



Återvinning av rotorblad i vindkraftverk för en cirkulär ekonomi

Från avfall till resurs

Oliver Roos

Lärdomsprov

Energi- och miljöteknik

2023

Lärdomsprov

Oliver Roos

Återvinning av rotorblad i vindkraftverk för en cirkulär ekonomi. Från avfall till resurs
Yrkeshögskolan Arcada: Energi- och miljöteknik 2023

Identifikationsnummer:

9192

Uppdragsgivare:

Arcada

Sammandrag:

I detta examensarbete undersöks rotorbladens aktuella återvinningsgrad och framtida utsikter inom vindkraftverk och hur en cirkulär ekonomi kan anpassas för att främja bättre och effektivare återvinning. Syftet är att undersöka rotorbladens nuvarande återvinningsgrad i vindkraftverk och identifiera de framtida behoven av återvinning genom att undersöka återvinningsmetoder för rotorblad. Trots att vindkraftverk utgör en effektiv förnybar energikälla, är återvinning av rotorbladen en hållbarhetsutmaning. Med flera vindkraftverk som snart når slutet av sin livslängd, blir återvinning av rotorblad en verklig utmaning. Denna utmaning uppstår på grund av användningen av kompositmaterial i rotorbladen som är svåra att återvinna. Vidare visar undersökningen att det finns en ökning av nya innovativa återvinningsmetoder. Det innefattar inte bara att hitta effektiva sätt att återvinna materialen, utan även att återanvända dem för att producera andra produkter. Dessa insatser är kännetecknande för en cirkulär ekonomi och är av stor betydelse för att uppnå klimatmålen. Detta arbete ger en viktig inblick i utmaningarna och möjligheterna med rotorbladsåtervinning och kan bidra till att forma framtida strategier inom vindkraftsindustrin.

Nyckelord:

Rotorblad, återvinning, vindkraftverk, cirkulär ekonomi

Degree Thesis

Oliver Roos

Recycling of Rotor Blades in Wind Turbines for a Circular Economy. From waste to resource
Arcada University of Applied Sciences: Environmental energy engineering, 2023.

Identification number:

9192

Commissioned by:

Arcada University of Applied Science

Abstract:

This thesis examines the current recycling rate and prospects of rotor blades in wind turbines, and how a circular economy can be adapted to promote better and more efficient recycling. The aim is to investigate the current recycling rate of rotor blades in wind turbines and identify the future recycling needs by exploring existing recycling methods for rotor blades. Despite wind turbines being an efficient renewable energy source, recycling of rotor blades poses a significant sustainability challenge. With several wind turbines in Europe and Finland reaching the end of their lifespan, recycling of rotor blades becomes a challenge. This challenge arises due to the predominant use of composite materials in rotor blades, which presents a recycling challenge. The study reveals an increasing trend of new innovative recycling methods. This includes not only finding effective ways to recycle the materials but also reusing them to produce other products. These efforts are characteristic of a circular economy and are significant in achieving climate goals. By exploring rotor blade recycling and promoting innovative solutions, it is possible to enhance sustainability in the wind power industry and contribute to a more circular economy. This work provides important insights into the challenges and opportunities of rotor blade recycling and can contribute to shaping future strategies within the wind power industry.

Keywords:

Rotor blade, recycling, wind turbines, circular economy

Innehållsförteckning

Sammandrag

Abstract

Förord

Förordningar

Figurer

| | |
|--|-----------|
| 1. Inledning | 1 |
| 1.2 Bakgrund | 2 |
| 2. Teoretisk referensram | 3 |
| 2.1 Begreppet cirkulär ekonomi | 3 |
| 2.2 Cirkulär ekonomi i vindkraft i Finland | 5 |
| 2.3 Vindkraft som energikälla | 7 |
| 2.1. Rotorbladets struktur | 8 |
| 2.1.3 Material i rotorblad | 15 |
| 2.5 Återvinning av rotorbladen | 19 |
| 2.6 Processer för återvinning | 22 |
| 2.6.1 Termisk återvinningsprocess | 22 |
| 2.6.2 Kemisk återvinningsprocess | 23 |
| 2.5.2 Mekanisk återvinningsprocess | 24 |
| 2.6. Alternativa användningsmetoder | 25 |
| 2.6.1 Användning av rotorblad inom byggbranschen | 25 |
| 3. Resultat | 26 |
| 4. Slutsatser | 30 |

Källor

Bilagor

FÖRORD

Jag vill rikta ett stort tack till min handledare Kim Rancken från Yrkeshögskolan Arcada för vägledningen under skrivprocessen. Jag vill även tacka experthandledaren Harri Anukka som har bidragit med värdefulla idéer till mitt arbete. Slutligen vill jag framföra ett stort tack till Cecilia Hertzberg, ESG-ansvarig på Ilmatar, för den insiktsfulla intervjun och den värdefulla informationen som hon delade med sig av. Detta examensarbete har fördjupat mina kunskaper inom området för rotorbladets återvinning och cirkulär ekonomi som helhet. Jag är tacksam för alla de lärdomar jag har tagit med mig från denna forskning.

Helsingfors 26.5. 2023

Oliver Roos

Förkortningar

| | |
|------|---|
| CE | Cirkulär ekonomi |
| LCA | Livscykelanalys |
| GF | Glasfiber |
| KF | Kolfiber |
| CFRP | Carbon fibre reinforced polymers= kolfiberförstärkta polymerer |
| VAWT | Vertical-axis wind turbine= vertikalt axlade vindkraftverk |
| HAWT | Horizontal-axis wind turbine= horisontellt axlade vindkraftverk |

Figurer

Figur 1. Beskrivning över livscykelsteg för ett vindkraftverk

Figur 2. Traditionell trebladig vindturbin

Figur 3. Vertikal och horisontell rikting av rotorblad

Figur 4. Spets hastighetsförhållandet

Figur 5. Rotorbladsstruktur

Figur 6. CE för rotorblad

Figur 7. Förlängning av livslängden för vindkraftverksblad

Figur 8. Avvecklad blad vikt

Figur 9. Metoder för återvinning

1. Inledning

Vindkraft är en snabbt växande energikälla både i Finland och runt om i Europa. Cirka 9 procent av Finlands elförbrukning kommer från vindkraft under ett år. År 2021 fanns det cirka tusen vindkraftverk i Finland med en total kapacitet på över 3 200 megawatt. Byggandet av vindkraftverk ökar också kraftigt. Under 2022 byggdes 437 nya vindkraftverk enligt uppgifter från miljöministeriet.

En övergång till en cirkulär ekonomi är av avgörande betydelse för att motverka klimatkrisen. Det erbjuder lösningar för att bromsa klimatförändringarna och skydda den biologiska mångfalden från utarmning. Att implementera en cirkulär ekonomi i olika samhällssektorer är ett centralt hållbarhetsmål för att säkerställa att produktion och konsumtion håller sig inom planetens gränser. I en cirkulär ekonomi används naturresurserna på ett mer hållbart sätt, och de hålls i omlopp längre genom säker återanvändning och återvinning.

Rotorblad är en avgörande komponent för att utvinna vindenergi och de består främst av glasfiberkompositier eller kolfiberkompositier. Med den ökande mängden vindkraftverk står vindkraftsindustrin inför en av sina största utmaningar: avveckling och återvinning av rotorblad. Inom de kommande åren kommer en betydande mängd vindkraftverk att behöva demonteras och avvecklas. Rotorbladen i vindkraftverken utgör en komplex struktur med material som är svåra att återvinna, samtidigt som de utgör en av de största delarna i vindkraftsystemen. Rotorbladen deponeras i allmänhet vid slutet av sin livslängd, vilket i hög grad påverkar miljön om materialen inte återvinns.

För att vindkraftverk ska vara ett hållbart alternativ som förnybar energikälla är det avgörande att implementera nya och effektiva lösningar för återvinning av rotorblad. Särskilt viktigt är att fokusera på tillverkningen och avvecklingen av bladen i vindkraftverken, eftersom de för närvarande består av flera komponenter som är svåra att återvinna.

1.2 Bakgrund

Vindkraft har en betydande roll för att klimatmålen ska kunna uppnås och är därmed avgörande för att stödja en hållbar energiomställning. Vindkraftssektorn har vuxit drastiskt de senaste åren och är Europas snabbast växande energiproduktionsform (Vattenfall). Det har även skett en snabb tillväxt av både land- och havsbaserade vindkraftverk som förnybar energikälla. Detta har bidragit till att Finland blivit ett attraktivt land för att bygga mer vindkraftverk med tanke på det geografiska läget. Samtidigt når flera vindkraftverk i Europa och snart Finland slutet av sin livslängd där den verkliga hållbarhetsutmaningen uppstår, nämligen återvinning av rotorbladen.

Tillverkning, drift och uttjänt hantering av vindturbiner innebär nämligen en förbrukning av en betydande mängd energi och materialresurser som leder till ett hållbarhetshot för miljön. Under slutet av livsskeden av ett rotorblad är bortskaffandet av bladmaterial ett allvarligt problem. Den största utmaningen gällande återvinning finns nämligen hos rotorbladen eftersom de består av material som är utmanade att återvinna. På grund av dessa är återvinning av rotorblad ett viktigt forskningsområde. Speciellt relevant blir det då flera vindkraftverk når slutet av sin livslängd i Finland samtidigt som det sker en ökning av byggandet av nya vindkraftverksanläggningar i Finland. Genom att återvinna rotorblad kan man minska mängden avfall som genereras från vindkraftverk och samtidigt minska beroendet av icke-förnybara material.

