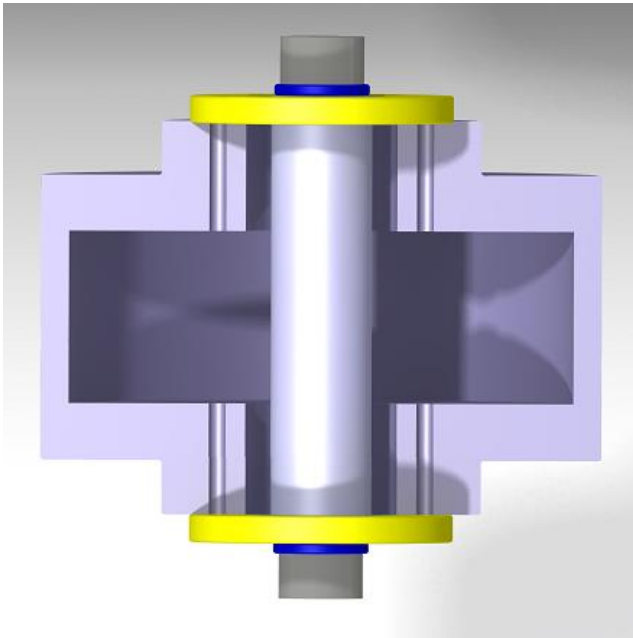
I avsnittet presenteras de skapade 3D modellerna i mjukvaran Catia. Modellerna grundas på skisserna från konceptutvecklingsfasen för de tre vinnande koncepten. Några konkreta dimensioner framkommer inte i modellerna eftersom projektbeställaren fortfarande inte har bestämt dimensionerna för vindkraftverket. Det uppstår vissa ändringar i CAD modellerna jämfört med koncepten och dessa påpekas i punkt 4.8.1. till 4.8.3.

4.8.1. Koncept 2

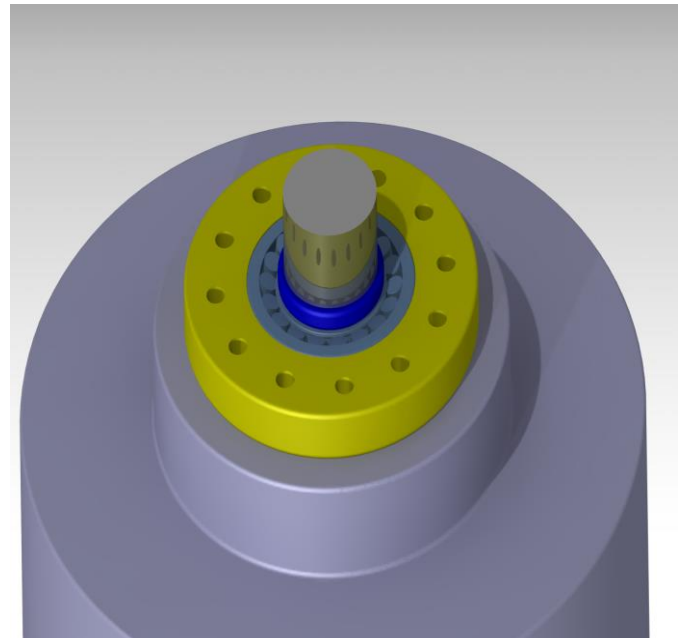
Lageranordningen består av två koniska rullager, som är parade i x-anordning dvs att den radiella belastningen verkar i lagerparets geometriska centra. Anledningen till att lagerparet är parade i en x-anordning är p.g.a. att det underlättar montering och demontering av lageranordningen.

I detta koncept märks inga större ändringar jämfört med konceptskissen i punkt 4.6 (se Figur 30. Koncept 2.). De ändringar som har utförts kan vara att låsmuttrar har lagts till på varje lager och att bredden på axeln har ändrats mellan lagerparet.

Låsmuttrarna medför starkare fixering av lagringen och är markerade med blå färg i figur 35. Axeln mellan lagerparet gjordes bredare och på så sätt vilar lagrens innerringar just på den kanten som är bredare och samtidigt minskar belastningen på generatorhuset. Lagerhuset är färgat i gul färg och behöver inte se ut som i figur 39 och 40 utan det kan anpassas till lagret och hållfastigheten. Lagerhuset kan även vara format som de exemplen i Figur 24. Olika typer av lagerhus [16].



Figur 40. Koncept 2 framifrån.

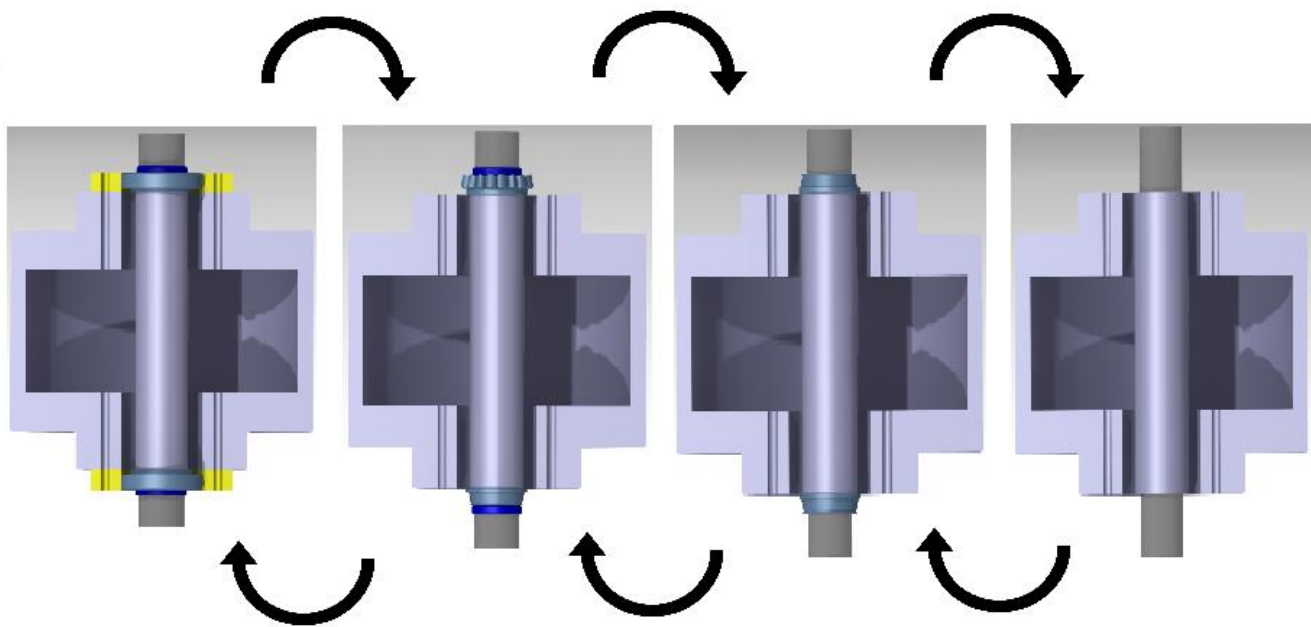


Figur 39. Koncept 2 uppfifrån.

- **Monteringsförfarande**

Figur 41 visar stegvis hur demontering och montering av lageranordningen sker. Genom att kolla på figuren från vänster till höger syns de olika stegen som krävs för att demontera lageranordningen. Montering sker enligt samma steg dock i omvänd riktning.

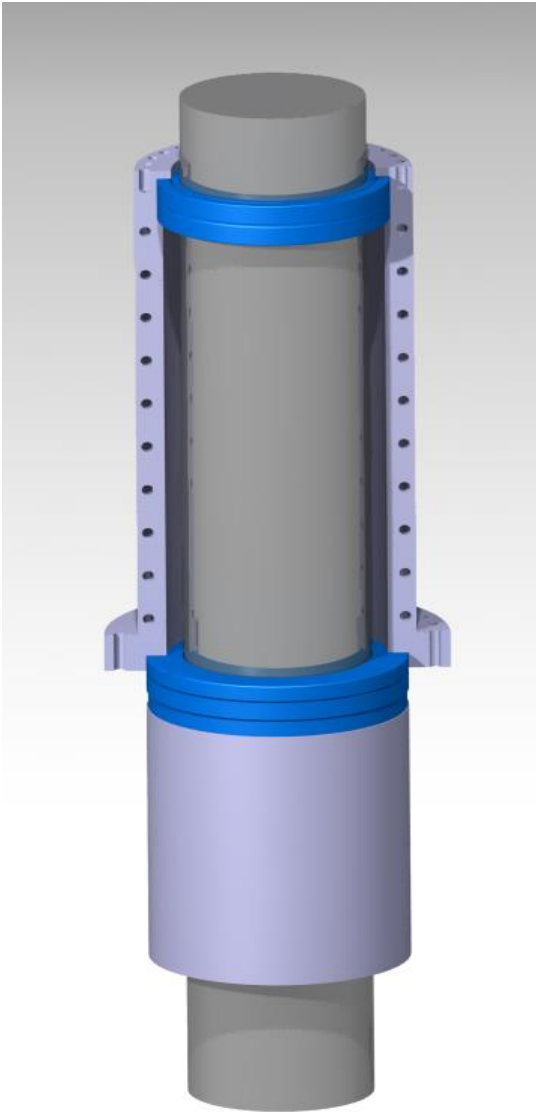
Vid demontering börjas det med att först lossa på de gula lagerhusen som är fästa med skruvar. Vid demontering av nedersta lagerhuset följer även ytterringen och de rullkropparna med, medan för det översta lagret bara ytterringen och det p.g.a. att lagerparet är parade i x-anordning. Efteråt tas låsmuttrarna som håller innerringen på plats loss och drar ut innerringarna från axeln.



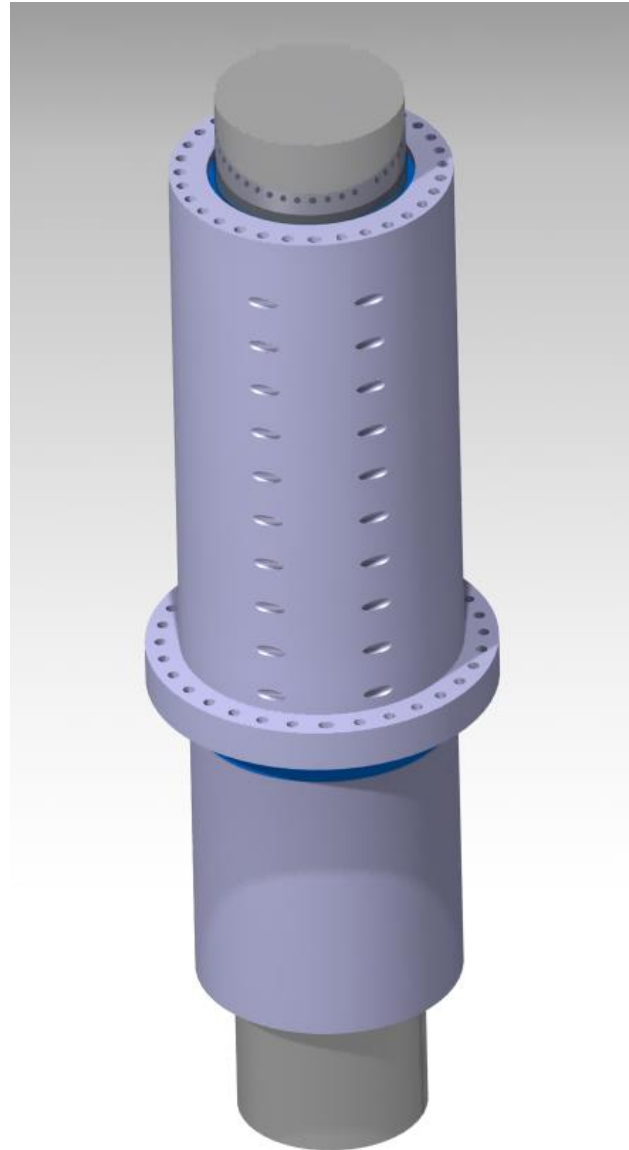
Figur 41. Monterings/demonterings steg för koncept 2.