I detta examensarbete undersöks rotorbladens nuvarande återvinningsgrad och framtidsutsikter inom vindkraftverk och hur en cirkulär ekonomi bättre och effektivare kan anpassas. Syftet är att svara på vilken återvinningsgrad rotorblad har i vindkraftverk idag och vilka behov för återvinning kan förväntas i framtiden. Cirkulär ekonomi inom vindkraftverk är ett brett område, men för att skapa en fokuserad analys kommer avgränsningen vara på rotorbladens återvinning. Detta arbete ger en överblick av återvinning av rotorblad som inkluderar olika tekniska lösningar för återvinning och olika material som används för bladtillverkning.

Återvinning av rotorblad är en viktig forskningsfråga för vindkraftverksindustrin och hållbarhetsmålen i stort. Att undersöka tekniska lösningar för återvinning av rotorblad och vilka material som kan återvinnas är ett viktigt steg i riktning mot en cirkulär ekonomi. Det är också viktigt att undersöka möjligheterna för återvunna material att användas för att producera nya

rotorblad eller andra produkter. Genom att analysera utvecklingen inom teknologi och innovation inom området kan man också hitta nya möjligheter för att förbättra och effektivisera återvinning av rotorblad.

Olika aspekter av hållbarhet och cirkulär ekonomi inom vindkraftverk diskuteras med fokus hur återvinning av rotorblad kan bidra till en mer hållbar energiproduktion. Genom att undersöka rotorbladens livscykel och återvinning fås en bättre förståelse för hur vi kan maximera användningen av naturresurser och minska vår påverkan på miljön. Genom en litteraturoversikt om rotorbladens återvinningsmetoder och framtidsaspekter kan man kartlägga centrala trender. Med hjälp av en semistrukturerad intervju med Cecilia Hertzberg, ESG- ansvarig på Ilmatar (2023) lyfts företagets framtidsutsikter fram gällande temat. En semistrukturerad intervju handlar om att intervjuaren följer någon form av skript där intervjuaren har några centrala teman som ska lyftas upp, men att respondenten fritt får formulera svar och därmed är processen flexibel (Bryman & Nilsson 2018, 301–303).

2. Teoretisk referensram

I det följande presenteras den teoretiska referensramen som fungerar som grund för en kvalitativ analys. En förklaring av rotorbladens struktur, design och material presenteras för att bättre förstå återvinningsmöjligheter. Begreppet cirkulär ekonomi (CE) presenteras för att behandla cirkulär ekonomi i rotorblad. En genomgång av de material som används i rotorbladen presenteras för att kunna svara på examensarbetets syfte.

2.1 Begreppet cirkulär ekonomi

Cirkulär ekonomi är ett begrepp som anpassas allt mer i flera policyområden och sektorer. Europaparlamentet (2015) beskriver cirkulär ekonomi på följande sätt:

“Den cirkulära ekonomin är en modell för produktion och konsumtion, som innebär att dela, leasa, återanvända, reparera, renovera och återvinna befintliga material och produkter så länge som möjligt. På så sätt förlängs produkternas livscykel.”

Cirkulär ekonomi ger det ekonomiska systemet en modell som är cyklisk istället för linjär. För att kunna förstå CE är det väsentligt att förklara begreppet linjär ekonomi. Den linjära modellen har tidigare dominerat samhällsutvecklingen och orsakat allvarliga miljöskador. I den linjära modellen har hållbarhets paradigmet främst fokuserat på den sista fasen av produktionen som innefattar avfallshantering, återvinning och återanvändning (Hartley et al., 2020). En linjär ekonomi är ett tillvägagångssätt som utnyttjar material för ändamålet eftersom de är designade för endast en livslängd utan att återanvända materialen (Leising et al., 2018). Cirkulärt byggande handlar däremot om att ha mål för att på olika sätt minimera avfall eller att öka materialåtervinningen (Ejlertsson, Lindholm, Green & Ahlm 2018). Syftet med CE är att material ska vara återanvändbart, tillverkas, repareras och uppgraderas. I en linjär modell hamnar material på soptippar vilket är motsatsen till CE tankesättet (Korhonen, Honkasalo & Seppälä 2018). CE-modellen föreskriver nämligen att avfall inte bara ska minimeras utan också cirkuleras tillbaka till produktionsprocesser (Hartley et al. 2020).

Begreppet CE och dess praxis främst utvecklats och letts av beslutsfattare och företag och kan därför sägas vara mest populär hos dessa och de med betydande möjligheterna är identifierade för intressenterna (Ellen MacArthur Foundation 2015). Begreppet cirkulär ekonomi förespråkas dock idag mycket av större internationella organisationer som till exempel EU, av flera nationella regeringar och företagsorganisationer runt om i världen (Korhonen, Honkasalo & Seppälä 2018). Europeiska unionen har tagit initiativ för att främja övergången till en cirkulär ekonomi genom att utarbeta en omfattande handlingsplan.. Europeiska kommissionen har satt upp förslag som fokuserar på förebyggande och hantering av avfall och syftar till att främja tillväxt, konkurrenskraft och EU:s globala ledarskap på området (Europaparlamentet 2021).

CE mycket mer än avfallshantering och det krävs flera politiska instrument som riktar sig mot slutfasen av produkter för cirkulär ekonomi. Det finns även ett stort behov av styrmedel som fokuserar på uppströmsfaser såsom produktdesign och tjänsteutveckling. För att implementera ett CE tankesätt krävs det förberedda, konsekventa, sammanhängande och trovärdiga policyblandningar (Rogge & Reichardt 2016).

Övervakning är väsentligt och nyckeln till att förstå hur de olika delarna av CE utvecklas och har utvecklats över tiden. Fortsättningsvis behövs övervakning för att hjälpa till att identifiera

framgångsfaktorer i länder och regioner och för att bedöma om tillräckliga åtgärder har vidtagit. Det finns flera olika instrument och indikatorer på att mäta och övervaka cirkulär ekonomi (Berg et al. 2018, 15). I Europa får materialåtervinning och avtalsbaserad energiåtervinningen fångar endast 5 procent av det ursprungliga råvaruvärdet (Ellen MacArthur Foundation, 2015).

Reike et al. menar att man kan dela in CE-konceptets historia i tre faser (2018). Den första fasen, CE 1.0, inträffade under 1970- och 1990-talen. Avfallshanteringen blir viktig genom reglering och majoriteten av åtgärderna fokuserar på outputsidan eftersom tanken var att begränsa föroreningarna istället för att förhindra det. I fas 2.0 under 1990-talet till 2020-talet blev betoning på att förebygga avfall och Miljöproblem sågs som en ekonomisk möjlighet för företag. I denna fas ökade även vetenskapliga data om miljöproblem som global uppvärmning och konceptualiseringen av hållbar utveckling. Reike et al. (2018) menar att man under denna tidsperiod inom CE började sammankoppla in- och outputen i strategier för miljöeffektivitet. Den tredje fasen 3.0, som pågår för tillfället handlar om att maximera värdet av resurser i en tid av resursutarmning.

2.2 Cirkulär ekonomi i vindkraft i Finland

Även om vindkraft inte ger några utsläpp under dess drift, finns det en miljöpåverkan förknippad med vindkraftverk under hela anläggningens livscykel, från produktion till demontering (Guezuraga et al. 2012). Livscykelanalys är en metod som analyserar miljöpåverkan av en produkt eller tjänst över hela dess livscykel. Genom att genomföra en LCA på vindkraftverk kan tillverkare identifiera områden där de kan minska miljöpåverkan och förbättra sin produkts cirkulära karaktär. Detta har Mail & Garrett (2022) gjort då de undersökte ett vindkraftverks miljöpåverkan. Det är väsentligt att förstå att möjligheter till avfallsminskning finns genom hela produktionsprocessen och produktens livscykel. Detta sätter ett stort ansvar på producenter eftersom de är tvungna att avsätta resurser för analys, industriell omkonfigurering och omskolning av arbetare för att minimera avfall och återvinna dem (Hartley et al. 2020) Enligt Vattenfall är vindkraftens egna koldioxidutsläpp ungefär 10 g/kWh och utsläppen består främst av utsläpp som bildas i samband med byggandet, monteringen, transporten och underhållet (Vattenfall.fi).

En av de största utmaningarna med vindkraft är hanteringen av avfall. Tidigare var det vanligt att bladen från vindkraftverken hamnade på soptippen eller brändes, vilket resulterade i stora mängder avfall. Men nu arbetar vindkraftsindustrin i Finland aktivt för att öka återvinningen av material från vindkraftverk, inklusive rotorblad. Ett exempel på detta är Ilmatar, ett finländskt energibolag, som nyligen har gjort en viktig åtagande att återvinna rotorblad från alla sina vindkraftverk i framtiden. Ilmatar samarbetade med Stena Recycling för att tillhandahålla en hållbar lösning för återvinning av sina rotorblad. Detta gör Ilmatar till det första finska energibolaget som åtar sig att återvinna alla sina rotorblad med en hållbar lösning. Genom att ta detta steg understryker Ilmatar vikten av vindkraft som en hållbar energiform och visar att företaget tar ansvar för hela livscykeln för sina vindkraftverk (Ilmatar.fi). I era centrala utmaningar berör den cirkulära ekonomin, såsom ökat resursutnyttjande och konkurrens och underutvecklade lösningar när kraftverken når slutet av sitt livsskede för avvecklade komponenter och material.

Figure 4: Life cycle stages of a typical onshore wind plant including typical activities



Figur 1: Mail & Garrett (2022) beskrivning över livscykelsteg för ett vindkraftverk.

Mail & Garrett (2022) ger en beskrivning över de olika skeden av ett vindkraftverkets livscykel från tillverkning till dess slutskede. Den första fasen handlar om produktion av råmaterial och tillverkning av vindkraftskomponenter där även den största miljöpåverkan syns. Följande steg i processen består av transport av vindkraftverkskomponenter och installation. Driftsfasen av anläggningen handlar enligt skribenterna om den allmänna driften av vindkraftverken när den genererar elektricitet. Denna är en viktig del av att se till att vindkraftens livslängd ökar som innefattar renovering och byte av slitna delar. Det sista skede som är mycket viktigt i processen

är när vindkraftverket når slutet på sin livslängd efter cirka 25 år i drift. I detta skede demonteras vindkraftverkets komponenter och platsen saneras. Som nämnt är det inte många vindkraftverk som nått detta skede men allt fler vindkraftverk börjar nu nå sitt slutskede och därför är det väsentligt att detta sköts noggrant för att hindra en skadlig miljöpåverkan.

En grundprincip för den cirkulära ekonomin är enligt Ellen MacArthur Foundation att cirkulera produkter och material. Det innebär att hålla material i bruk, antingen som en produkt eller, när det inte längre kan användas, som komponenter eller material. På så sätt minimeras avfall eller produceras i bästa fall inget avfall alls, och det egna värdet av produkter och material bevaras. I detta kretslopp, som kallas det tekniska kretsloppet, återanvänds, repareras, återanvänds och återvinns produkter (Ellen MacArthur Foundation 2015).

2.3 Vindkraft som energikälla

Det sker flera stora pågående projekt i Finland med syfte att bygga vindkraftverk såväl i havet som på land för att utnyttja dess fulla kapacitet. För att Finland ska kunna nå sina uppsatta klimatmål krävs det enligt studien Enabling cost-efficient electrification in Finland utförd av Sitra en övergång från fossila bränslen till rent producerad elektricitet (Roques et al. 2021).

Vindkraftverk är en effektiv och hållbar källa för att generera elektrisk energi. Deras funktion baseras på utnyttjandet av vindens kraft för att driva rotorbladen som är fästa vid en generator. När vinden blåser sätts rotorbladen i rörelse, vilket genererar mekanisk energi. Denna mekaniska energi omvandlas sedan till elektrisk energi genom generatoren. För att producera elektricitet krävs en viss vindhastighet. Vanligtvis behöver vinden vara minst 4 m/s för att starta vindkraftverket och generera energi. Vid vindhastigheter över 25 m/s stängs vindkraftverket automatiskt av av säkerhetsskäl, eftersom extremt höga vindhastigheter kan vara skadliga för både vindkraftverket och omgivningen.

Den maximala effekten hos ett vindkraftverk uppnås vid vindhastigheter mellan 12 och 14 m/s. Vid dessa hastigheter är rotorbladen mest effektiva på att fånga upp vindens energi och överföra den till generatoren. Energiutvinningen fortsätter även om vindhastigheten överstiger 14 m/s, men när vindhastigheten når 25 m/s stängs vindkraftverket av av säkerhetsskäl (Vattenfall).

Det är viktigt att notera att vindkraftverk inte kan utnyttja hela vindens energi. Effektiviteten hos ett vindkraftverk varierar vanligtvis mellan 30% och 50%. Det betyder att vindkraftverket kan omvandla upp till hälften av den tillgängliga vindenergin till elektrisk energi. Trots detta är vindkraft fortfarande en värdefull och ren energikälla som kan bidra till att minska beroendet av fossila bränslen och minska koldioxidutsläppen.

Eftersom vindstyrkan ökar vid större höjder, brukar man bygga turbinbladen på höjder omkring 100 meter (Vattenfall). Rotorn och generatoren placeras längst upp i vindkraftverkets torn med maskinhuset. I maskinhuset finns huvudkomponenter som generator, huvudaxeln och girmotorn vars uppgift är att vända maskinhuset i rätt vindriktning (Vindkraften). Ovanpå maskinhuset finns en vindmätare som styr maskinhuset och placerar vindkraftverket i riktning enligt vinden. Girmotorn får signaler från styrsystemet som är kopplat till vindmätaren. Huvudaxeln är kopplad till en växellåda som reglerar huvudaxelns varvtal enligt generatoren. En annan väsentlig del av ett vindkraftverk är ett bromssystem. Bromssystemet består av en mekanisk och aerodynamisk broms. Mekaniska bromsens uppgift är att bromsa rotorn ifall aerodynamiska bromssystemet har slutat fungera. Dessa två bromsar skall vara oberoende av varandra. De moderna vindkraftverken använder sig av datoriserade styrsystem, vindkraftverkets produktion, driftinformation och driftavbrott kan kontrolleras trådlöst från datorprogram. Detta utgör också möjligheten att styra vindkraftverk via en dator.

Fram till 2030 kan den installerade vindkraftskapaciteten i EU uppgå till 327 GW och förväntas ha den största relativa tillväxten jämfört med 2010 eftersom vindkraftsproduktion skulle mer än tredubblas (International Renewable Energy Agency 2018, 22–42). Vindkraftverk är en hållbar form av förnybar energi eftersom den producerar mer energi än dess energibehov under hela livscykeln. Detta berör allt från tillverkning till hantering av material. En undersökning visade att under en livscykel för V136-4,2 MW vindkraftverk kommer att ge 40 gånger mer energi tillbaka än vad den förbrukade under växtens livscykel (Mail & Garret 2022, 14).

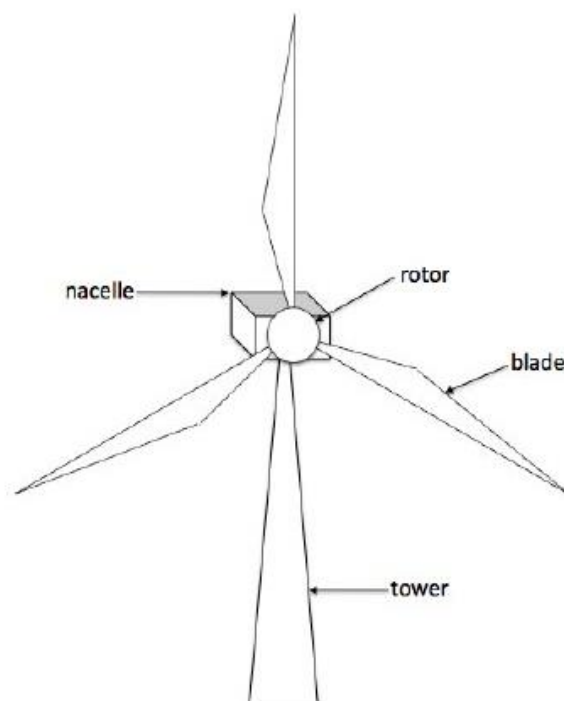
2.1. Rotorbladets struktur

Under 1900-talet gjordes betydande framsteg inom områden som vindkraft och aerodynamik, vilket ledde till en djupare förståelse för polymerer och en ökad fokus på designen av rotorblad.

Rotorbladen i vindkraftverk spelar en central roll genom att omvandla vindens rörelseenergi till mekanisk energi som sedan kan användas för att generera elektricitet. Utvecklingen av polymermaterial och kunskapen om deras egenskaper har bidragit till mer effektiva och optimerade rotorbladsdesigner (Schubel & Crossley, 2012).

Rotorbladen i horisontella vindkraftverk är av särskild betydelse då de möjliggör omvandlingen av vindens rörelseenergi till mekanisk energi som i sin tur används för att generera elektricitet. När vinden blåser skapas ett tryck mot rotorbladen som tvingar luften att röra sig åt ena hållet samtidigt som rotorbladen rör sig åt motsatt håll. Denna dynamik genererar en kraft som driver rotationen av rotorbladen (Vindkraften).

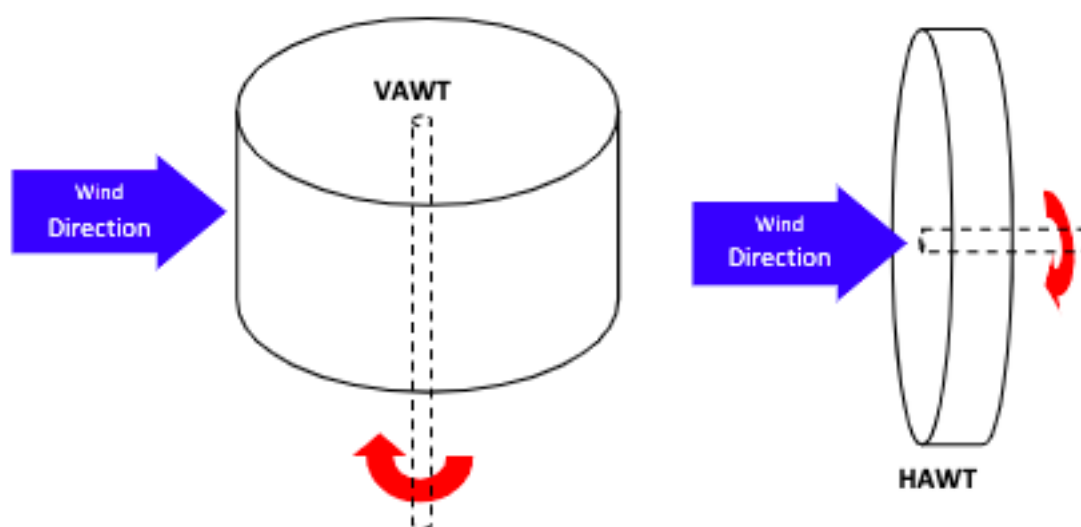
Den trebladiga rotorn, som är den vanligaste i Finland, är balanserad med rotationssymmetri vilket innebär att massans tröghetskrafter är jämnt fördelade över alla axlar. Den trebladiga designen ger även en visuellt tilltalande estetik för vindkraftverket. Om vindkraftverket har färre än tre blad och försöker anpassa sig till vindriktningen, kan det uppstå vibrationer som belastar maskineriet. Dessa vibrationer beror på skillnaderna i masströghetskrafter mellan den horisontella och vertikala axeln. I Finland är de längsta rotorbladen cirka 75 meter (år 2019) (Tuulivoimalaitos).