4.8.2. Koncept 3

Vidareutveckling av koncept 3 utifrån skissen (se figur 31) gav upphov till flera ändringar i CAD modellen. De större ändringarna som utfördes på konceptet är den rörliknande detaljen som har separerats i två spegelvända delar för att möjliggöra montering och demontering av lagringen. Dessa två delar monteras ihop med hjälp av skruvar längs den långa sidan av röret. I figur 43 ses hur röret ser ut på utsidan och de hål där skruvarna som håller ihop röret sitter.



Figur 42. 3D modell för koncept 3 där de två lagren syns samt.

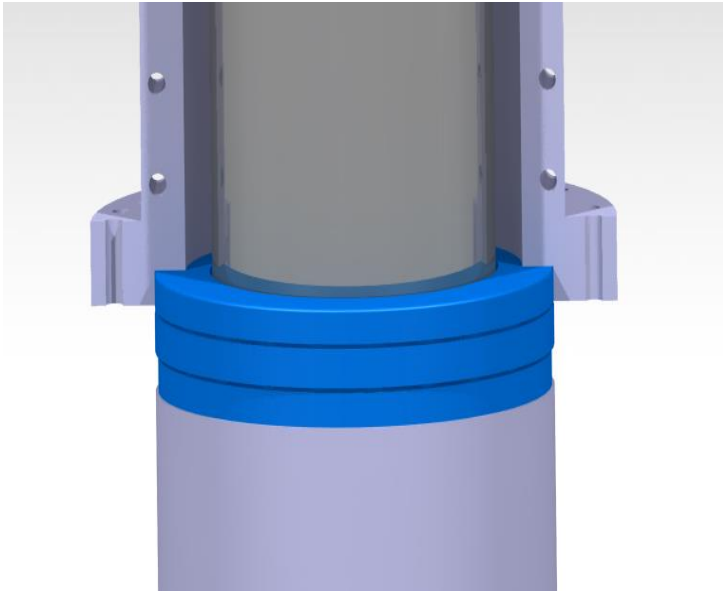


Figur 43. Utsidan på röret som håller ihop lagren för koncept 3.

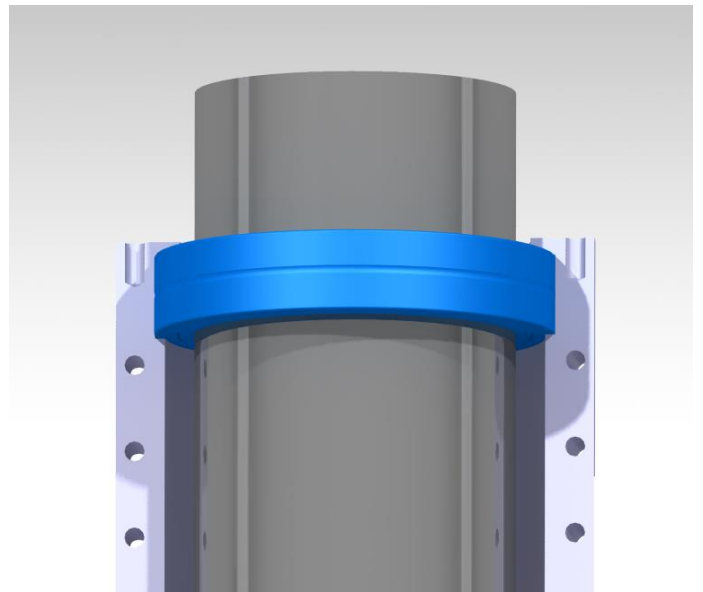
Ändringar gjordes även på själva lagringen och insidan av röret som stabiliserar lagringen. I konceptdelen användes lagring som bestod av ett cylindriskt axiallager och tre radiala nålrullager. För att förenkla bilden i koncept 3 valdes att använda bara ett nålrullager, men det betyder inte att konstruktionen kommer vara stabil med ett lager då inga beräkningar utfördes på systemet.

Hur rörets insida kommer i kontakt med de två olika lagren framgår i figur 44 och 45. I figur 42 märks inga ändringar jämfört med konceptskissen och röret vilar på det axiallager som i sin tur monteras fast på axeln. Vid det radiella lagret behövdes en

ökad stabilitet och för att lösa detta gjordes ett spår i röret som omsluter hela ytterringen på lagret (se figur 42).