Figur 2: Traditionell trebladig vindturbin.

Vindkraftverk delas oftast in i två kategorier utgående från dess riktning: horisontella axlar (HAWT) och vertikala axlar (VAWT). Av effektivitetsskäl, kontroll, buller och estetik domineras den moderna vindturbinmarknaden av den horisontellt monterade trebladiga designen där rotern och generatoren är placerade längst upp i vindkraftstornet (Schubel & Crossley 2012). Även vindkraftverken i industriell skala som byggs i Finland är horisontella. Det svepande området för ett vindkraftverk med horisontell axel är det område av cirkeln som ritas av spetsarna på bladen. Rotorn på ett kraftverk med horisontell axel måste vridas mot vinden för att kraftverket ska fungera. Rotorbladen är konstruerade för att kunna rotera och anpassa sig efter vindriktningen (Vindkraften.se).

Horisontella axelvindturbiner (HAWT) kan uppnå förbättrad kontroll över rotern genom att styra maskinhuset. En viktig faktor i detta är designen av rotorbladen, där hastigheten på bladspetsen spelar en central roll. Genom att minska kordabredden, vilket är vingprofilens tvärsnittslängd som varierar med radien (Bergqvist 2014), kan man uppnå en smalare design som möjliggör högre hastigheter. Det är dock viktigt att beakta mekanisk stress, vridmoment och buller när man väljer en lämplig hastighet för bladspetsen (Schubel & Crossley 2012).



Figur 3: Vertikal och horisontell riktning av rotorblad (Schubel & Crossley 2012).

Spets hastighetsförhållandet är en central designparameter för vindkraftverk, och det används som grund för att beräkna alla andra optimala dimensioner för rotorn. Det definieras som förhållandet mellan hastigheten på rotorbladen och den relativa vindhastigheten (Schubel & Crossley 2012). Inom vindkraftindustrin har man funnit att det ungefärliga optimala spets hastighetsförhållandet för ett trebladigt vindkraftverk är 7 (Yurdusev et al. 2006). Detta innebär att rotorbladen är utformade för att nå en hastighet som är sju gånger högre än den relativa vindhastigheten. Genom att optimera spets hastighetsförhållandet kan man maximera effektiviteten och energiutvinningen hos vindkraftverket.

$$\lambda = \frac{\Omega r}{V_w}$$

$\lambda =$ Tip speed ratio
 $\Omega =$ Rotational velocity (rad/s)
 $r =$ Radius
 $V_w =$ Windspeed

Figur 4: Spets hastighetsförhållandet λ (Schubel & Crossley 2012).

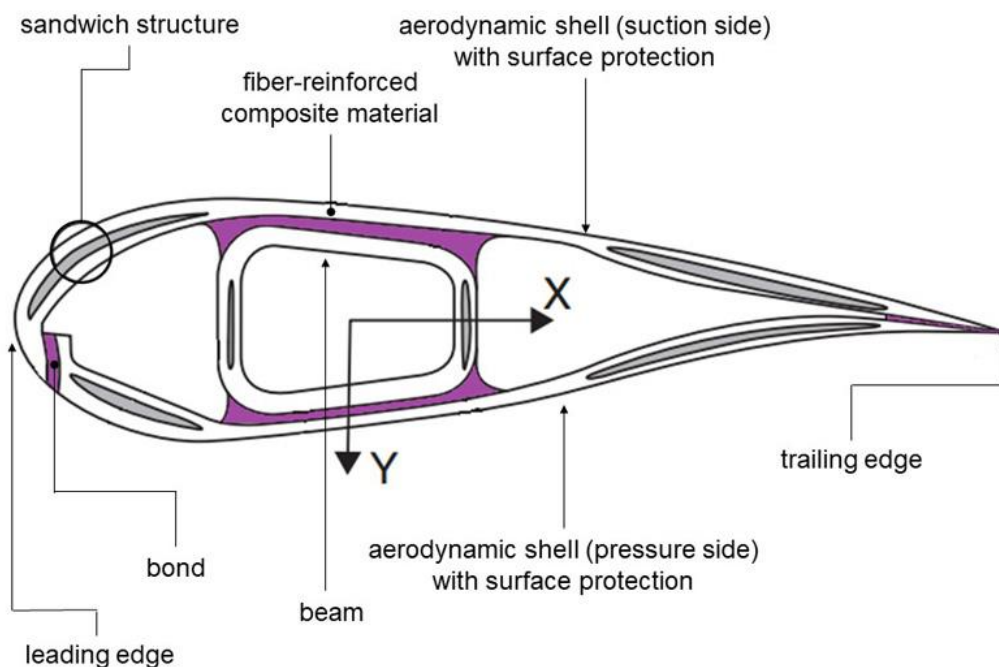
2.1.2 Design och tekniska lösningar av rotorblad

Rotorbladens struktur och material spelar en viktig roll för vindkraftverkets prestation och livslängd. Rotorbladen består av flera lager laminat, gjorda av glas- eller kolfibrer, och hårdplast polymermatris, sammanfogade av självhäftande skikt, och delvis fyllda med skum (Mishnaevsky 2023).

Bladets konstruktion är utformad för att hantera de dynamiska krafterna som genereras av vindens påverkan. Rotorblad som är konstruerade för att vara hållbara och robusta kan bidra till en längre livslängd för vindkraftverket och därmed öka dess hållbarhet och lönsamhet. I takt med den drastiskt växande förnybara energisektorn kommer betydande mängder energi och råvaror att krävas för att tillverka och underhålla dessa (Gallagher 2019). De viktigaste

trenderna i utvecklingen av nya vindkraftverk är 1) utveckling av större vindkraftverk och 2) placering till havs i stora vindkraftsparker på avstånd från land (Sørensen 2009). Det krävs därför att rotorbladen anpassas till denna utveckling.

På grund av sin långsträckt form kan ett vindturbinblad beskrivas som en huvudsakligen lastbärande balk täckt av ett aerodynamiskt format skal (Sørensen 2009). Vid tillverkningen av vindturbinbladets aerodynamiska skal används vanligtvis sandwichstrukturer där kompositen omsluter en lätt kärna, såsom balsaträ eller polymer skum. Skalen är också belagda med en skyddad yta med gel och täckfärg. De delar som bär lasten är tillverkade av kompositmaterial med hög motståndskraft mot utmattning, till exempel glasfiber/polyester eller kolfiber/epoxi. Vidare hävdar Sørensen (2009) att en vanlig tillverkningsmetod innebär att de två aeroskalarna tillverkas i externa formar. Därefter placeras en lastbärande balk eller mellanväggar mellan aeroskalen och delarna fogas samman.



Figur 5: Rotorbladsstruktur (Systemtechnik Weser-Ems GmbH).

En viktig aspekt vid tillverkning av vindkraftverk är att säkerställa att turbinerna kan återvinnas eller återanvändas när de närmar sig slutet av sin livslängd. För att uppnå detta är det nödvändigt att integrera konceptet för återvinning och återanvändning redan i de tidiga stadierna av materialvalsprocessen och produktdesignen. Det innebär att man från början planerar för möjligheter till återvinning och återanvändning av materialen. Genom att göra detta kan man effektivisera avvecklingsprocessen och minimera mängden avfall samtidigt som man maximerar resursutnyttjandet.

Forskning tyder på att det finns en mycket större potential att minska miljöpåverkan genom att förbättra komponenternas hållbarhet. För tillfället är den genomsnittliga återvinningsbarheten för ett modernt vindkraftverks massa (exklusive fundamenten) cirka 80 % (Guezuraga et al. 2012). Mishnaevsky (2021) menar till exempel att ett väsentligt sätt att göra vindkraftverken mer hållbara är genom att förlänga bladens hållbarhet, eftersom det är utmanande att återvinna. Det är därför alltså viktigt att fokusera på ökad återvinning, substitution och noggrann design för att effektivare möta den växande efterfrågan (Vidal, Goffé & Arndt 2013).

Tillverknings- och installationsstegen står för över 90 % av de totala koldioxidutsläppen från en vindkraftspark på land och 70 % av koldioxidutsläppen för en vindkraftspark till havs (Global Wind Energy Council 2021). Guezuraga et al. (2012) menar att enligt livscykelbedömningen av två olika 2 MW-klassvindkraftverk kommer det största energibehov bidraget huvudsakligen från tillverkningsfasen, som representerar 84,4% av den totala livscykeln och tornkonstruktionen står för 55% av den totala turbinproduktionen.

För att få vindkraft mer hållbara och för att de ska kunna prestera optimalt och överleva det tuffa klimatet som de utsätts för, är det avgörande att varje komponent är väl utformad och korrekt installerad. Återvinning av material och produkter adresseras inte bara vid slutet av användningen, utan är aktiverad på designnivån. Produkterna ska vara designade så att de är hållbara, enkla att sortera i slutet av livet, separera eller återanvända produkter och material. Endast på detta sätt kan vindkraftskonstruktioner uppnå sin förväntade livslängd och fungera på ett pålitligt sätt (Ellen MacArthur Foundation 2015; Söker 2012, 29). Att säkerställa en noggrann design och livscykelhantering genom att tillämpa resursbevarande är därför avgörande för övergång hållbara vindenergisystem (Jensen, Purnell & Velenturf 2020).

Bladen är den viktigaste kompositbaserade delen av en vindturbin, och utgör den högsta kostnadskomponenten för turbinen (Mishnaevsky et al. 2017). Bladdesignen har utvecklats under de senaste åren för att optimera materialegenskaper, prestation och ekonomiska fördelar (Cherrington et al. 2017). Det har idag blivit möjligt att tillverka mer komplexa rotorbladformer tack vare införandet av nya formningstekniker och material (Schubel & Crossley 2012).

Utvecklingen av vindkraftverk har på senare tid inneburit en ökning i både storlek och placeringar till havs. Denna trend har också lett till förändringar i designen av vindkraften och materialen som används. Vindkraftverk byggs med allt större rotordiametrar. Längden på vissa vindkraftverk är över 80 meter och bladlängder på över 100 meter planeras i takt med till exempel expansionen av havsbaserad vindkraftverk. På grund av den snabba utvecklingen av tekniken har bladlängden vuxit från 18 m i en 600 kW turbin år 1990 till cirka 85 m i en 8000 kW turbin år 2015 (Beauson et al. 2016). RPM (varvtal per minut) för en rotor i ett vindkraftverk är beroende av vindhastigheten och rotorbladens längd. Vid lägre vindhastigheter krävs en större rotorbladslängd för att uppnå samma varvtal som vid högre vindhastigheter (Boverket 2009). Därför kan det sägas att en större rotordiameter leder till lägre RPM vid samma vindhastighet.

En ökning i storlek leder även till en ökning i vikt på rotorbladen, vilket gör att gravitationslaster blir alltmer avgörande i designprocessen. Rotorbladen blir längre och böjer sig mer, vilket gör att strukturell styvhet är av ökande betydelse för att undvika att bladet kolliderar med tornet (Mishnaevsky et al. 2017). Eftersom fler blad produceras finns det ett behov att designa blad för att förhindra slöseri vid uttjänt livslängd och/eller underlätta framtida återvinning (Beauson et al. 2022)

Mishnaevsky et al. (2017) hävdar att om man vill säkerställa att rotorblad är tillverkade av lämpliga material och har tillräcklig bärförmåga är det viktigt att genomföra tester i flera skalor under designprocessen. Dessa tester kan mäta relevanta materialegenskaper och kontrollera noggrannheten hos de beräkningsmodeller som används för att uppskatta lastens bärförmåga.

2.1.3 Material i rotorblad

De mekaniska egenskaperna hos de olika kompositmaterialen i blad är exakt utformade för att uppfylla kraven på ett blad (Beasoun et al. 2016). Rotorbladens konstruktion involverar flera lager av material som är sammansatta för att ge den önskade styrkan och styvheten. De vanligaste materialen för vindturbinblad är polymerer (polyester (PE) harts, epoxi (EP) harts och polyvinylklorid (PVC) och fibrer (glasfiber (GF) och kolfiber (KF)). Fiberförstärkta plastkompositer som glasfiber (GFRP) och kolfiberförstärkta polymerer (CFRP= carbon fibre reinforced polymers) används ofta i rotorblad för att ge förbättrad styrka och styvhet i förhållande till vikt, lätthet att producera nödvändiga former och billiga tillverknings- och materialkostnader (Jani et al. 2022). Lättare blad kräver mindre robusta turbin- och tornkomponenter, så kaskadkostnadsbesparingarna motiverar extrakostnaden för kol. De kan användas för att producera smala rotorbladsstrukturer som kan motstå extrema påfrestningar. Utvecklingsefterfrågan på lätta och storskaliga vindturbinblad visar att kolfiberkompositer i vindturbinblad är en lösning. Kolfiber har visat sig vara en möjliggörande teknik för till exempel vindturbintillverkaren Vestas Wind Systems A/S. Bytet till kolfiber gjorde att företaget kunde lägga till 5m/16 fot i bladlängd utan någon ytterligare viktökning (Wood 2012). De högre ekonomiska kostnaderna för kolfiberkompositer betyder att flera vindkraftsföretag fortfarande använder traditionella glasfiberkompositer för att tillverka vindkraftverksblad.

Enligt Mishnaevsky et al. (2017) är kolfiber ett lovande alternativ istället för glasfibrerna. Dess egenskap är att de har en högre styvhet och lägre densitet än glasfibrerna. Detta leder till tunnare, styvare och lättare blad. En negativ aspekt med detta är att de har högre kostnader, lägre tryckhållfasthet och hög känslighet för lokala defekter än glasfibrer. Överlag är kompositmaterial mycket toleranta mot skador (Mishnaevsky et al. 2017), vilket är väsentligt då bladen kan utsättas för utmanande förhållanden som blixtnedslag, fysiska stötar och övriga skadliga förhållanden.

Även om vindkraft utgör en hållbar energikälla, kräver tillverkningen av rotorblad en betydande mängd material och komponenter. Enligt Vidal et al. (2013) kan vindkraftsanläggningar, för en likvärdig installerad kapacitet, kräva upp till 15 gånger mer betong, 90 gånger mer aluminium och 50 gånger mer järn, koppar och glas än vad som behövs för fossila bränslen eller kärnenergi. När rotorbladen når sin designlivslängd, måste de också hanteras och deponeras.

I vindturbiner används mycket material och representerar en relevant framväxande avfallsström (Mendoza et al. 2022). I en undersökning över livscykelanalys av elproduktion från ett V136-4,2 MW vindkraftverk undersöktes den totala potentiella miljöpåverkan från en 100 MW landbaserad vindkraftsanläggning av V136-4,2 MW turbiner visar resultaten att råvaru- och komponentproduktion dominerar miljöpåverkan från kraftverket. Produktionen av tornet, gondolen, bladen och fundamenten bidrar mest till alla studerade miljöpåverkansindikatorer. (Mail & Garret 2022, 14).,

2.4 Livscykel för rotorblad

Det har gjorts flera fallstudier där vindkraftverkens koldioxidutsläpp analyserats genom att utföra en livscykelanalys av ett vindkraftverk (se till exempel. Guezuraga et al. 2012; Mail & Garrett 2022; Martínez et al. 2008). LCA hjälper till att förstå miljöförpliktelser eller effekter som ackumuleras över hela livscykeln, från dess början till slut. Detta kan hjälpa till exempel andra forskare, vindkraftverkstillverkare och politiker att förstå vindkraftverks miljöpåverkan och hur man kan förbättra dessa till att bli mer hållbara former av energikällor.

Rotorbladens livscykel innehåller olika faser från tillverkningen till avvecklingen och återvinning. Detta kan man se i figur 6. De olika stegen inkluderar, råmaterialproduktionen där naturresurser bearbetas till användbara material. I rotorbladens fall är det frågan om produktion av plast, glasfiber och eventuellt kolfiber. Den följande fasen är tillverkningsfasen där rotorbladen formas genom att lager av glasfiber och plast appliceras på en form och tillverkas enligt önskad design. Tillverkningsprocessen är energiintensiv som skapar avfall och utsläpp av kemikalier. Dessutom krävs en kvalitetskontroll för att säkerställa att rotorbladen uppfyller krav och standarder. Den tredje fasen är transport där rotorbladen transporteras till vindkraftverken. Denna fas innebär utsläpp av växthusgaser. Driftsfasen är den fjärde fasen där rotorbladen omvandlar vindens energi till elektricitet. Detta är den mest miljövänliga fasen där regelbunden inspektion krävs för att se till att rotorbladen fungerar och att energiproduktionen är effektiv. Detta följs av nästa fas som är underhåll och reparation. Under denna fas hanteras korrosion, slitage och andra potentiella skador till rotorbladen. Den slutliga fasen är avveckling där rotorbladen tas ur drift och demonteras. Efter demonteringen finns det flera olika alternativ

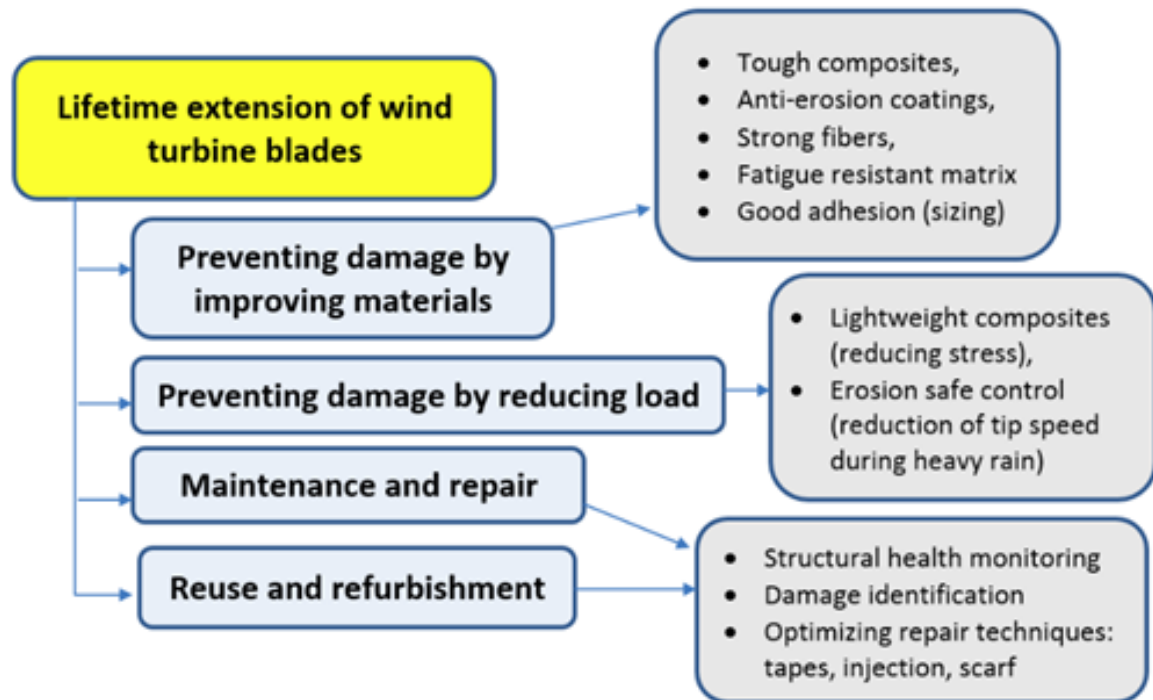
för återvinning eller annan hantering av avfallet (J. Nagle et al 2020). Genom att återvinna materialen i bladen kan processen fortsätta med att tillverka nya vindkraftverk eller rotorblad och på så sätt sluta cirkeln.