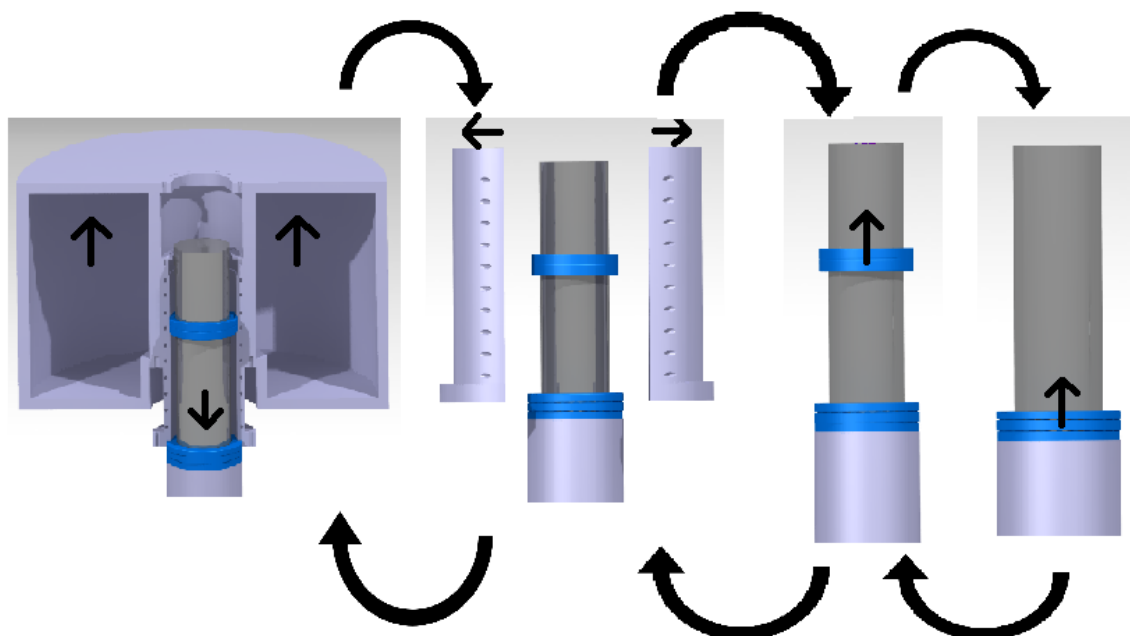
Figur 44. Axiallager för koncept 3.



Figur 45. Radiallager för koncept 3.

- **Monteringsförfarande**

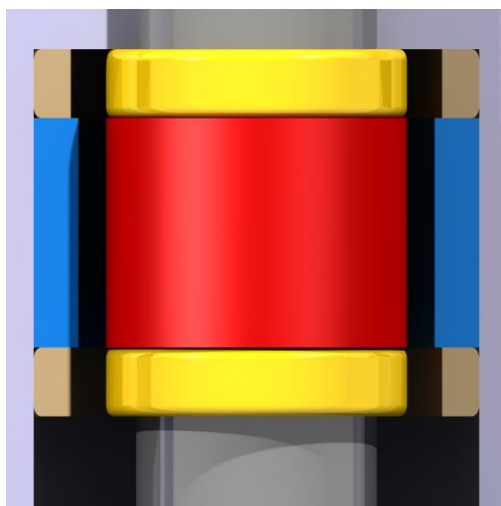
Demonterings- och monteringsgången för lageranordningen framgår i figur 46 där de olika stegen som krävs för att utföra det syns. Demonteringsstegen visas i en ordning från vänster till höger. Processen påbörjas med att lossa de skruvar som håller ihop generatorhuset med röret och sedan separera dessa genom att dra ut axeln. Sedan monteras röret ned genom att lossa de skruvar som håller ihop rörets två delar. Slutligen tas lagren ut från axeln. Monteringsgången innehåller samma steg i omvänd ordning.



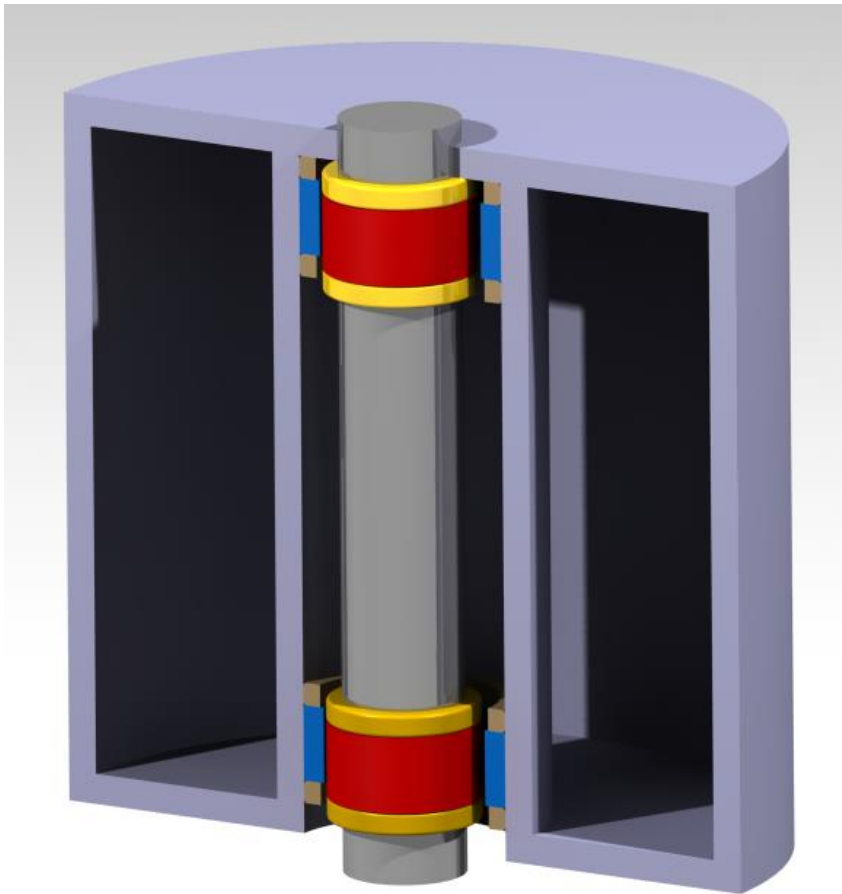
Figur 46. Demonterings/monterings stegen för koncept 3.