Mishnaevsky (2021) hävdar att de flesta LCA av vindkraftverk inte alls inkluderar hantering av blad vid slutet av livslängden, trots att dessa utgör den största hållbarhetsutmaningen.

Circular economy theory of wind turbine blades



Figur 6: CE för rotorblad (Global Wind Energy Council 2021).



Figur 7: Förlängning av livslängden för vindkraftverksblad (Mishnaevsky 2021).

Mishnaevsky (2021) ger övergripande tillvägagångssätt för att förlänga livslängden av bladen. Rotorblad går under dess drift genom visuell inspektion för att utvärdera om den måste underhållas eller repareras. Inspektionen kan bedöma bladens tillstånd men avslöjar sällan förekomsten av potentiella skador under ytan (Mishnaevsky et al. 2017). Jani et al. (2022) hävdar att den största mängden bladmaterial går till spillo under tillverkningsprocessen, vilket är cirka 10 % till 18 % av den totala bladvikten.

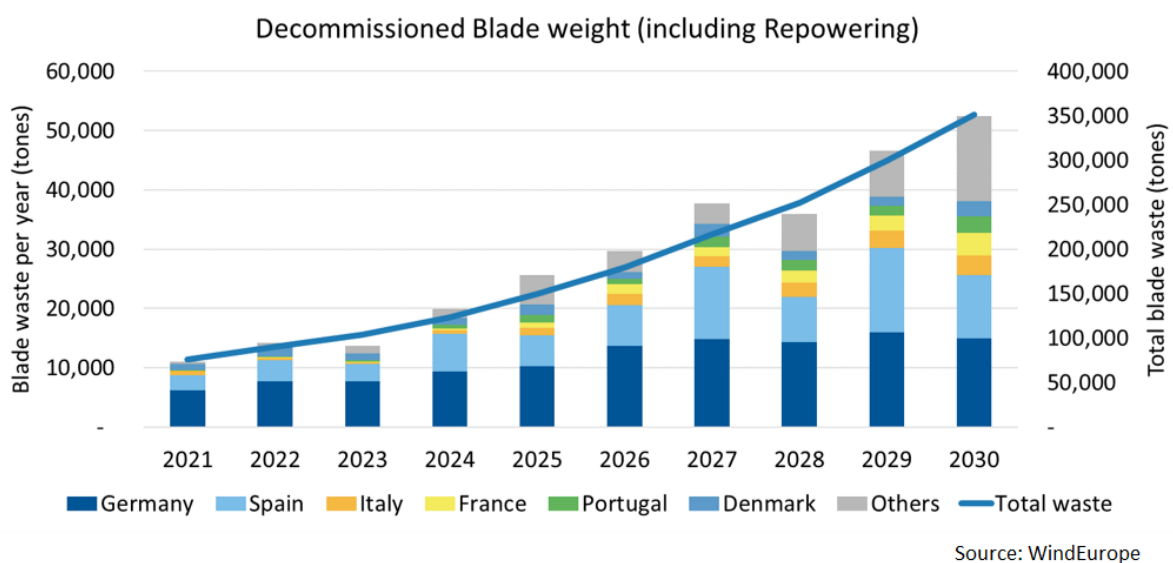
När en vindturbin når slutet av sin livslängd ska valet av slutskedet göras: vindkraftverket kan vara i fortsatt drift, återuppbyggnad eller avveckling. Detta beslut är dock platsspecifikt och beror på tekniska, ekonomiska och regulatoriska överväganden (Ziegler et al. 2018). Det som påverkas slutet av livslängden är förekomsten av en andrahandsmarknad av rotorblad (Beausson et al. 2022).

demontering är ett väsentligt och kritiskt steg i hanteringen av uttjänt livslängd eftersom det möjliggör säker borttagning av farliga material och identifiering av återanvändbara och återvinningsbara komponenter. Avveckling syftar här till de processer som är involverade i att ta en anläggning ur drift vid slutet av dess livslängd. Detta innefattar dess dekonstruktion,

demontering, avlägsnande av komponenter för återanvändning, återtillverkning, återvinning, lagring och/eller bortskaffande. Avveckling berör flera olika aspekter som måste tas i beaktande. Dessa är bland annat tekniska, juridiska, sociala och miljömässiga aspekter. (Invernizzi et al. 2020). Att undersöka slutskedet av vindkraftverk och hur man hanterar demonteringen av vindkraftverkets komponenter. Tidigare LCA utredning för Vestas vindurbiner visar att den mest betydande miljöpåverkan uppstår under tillverkningen och demonteringen av turbinerna (Mail & Garret 2022).

Eftersom vindkraftverk innehåller farliga material som smörjmedel, lösningsmedel och hydraulvätskor som måste avlägsnas och kasseras på rätt sätt för att förhindra förorening av mark- och vattenresurser. Demonteringsprocessen bör utföras i enlighet med lokala föreskrifter för att säkerställa att farliga material hanteras säkert och ansvarsfullt.

2.5 Återvinning av rotorblad



Figur 8: Avvecklad bladvikt (Wind Europe).

Larsen (2009) hävdar att det för tillfället finns tre möjliga vägar för demonterade vindkraftverk. Dessa beräknas vara soptipp, förbränning eller återvinning. Återvinning av material innebär att man bearbetar material med metoder som är genomförbara eller miljövänliga, utan att försämra dess mekaniska eller fysiska prestation, så att det kan återanvändas istället för att slängas eller förstöras (Rani et al 2021). Detta kan beröra antingen materialåtervinning, eller

produktåtervinning i form av re-powering – där gamla turbiner byts ut av nyare som ökar effektiviteten (Larsen 2009). Enligt Cherrington et al. (2012) utgör avvecklingen av turbinbladen, som är tillverkade av kompositmaterial, en betydande utmaning för avfallshantering i framtiden. Dessutom påpekar författarna att det för närvarande finns bristande lagstiftning som reglerar hanteringen av utjämt avfall för vindenergiindustrin i Europa.

I Arbets- och näringsministeriets publikationer 2022:54 “Klimatneutralt Finland 2035-Den nationella klimat- och energistrategin” framförs framtida mål om förnybar energi. I dagens läge täcker förnybara energikällor kring 40 procent av Finlands energianvändning, målet till 2030 är att överskrida 50 procent. Detta har lett till satsningar inom vindkraft och installationer av flera vindkraftparker omkring Finland. Trots vindenergens klimatneutralitet är hanteringen av demonterade rotorblad ett aktuellt problem. De största utmaningarna med återvinning av hårdplaster är att de inte smälter vid upphettning. Detta beror på hårdplastens molekylära struktur, molekylerna är tvärbundna med varandra och förblir stela (Plastics New Zealand 2023). Rivning och fräsning är också problematiskt eftersom det förstör glasfibern. Tillverkarna brukar sällan publicera komponenter för rotorbladen vilket också komplicerar återvinningsprocessen (Mattson 2021). Det första vindkraftverket som anslöts till ett elnät i Finland installerades 1986 i Imatra. Detta satte igång industrialiseringen av vindkraft i Finland. Förbrukningen av vindkraftverk ökade betydligt under 1990-talet och början av 2000-talet.

Vindkraftverk har en genomsnittlig livslängd på 20–25 år (Larsen 2009), vilket innebär att många av dem runt om i världen nu närmar sig slutet av sin livscykel och behöver avvecklas. Bara i Europa förväntas nästan 12 000 vindkraftverk avvecklas fram till 2024 enligt Global Wind Energy Council (2021). Detta fenomen tydliggörs i figur 4. Avvecklingen av rotorblad är speciellt utmanande eftersom de är tillverkade av kompositmaterial. Forskning pågår ständigt för att hitta hållbara lösningar för hantering av nedmonterade rotorblad. Vindindustrin samarbetar med kemi- och kompositindustrin för att utveckla teknik för att återvinna rotorbladsavfallen, men det kommer att ta till 2030 innan de är fullt utplacerbara i skala (Wind Europe 2021). Tidigare har hanteringen av rotorblad som nått sin livslängd antingen involverat förbränning eller deponering, vilket inte uppfyller hållbarhetskriterier eller cirkularitetsprinciper eftersom allt material går till spillo.

Rotorbladen i de flesta vindkraftverk består av en blandning av hårdplast och glasfiber. Vindkraftsindustrin var en pionjär i användningen av kompositmaterial. Återvinning av dessa material är dock en utmaning på grund av deras komplexa sammansättning. Eftersom kompositmaterialet är svårt att bränna, krävs det speciella återvinningsmetoder. Dessutom måste rotorbladen bytas ut efter 20–30 år, vilket resulterar i betydande avfall. Även om kompositmaterialet inte klassas som farligt avfall och inte genererar utsläpp vid förbränning, är det fortfarande en ineffektiv användning av resurser eftersom material går till spillo.