4.8.3. Koncept 8

I Figur 48 visas koncept 8 som en 3D modell. De olika färgerna indikerar de olika komponenterna i systemet för att lättare kunna urskilja de. Inre magneterna som är färgade i röd färg är fixerade med hjälp av de gula låsmuttrar. Yttre magneter har blå färg och fixeras med hjälp av de bruna låsmuttrarna på insidan av generatorhuset. Generatorhuset som är den stora cylindern i figur 48 visas i tvärsnitt för att visualisera alla komponenter i lageranordningen tydligare.



Figur 47. Ett magnetiskt lager där inre magneter visas i röd färg, yttre magneten i blå färg och låsmuttrarna i gul respektive brun färg.



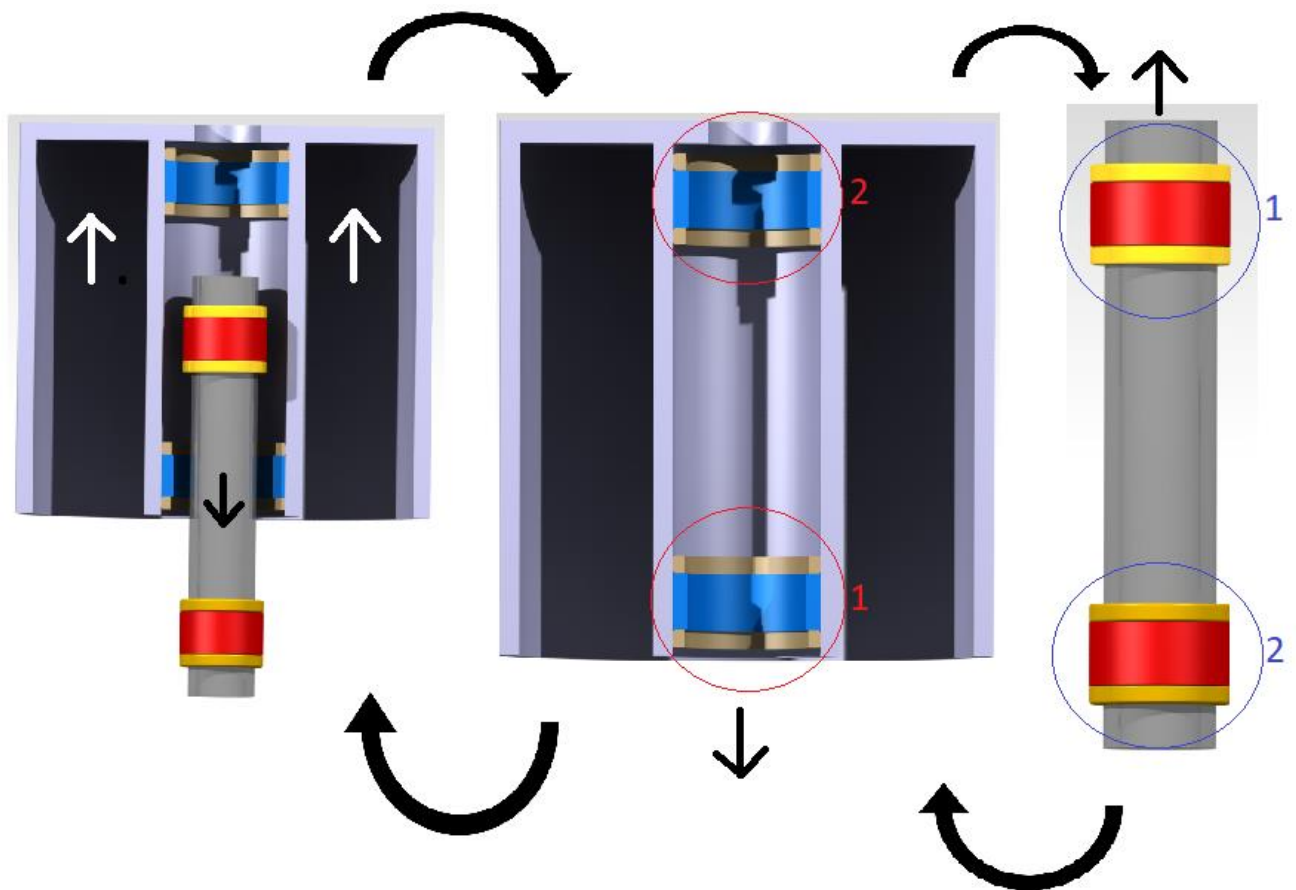
Figur 48. 3D modell för koncept 8.

- **Monteringsförfarande**

Figur 49 visar de olika stegen för hur montering och demontering av lageranordningen sker i koncept 8. Genom att kolla på figuren från vänster till höger syns hur demonteringen av lageranordningen går till och genom att kolla på figuren från höger till vänster ses monteringsstegen.

För att demontera lageranordningen, börjas det med att lyfta generatorhuset där yttre magneterna kommer att följa med och de inre magneterna sitter kvar på axeln.

Vid behov av demontering av inre och yttre magneterna ska låsmuttrarna som håller magneterna på plats tas loss och föra ner de från axeln och generatorhuset. Vid montering utförs alla steg för demontering i omvänd riktning.



Figur 49. Monterings/demonterings steg för koncept 8 där de röda ringarna visar ytermagneterna och de blåa ringarna visar inermagneterna.

5. Slutsats

Syftet med projektet har varit att ta fram flera lösningar för lageranordning till ett flytande havsbaserad vertikalt vindkraftverk som kan ta upp belastningar i axiell och radiell riktning utifrån kravet att möjliggöra montering och demontering. Gruppen anser att syftet med projektet har uppfyllts med de lösningar som har presenterats i rapporten.

För att leda projektet i rätt riktning och fullfölja det, grundades en målformulering och frågeställningar i den tidiga fasen. Projektet leddes genom att besvara de frågeställningar som fanns i början men även nya frågeställningar som dök upp. Frågeställningarna besvarades med hjälp av de koncept som genererades i form av figurer och text som skapades utifrån de metoderna som användes i projektet.

Projektets huvudmål har varit att komma på olika koncept för att förbättra lagerarrangemanget för SeaTwirls S2 utifrån de krav som fanns från början. Med hjälp av olika metoder skapades flera koncept där fokuset var mest på hur lageranordningen kan monteras och demonteras så lätt som möjligt samt att den klarar av både radiella och axiella belastningar.

Under projektets gång har gruppen genererat åtta olika principiella koncept på hur en axel på flytande vindkraftverk kan lagras. Hänsyn togs till de olika delar i vindkraftverket och speciellt till generatorhuset. Genom att utvärdera olika aspekter i varje koncept valdes det att vidareutveckla tre av dessa koncept. De olika koncepten bygger på deltagarnas egna kunskap samt de undersökningar och metoder som gjordes under projektet.

Digitala 3D modeller skapades på de tre vinnande koncepten för att underlätta förståelsen för koncepten men även se vilka brister hos dessa. Detta resulterade att vissa ändringar gjordes på två av de tre koncepten.

6. Diskussion

Gruppen anser att syftet med alla koncept som gick vidare har uppfyllts. De tre vinnande koncepten anses dock inte vara helt färdiga för direkt applicering då konkreta dimensioner för vindkraftverket saknas, samt att man inte hade en bild på hur de andra komponenterna (framför allt i generatorhuset) är fixerade. De koncept som skapades är idéer på hur problemet kan lösas och kan därför inte appliceras till produkten utan vidare utveckling.

Eftersom SeaTwirls största krav för koncepten var att montering och demontering av lageranordningen ska ske så enkelt som möjligt ute till havs anser gruppen att man har skapat flera lösningar som uppfyller det kravet bättre än referenslösningen. Men eftersom inga prototyper eller simuleringstester har utförts för att se om det verkligen stämmer i verkligheten finns det inga bevis för det.

När det kommer till montering och demontering av lagringen rekommenderar gruppen att man använder koncept 2. Koncept 2 har större fördelar jämfört med koncept 3 och 7. Dels för att lagringen sitter utanför generator huset men även för att koniska lager går att plocka isär utan någon speciell utrustning. Nackdelen med koncept 3 är att lagringen sitter innanför generatorhuset och då måste många komponenter plockas ner för att komma åt lagringen. Samma gäller även för koncept 7 vilket möjliggör enkel borttagning av axel från generatorhus men eftersom de magnetiska lagren sitter innanför generatorhuset krävs det mer arbete för montering och demontering. Men eftersom magnetiska lager har rent teoretiskt oändlig livslängd behöver de inte bytas ut.

Gruppen egna bedömning är att delbara lager förenklar montering och demontering av nästan varje koncept eftersom man inte behöver flytta på axel och generatorhus. Jämfört med de andra koncepten är koncept 5 ända alternativet som inte kräver borttagning av axel och generatorhus. Dock, i dagsläget har delbara lager inte visat sig vara tillräckligt starka och uthålliga som de andra typerna av lager. De kostar även betydligt mer, men forskning pågår ständigt och de kommer bli bättre i framtiden. De kan appliceras till flera av de koncept som gruppen har presenterat såsom, koncept 2, 4, 5, 6 och 7.

- **Fortsatt arbete**

Eftersom gruppen löste den konceptuella delen av lageranordningen för vindkraftverket återstår en del arbete att göras för att komma till slutlig produkt.

Nästa steg i arbetet är att bestämma dimensionerna för vindkraftverket. Utan dimensioner kan man inte dimensionera lagringen. Utifrån det kan man sedan bestämma dimensionerna för lagerkombinationen och genom beräkningar som visas i bilaga 1, 2 och 3 räkna ut livslängden för den.

Hållfasthetsberäkningar måste göras för att undersöka om koncepten kommer att vara stabila i verkligheten och om respektive lagerkombination som anges verkligen kan ta upp krafterna som verkar på den.

7. Referenser

[1] A Review of Research on Large Scale Modern Vertical Axis Wind Turbines at Uppsala University. Division of Electricity, Uppsala University, Box 534, Uppsala 751 21, Sweden.

<http://www.mdpi.com/1996-1073/9/7/570/htm> (acc 2017-10-20).

[2] Renewable and Sustainable Energy Reviews Volume 16, Issue 4, May 2012, Pages1926-1939.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S136403211100596X>

(2017-10-20).

[3] Lägre produktions- och livscykelkostnad med SeaTwirl vindkraft. SeaTwirl AB; Göteborg.

<https://seatwirl.com/sv/produkter/> (acc 2018-01-22).

[4] Rullningslaget SKF, Skolutgåva, 2014.

[5] SKF group brand, COOPER, product catalog.

[6] Comparison of Bearings --- For the Bearing Choosing of High-speed Spindle Design, Dept. of Mechanical Engineering, University of Utah.

http://home.utah.edu/~u0324774/pdf/Comparison_of_Bearings.pdf (2017-12-07).

[7] COMSOL Blog, Magnetic Bearings.

<https://www.comsol.com/blogs/magnetic-bearings/> acc (2017-12-07).

[8] Evelutioin business and technology SKF.

<http://evolution.skf.com/local-news/a-basic-guide-to-bearing-housing-selection/> acc (2018-01-20).

[9] Lärobok i maskinelemt, av Mart Mägi och Kjell Melkersson. Göteborg 2012.