Återvinning av kompositer som rotorbladen består av är i sig svårt på grund av 1) deras komplexa materialmix eftersom de olika materialen är svåra att separera. (fibrer, matris och fyllmedel), (2) den tvärbundna naturen hos hårdplaster (som inte kan formas om) och (3) kombinationen med andra material (Pimenta & Pinho 2011). Den komplexa strukturen gör det svårt att återvinna blad till någon annan form än till andra blad. Avveckling av vindkraftverk kan beslutas i takt med att turbinerna når slutet av sin livslängd men kan även avvecklas tidigare om det är relevant att ersätta turbinerna mot nyare modeller eller om turbinerna skadats.

Mängden material som ska återvinnas från rotorblad kan variera drastiskt utifrån kvalitet och design och det finns även stora skillnader i kvantitet. Att återvinna stora vindfarmer är mycket mer utmanande än att återvinna några enstaka vindkraftverk (Mishnaevsky et al. 2017). Det existerar idag flera olika återvinningstekniker och alla dessa tekniker har vissa fördelar och begränsningar. En ekonomiskt genomförbar lösning för att hantera avfall genom återvinning är endast möjlig om kostnaderna för återvinningsprocessen är lägre än kostnaderna för att använda återvunna råvaror (Psomopoulos et al. 2019). Det innebär att återvinningen måste vara kostnadseffektiv för att vara hållbar och motivera investeringar och engagemang i återvinningsprocesser. Att uppnå kostnadseffektivitet kan vara utmanande och kräver optimering av processer, teknologier och infrastruktur för att minska kostnaderna för återvinning och göra det till en attraktiv lösning för avfallshantering.

2.6 Processer för återvinning

I det följande presenteras processer för återvinning av rotorblad. . Idag finns det tre metoder som används för att återvinna kompositmaterial. Dessa är mekanisk nedbrytning, termiska- och kemiska processer.

2.6.1 Termisk återvinningsprocess

Termisk återvinning bevarar vissa egenskaper hos materialen, vilket gör dem lämpliga för senare användning. Enligt Rani et al. (2019) finns det tre huvudkategorier av termiska metoder, dessa är pyrolys, fluidiserad bäddprocess och mikrovågspyrolys. Den externa uppvärmningen har som syfte att bryta ned avfallskompositerna och omvandla dem till fasta, flytande eller gasformiga produkter. Pyrolys är en återvinningsmetod för glasfiberförstärkta polymerer som innebär upphettning av kompositen i en syrefri miljö vid förhöjda temperaturer (300–700 °C) där organiska molekyler (till exempel plast) bryts ner till mindre beståndsdelar för att separera glasfibern från hårdplasten. Pyrolystekniken fokuserar på att bryta ned organiska material i avfallskompositen till molekylär form i form av gas eller vätska (Rani et al. 2021). Denna process ger en ren återvunnen glasfiber och hårdplasten blir till kemiska byggblock. Pyrolystekniken bryter ner polymermatrisen (epoxi, polyester etc.) till kolvätegaser och andra kemikalier som kan användas för att producera nya material. Genom att använda pyrolys kan återvinningsföretag säkra en stabil försörjningskedja för återvunnet material och skapa värde för andra industrier genom att producera nya produkter. (Fonte & Zydis 2022). En nackdel med pyrolys är risken för kolbildning på den slutliga fiberytan.

En relativt ny undersökt metod som Fonte & Zydis (2022) nämner är mikrovågspyrolys, som använder mikrovågor för att genomgående värma kompositen till temperaturer mellan 300 och 600 °C. Nedbrytningen sker med hjälp av mikrovågsstrålning som har en låg energiförbrukning och kortare handläggningstid jämfört med andra termiska återvinningsmetoder. Denna metod syftar till att minska skadorna på fibrerna under processen. En kemisk nedbrytningsprocess är involverad, där polymermatrisen bryts ner till användbara kemiska lösningsmedel (Rani et al. 2021).

Ytterligare en termisk återvinningsprocess är fluidiserad bädd, vilken arbetar vid höga temperaturer, cirka 450 °C, och använder luft som fluidiserande gas. I denna process sönderdelas kompositmatrisen genom luftvärmeflöde med hög temperatur. Fluidiserad bädd tillhör den termiska kategorin av återvinningsmetoder och genomför en termisk oxidativ process. Pyrolys och fluidiserad bädd i samband med den termiska återvinningsprocessen kan endast återvinna fibermaterialet och även det till bekostnad av krympta mekaniska egenskaper. Det är värt att notera att både mikrovågspyrolys och fluidiserad bädd är metoder under aktiv forskning och utveckling för att effektivisera återvinningsprocessen av kompositmaterial.

2.6.2 Kemisk återvinningsprocess

Lösningsmedelsbaserad nedbrytning är (solvolysis) är en kemisk process där lösningsmedlet bryter ner epoxi och polyester som används i hårdplaster (Fonte & Zydis 2022). Nedbrytningen utförs i ett förseglat kärl av rostfritt stål under högt tryck genom att värma upp avfall med etylenglykol i 16 timmar vid en temperatur på 230 °C i en ugn. Efter detta kan lösningsmedlet sköljas med vatten, aceton eller alkohol för att avlägsna fast material från vätska genom filtrering (Pathore & Panwar 2023). Denna högttemperaturs process baserar sig på hydrotermisk förvätskning där vatten och alkoholer kan fungera som ett lösningsmedel mellan glasfibern och plasten. Detta leder till att plasten bryts ner till mindre fragment medan glasfibern frigörs från det komposita nätverket. Dessa metoder fokuserar främst på återvinning av kolfiber på grund av dess marknadsvärde.

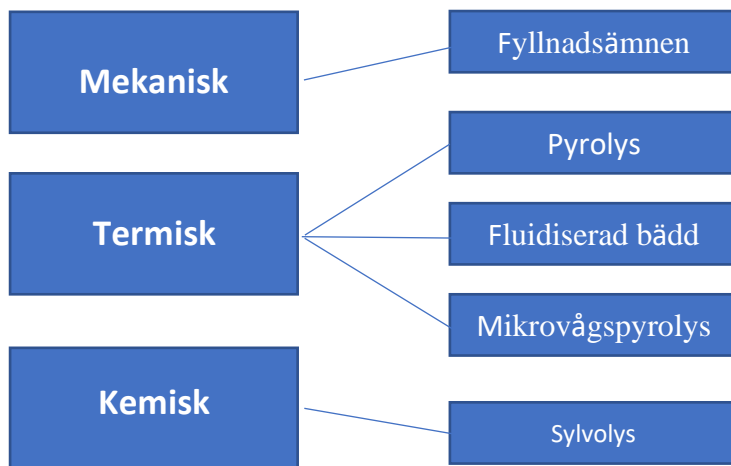
En studie utförd av RISE-koncernen (2020) undersökte att den lösningsmedelsbaserade nedbrytningen för glasfiberhårdplastkomposit, där subkritiskt vatten användes som lösning vid temperaturer på 250–370 °C och tryck på 100–170 bar. Syftet med studien var att undersöka om en generell kemisk återvinningsprocess kan utvecklas för alla typer av rotorbladsmaterial, med målet att utvinna olja från hårdplasten och glasfibern. Resultaten visade att det var möjligt att bryta ner kompositmaterialet i gamla rotorblad med hjälp av lösningsmedelsnedbrytningsprocessen med vatten, glykoler och alkoholer som huvudkomponenter. Dock återvanns endast 15 viktprocent olja och 65 procent glasfiber från ett rotorblad som innehöll 30 procent epoxiplast och 70 procent glasfiber (Mattson et al. 2020).

2.5.2 Mekanisk återvinningsprocess

En återvinningsprocess som kan producera andra råvaror under stegen av mekanisk behandling och separation kallas mekaniskt återvinningsprocess (Rani et al. 2021). Mekanisk nedbrytning innebär att det kompositmaterialet krossas och siktas. Denna metod sårar inte på härdplasten och glasfibrer, utan istället får man glasfiberbitar med härdplasten ihop klistrad. Denna massa kan endast användas i till exempel cementtillverkning. Denna metod möjliggör inte tillverkning av nya rotorblad eftersom det krävs långa fibrer för konstruktion av nya rotorblad

Denna kan användas som en lösning för att återvinna blad av glasfiberförstärkt komposit (GFRC) och kolfiberförstärkt komposit (CFRC). Genom att använda sig av metoder som till exempel rivning, fräsning, siktning, silning, uppsamling, förtätning och liknande kan material separeras och bearbetas för att skapa nya produkter. Dessa fraktioner används som fyllmedel eller förstärkningar i nya komposit eller direkt i byggbranschen. Denna är den enklaste av metoderna och den lösningen som har förts till en kommersiell nivå (Rahimizadeh et al. 2019). Enligt Rani et al (2021) är de första stegen i den mekaniska återvinningsprocessen skärning och krossning av rester eller avfallskompositdelar till små fragment som kallas för genererade klipp. Efter detta extraheras pulver och fibermaterial från genererat skrot genom silning och återvunnen produkt används för konstruktionsmaterial.

En av de största utmaningarna som begränsar användningen av de återvunna fibrerna från mekanisk återvinning är spår av gammalt harts, vilket kan bidra till ett svagt gränssnitt mellan fibrer och matris (Rahimizadeh et al. 2019).



Figur 9: Metoder för återvinning.

2.6. Alternativa användningsmetoder

I det följande presenteras alternativa återanvändningsmetoder för rotorblad. Exempel på hur rotorbladen efter de nått sin livslängd har återanvänts inom andra branscher. Dessa innovativa lösningar kommer att presenteras.

2.6.1 Användning av rotorblad inom byggbranschen

Rotorblad kan återanvändas för andra ändmål inom olika branscher. Många tillämpningar kan ses som utnyttjar den strukturella karaktären hos kompositvindkraftverksblad. I samband med EU:s direktiv (2000/53 / EC), som kräver att 95 procent av allt Eol (end-of-life) avfall återvinns, har användningen av demonterade rotorblad inom byggbranschen implementerats. Under det senaste årtiondet har efterfrågan på lätta strukturer av glasfiberförstärkta plaster (FRP) inom transport och infrastruktur ökat, särskilt för fotgångar- och cykelbroar i Europa. Denna efterfrågan är i linje med politiska åtgärder för att minska miljöpåverkan.