[10] Huvudkatalog SKF SV 344ldre version 2006

<file:///C:/Users/Alaa%20al-saraf/Downloads/Katalog%20%C3%A5smuttrar.pdf> acc (2018-01-22).

- [11] What is Benchmarking? - Definition, Types, Process & Examples
<https://study.com/academy/lesson/what-is-benchmarking-definition-types-process-examples.html> acc(2017-11-22).
- [12] Bearing engineering and knowledge application menu, engineers edge, LLC 510 N. Crosslane road Monroe, Georgia 30656.
<https://www.engineersedge.com/contact.htm> acc(2018-01-19).
- [13] Större vertikal pump i plastmodell KGK, tapflo, Fliaregatan 4, Kungälv 44234.
<https://www.tapflo.se/produkter/vertikala-pumpar/langre-vertikal-centrifugalpump-kgk> acc(2018-01-18).
- [14] Torbjörn Holmqvist, applikationsingenjör på SKF cooper. Tel: 0705472162.
- [15] Catia V5-6R Möjliggör bättre konstruktioner. 78946 Vélizy-Villacoublay Cedex - Frankrike.
<https://www.3ds.com/se/produkter-och-tjaenster/catia/produkter/catia-v5/portfoelj/> acc(2017-12-20).
- [16] Lagerhus, Nomo kullager AB backa bergögata 14, 422 46 hisings backa.
<http://nomo2011.auderis.se/default.asp?page=sidmall1.asp&cont=pages/kontakt-3.html&title=Adresser> acc(2018-01-22).
- [17] Produktutveckling- effektiva metoder för konstruktion och design, av Hans Johannesson; Jan- Gunnar persson och Dennis Pettersson, Stockholm, 2004.
- [18] The value model - How to master product development and create unrivalled customer value, Per Lindstedt och Jan Burenius, Sverige 2003.
- [19] PRV, Svenska patentdatabas, SeaTwirl AB, Erik Dahlbergsgatan 11A, 411 26 GÖTEBORG, Sverige, SE.
<https://was.prv.se/spd/patent?p1=rNe3zBOXOcx7eM42P9NdVA&p2=LeN036LatbQ&hits=true&tab=1&content=seatwirl&lang=sv&hitsstart=0&start=1>
- [20] Andreas Börjesson, utvecklingsingenjör. 411 26 göteborg. Tel: 0733992710.

[21] Engineers Edge, Bearing selection.

https://www.engineersedge.com/bearing/bearing_selection.htm acc(2018-01-22).

[22] Framgång för Uppsalas vindkraftsteknik, av Lars Anders Karlberg. 2008-10-08

<https://www.nyteknik.se/energi/framgang-for-uppsalas-vindkraftsteknik-6416188>

acc(2018-04-05).

8. Bilagor

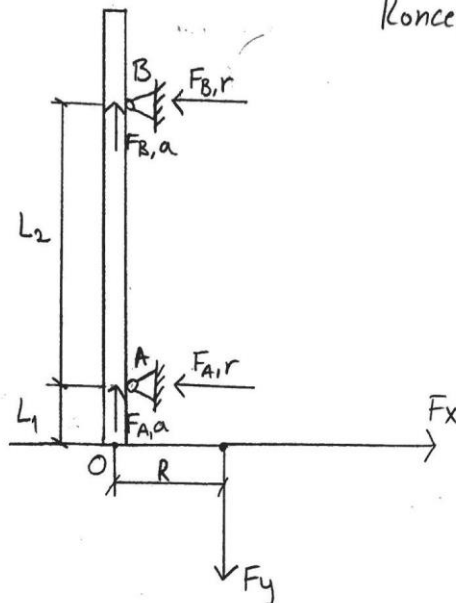
Bilaga 1

Bearing Type	Pure Radial Load	Pure Axial Load	Combined Load	Moment Load	High Speed	High Running Accuracy	High Stiffness	Quiet Running	Low Friction	Comp. for Errors of Alignment During Operation	Comp. for Errors of Alignment (Initial)	Location Bearing Installation	Non-location Bearing Installation	Axial Disp. Possible in Bearing
Ball Single - Row	C	C	C	F	A	A	C	A	A	F	F	B	C	NR
C Ball Single Double - Row	C	C	C	C	C	C	C	C	B	NR	NR	C	C	NR
Ball Self - Aligning	C	F	F	NR	B	B	F	B	B	A	B	C	C	NR
Ball Angular Contact	C	C	B	F	B	A	C	B	B	F	F	B	NR	NR
Ball Angular Contact Back - to - Back	B	C	B	C	C	B	B	C	C	NR	NR	B	C	NR
Ball Four - Point Contact	F	C	C	C	B	C	C	C	C	NR	NR	B	F	NR
Cylindrical Roller N, NU	B	NR	NR	NR	A	B	B	B	B	F	F	NR	A	A
Cylindrical Roller NJ, NUP	B	C	C	NR	A	B	B	C	B	F	F	C	C	C
Cylindrical Roller Double Row	A	NR	NR	C	A	A	A	B	B	NR	NR	NR	A	A
Full Complement Cylinder Roller	A	C	F	NR	F	C	A	F	F	F	F	C	C	C
Full Cylinder Roller Double - Row	A	C	F	C	F	C	A	F	F	NR	NR	C	C	C
Needle Roller	B	NR	NR	NR	C	C	B	C	F	NR	NR	NR	A	A
Spherical Roller	A	C	A	NR	C	C	B	C	C	A	B	B	C	NR
Taper Roller	B	B	A	NR	C	B	B	C	C	F	F	B	NR	NR
Taper Roller (Face - to - Face)	A	B	A	F	C	C	A	C	C	F	F	A	C	NR
Thrust Ball	NR	C	NR	NR	C	B	C	F	C	NR	NR	C	NR	NR
Thrust Ball with Spherical Housing Washer	NR	C	NR	NR	C	C	C	F	C	NR	-	C	NR	NR
Thrust Cylinder Roller	NR	B	NR	NR	F	B	B	F	F	NR	NR	C	NR	NR
Thrust Needle Roller	NR	B	NR	NR	F	C	B	F	F	NR	NR	C	NR	NR
Thrust Spherical Roller	NR	A	C	NR	C	C	B	F	C	A	B	B	NR	NR

Figur 50. Bedömning av olika typer av lager [21].

Bilaga 2

Kraftjämvikt och lagerbelastningar
Koncept 2



$$\sum F_x = 0 \Rightarrow F_x - F_{A,r} - F_{B,r} = 0 \quad (1) \Leftrightarrow F_{A,r} = F_x - F_{B,r}$$

$$\sum F_y = 0 \Rightarrow F_y - F_{A,a} - F_{B,a} = 0 \quad (2) \Leftrightarrow F_y = F_{A,a} + F_{B,a}$$

$$\sum M_O = 0 \Rightarrow F_y \cdot R - F_{A,r} \cdot L_1 - F_{B,r} (L_1 + L_2) = 0 \quad (3)$$

$$(1) \text{ i } (3) \Rightarrow F_{B,r} = \frac{F_x - F_y \cdot R}{\left(\frac{L_1 + L_2}{L_2}\right)}$$

$$F_{A,r} = F_x - \left(\frac{F_x - F_y \cdot R}{\left(\frac{L_1 + L_2}{L_2}\right)} \right)$$

$F_{A,a} = F_{B,a} = F_y/2$ - Eftersom lager A och lager B är kopplade.

Bilaga 3

Livslängd - Koncept 2

$$L_{nm} = a_1 a_{SKF} L_{10} = a_1 a_{SKF} \left(\frac{C}{P} \right)^p$$

$$L_{nmh} = \frac{10^6}{60 \cdot n} L_{nm}$$

Bestämning av L_{nmh} :

1. Bestämning av P :

$$\text{om } F_a / F_r \leq e \rightarrow P = F_r + Y_1 F_a$$

$$\text{om } F_a / F_r > e \rightarrow P = 0,67 F_r + Y_2 F_a$$

2. Hitta C och a_{SKF} utifrån SKF-produkttabeller.

3. Sätt in P, C, a_1, a_{SKF} och n i L_{nmh} och räkna ut livslängd för lager A. Upprepa steg 1, 2, 3 för lager B.

C = dynamisk bärighetstal [kN]

P = ekvivalent dynamisk lagerbelastning

n = varvtal [cr/min]

p = exponent, $p = 10/3$ för rullager

a_1 = faktor för tillförlitlighet

a_{SKF} = SKF livslängdsfaktor

L_{nm} = nominell livslängd [milj. varv]

L_{nmh} = nominell livslängd [driftstimmar]

F_a = axialbelastning [kN]

F_r = radialbelastning [kN]

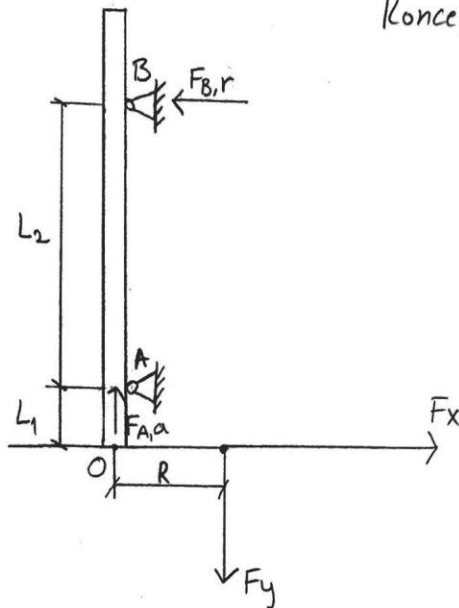
e = beräkningsfaktor (produkttabeller)

$Y_{1,2}$ = beräkningsfaktor (produkttabeller)

$a_1 = 0,25$ för 99% driftsäkerhet

Bilaga 4

Kraftjämvikt och Lagerbelastningar Koncept 3



$$\sum F_x = 0 \Rightarrow F_x - F_{B,r} = 0$$

$$(1) \Leftrightarrow F_x = F_{B,r}$$

$$\sum F_y = 0 \Rightarrow F_y - F_{A,a} = 0$$

$$(2) \Leftrightarrow F_y = F_{A,a}$$

Livslängd - Koncept 3

$$L_{nm} = a_1 a_{SKF} L_{10} = a_1 a_{SKF} \left(\frac{C}{P}\right)^p$$

$$L_{nmh} = \frac{10^6}{60 \cdot n} L_{nm}$$

C = dynamisk bärighetstal [kN]
 P = ekvivalent dynamisk lagerbelastning
 n = varvtal [Cr/min]
 p = exponent, $p = 10/3$ för rullager
 a_1 = faktor för tillförlitlighet
 a_{SKF} = SKF livslängdsfaktor
 L_{nm} = nominell livslängd [milj. varv]
 L_{nmh} = nominell livslängd [driftstimmer]

Bestämning av L_{nmh} :

1. Bestämning av P :

$P = F_r$ för radiallager

$P = F_a$ för axiallager

F_a = axialbelastning [kN]
 F_r = radialbelastning [kN]

2. Hitta C och a_{SKF} utifrån SKF-produkttabeller.

3. Sätt in P, C, a_1, a_{SKF} och n i L_{nmh} och räkna ut livslängd för lager A. Upprepa steg 2, 3 för lager B.

$a_1 = 0,25$ för 99% driftsäkerhet