Genom att använda uttjänta delar av rotorblad gjorda av glasfiberförstärkta plaster som basmaterial för produktionen av dessa broar kan flera fördelar uppnås. För det första förlängs livslängden på rotorbladets material, vilket innebär att de kan få en andra användning istället för att hamna som avfall. Detta minskar avfallsmängden och bidrar till att uppfylla återvinningskraven i EU-direktivet. För det andra är FRP-materialen lätta och har hög

hållfasthet, vilket gör dem idealiska för användning inom transport- och infrastrukturprojekt. Genom att använda uttjänta rotorbladsdelar som basmaterial för dessa strukturer kan man dra nytta av deras mekaniska egenskaper samtidigt som man minimerar den totala miljöpåverkan.

Denna lösning inom byggindustrin, som beskrivs av André et al. (2020), är både relevant och fördelaktig. Genom att integrera återvunna material från vindkraftverk i konstruktionen av broar främjas cirkulär ekonomi och hållbar utveckling. Detta bidrar till att minska behovet av nya material och minimerar avfallsmängden samtidigt som man möter kraven för att främja hållbar mobilitet i Europa.

Avfallshanteringsföretaget Geocycle använder rotorbladsavfall från vindkraftverk för att generera värme och aska för att hjälpa till att tillverka cement. Denna process genomförs vid Holcim Lägerdorf-anläggningen i norra Tyskland. Det organiska innehållet i bladavfallet återvinns som termisk energi medan mineralfraktionen av avfallet integreras som aska i matrisen av cementklinkern som anläggningen producerar. Denna återvinningsmetod minskar koldioxidutsläppen från cementproduktionen och gör den mer resurseffektiv. Genom att använda bladavfallet som en ersättning för fossila bränslen och andra material i processen, minskar man koldioxidutsläppen med 110 kg per ton bladavfall och sparar 461 kg råmaterial (Wind Europe 2021)

En annan innovativ lösning på återanvändning av rotorblad är att förvandla dem till cykelskydd för cyklisterna. Detta sker i den danska hamnstaden Aalborg, där de nya återvinningsbara bladen tillverkas. Materialen som gör bladen svåra att återvinna gör dem också hållbara och starka varför de lämpar sig till produkter som dessa (Broom 2021).

3. Resultat

Även om vindkraft är en av de snabbast växande formerna av förnybar energikälla i såväl Finland som EU, är återvinningen av rotorblad den största utmaningen och medför en negativ miljöpåverkan. Eftersom flera av vindkraften som existerar håller på att nå slutet av sin livslängd, blir problemet hur man kan återanvända eller återvinna rotorbladen en väsentlig fråga. Det är relevant att anpassa ytterligare en cirkulär ekonomimodell på återvinning av

rotorblad för att göra vindkraftverk så hållbar som möjligt. När materialet i vindkraftverket når slutet av sin livslängd är det viktigt att säkerställa att det återvinns på ett lämpligt sätt. Genom att återvinna materialen kan vi reducera avfallsmängden och samtidigt dra nytta av de befintliga resurserna på ett mer hållbart sätt. Att ha en välplanerad återvinningsstrategi bidrar till att skapa en cirkulär ekonomi inom vindkraftindustrin, där materialen kan återanvändas och resurserna kan utnyttjas igen istället för att sluta som avfall.

För att underlätta återvinning och återanvändning av vindkraftverk och särskilt rotorblad är det viktigt att företag genomför livscykelanalyser (LCA) både för hela vindkraftverket och specifikt för rotorbladen. Hertzberg (2023) betonar i intervjun att rotorbladens livscykel måste beaktas, vilket gör det nödvändigt att redan i ett tidigt skede ta hänsyn till återvinning av rotorblad. Ilmatar efterfrågar LCAs från sina leverantörer för att mäta sitt eget koldioxidutsläpp för hela konsernen samt för varje projekt Ilmatar bygger. Detta sker i ett aktivt samarbete med leverantörer som ger detaljer om materialkompositionen och koldioxidutsläppet av till exempel rotorbladen. Detta ger möjlighet att identifiera förbättringsområden och strategier för att minimera miljöpåverkan samt maximera återvinning och återanvändning.

Design är nyckeln till framgång då det kommer till att få produkter att framgångsrikt kunna cirkuleras i det tekniska kretsloppet (Ellen Macarthur Foundation). I detta examensarbete har det framkommit att designen av rotorblad är väsentligt för att främja återvinning och återanvändning av rotorblad i en cirkulär ekonomi. Genom att designa produkter som är optimerade för återvinning kan man maximera återvinningsgraden och minska mängden avfall som genereras vid avveckling av vindkraftverk. En viktig aspekt är här att beakta demontering av rotorbladen vid slutet av deras livslängd. Genom att designa rotorbladen på ett sätt som underlättar demonteringsprocessen kan man göra återvinningen mer effektiv och smidig.

En möjlig strategi för att underlätta demontering är att använda standardiserade fästordningar och metoder. Detta skulle göra det enklare att avlägsna och separera olika komponenter och material vid demonteringen av rotorbladen. Genom att ha enhetliga demonteringsmetoder kan man också öka effektiviteten och säkerställa att återvunnet material kan användas på ett optimalt sätt. Resultaten av detta arbete indikerar att designen av rotorblad med en längre livslängd och bättre hållbarhet är avgörande för att främja en cirkulär ekonomi inom vindkraftindustrin. Genom att skapa högkvalitativa rotorblad som kan vara i drift under en längre tid kan behovet av att byta ut dem minskas, vilket resulterar i minskad avfallsmängd och

resursförbrukning. Förlängning av servicetiden för tillverkade rotorblad bör prioriteras framför tillverkning av helt nya blad för att minska kostnaderna och öka hållbarheten i branschen.

För att uppnå maximal återvinning är det viktigt att använda material som är hållbara och motståndskraftiga mot miljöpåverkan. Ett exempel på ett potentiellt återvinningsbart material för rotorblad är termoplastiska polymerer, såsom polypropen och polyamider (Gardiner 2008). Dessa har en god slagfålgighet, är lätta och har kortare produktionstid. De har även en hög återvinningsgrad. Termoplastiska polymerer kan smältas och omformas flera gånger utan att förlora sina mekaniska egenskaper, vilket gör det möjligt att återvinna och återanvända materialet för olika ändamål. Genom att smälta och omforma termoplastiska polymerer kan man skapa nya produkter och komponenter utan att behöva producera nya material från grunden. Detta bidrar till att minska resursförbrukningen och avfallsmängden i vindkraftindustrin.

Valet av lämpliga material för rotorblad är därför av avgörande betydelse för att främja återvinning och cirkularitet. Genom att integrera termoplastiska polymerer i designen av rotorblad kan man öka möjligheterna till återvinning och återanvändning, samtidigt som man upprätthåller de mekaniska egenskaperna och prestandan hos rotorbladen. Detta innebär att det är möjligt att skapa hållbara och återvinningsbara rotorblad som kan cirkulera i det tekniska kretsloppet och bidra till en mer hållbar vindkraftindustri.

För att säkerställa den kommersiella livskraften av återvinningsmetoder är det viktigt att etablera en stabil försörjningskedja där det återvunna materialet upprätthåller återvinningsföretagens verksamhet och skapar värde i andra industrier genom användning i nya produkter (Fonte & Xydis 2022). Hertzberg (2023) hävdar att vid återvinningsprocessen är det väsentligt att kvalitén på de återvunna materialen säkras och detta är ingen garanti. Det skall även finnas en ekonomiskt lukrativ efterfrågan på de återvunna materialen för att konkurrera med nya material och för på så sätt att göra det mer lockande för företag att återvinna material. Idag är det kostsamt att återvinna materialen samtidigt som efterfrågan är knapp.

Det är viktigt att fokusera på rotorbladens återvinning utifrån en cirkulär ekonomiaspekt och ta i beaktande företagets framtida syner på området. Återvinningen av materialen i dessa eller återanvändning kan vara en stor affärsmöjlighet för företag. Resultatet visar att rotorbladens hållbarhet måste synas i alla skeden av dess livscykel. Från valet av material, tillverkning,

design och demontering måste hållbarare alternativ vara av största vikt för aktörer inblandade. Redan i designskedet få så hållbara material och transportsätt som möjligt.

Forskning tyder på att viktig aspekt för att uppnå cirkuläret är att hitta innovativa användningsområden för återvunna material från vindkraftverk. Genom att ge nytt liv åt dessa material kan behovet av att använda nya resurser minska och på det sättet minska avfallsmängden. Återvunnet material från rotorbladen kan användas som en resurs för att utveckla helt nya produkter och material. Återvunna material kan nämligen omvandlas till högpresterande kompositer och andra användbara produkter. Detta öppnar upp möjligheter för att använda återvunna material inom en rad olika branscher och tillämpningar, vilket främjar en cirkulär ekonomi. En central utmaning enligt Hertzberg (2023) är att det till en grad saknas en stor efterfrågan för återvunna material. Frågan blir då hur det kan skapas en efterfrågan för en cirkulär ekonomi och vad dessa material ska användas till då de återvunnits.

Resultaten visar även att det finns flera möjligheter att använda återvunna material inom olika industriella tillämpningar, särskilt inom bygg- och konstruktionssektorn. Inom byggindustrin kan återvunna material från vindkraftverk användas för att tillverka komponenter till byggnader och infrastrukturprojekt. Till exempel kan uttjänta rotorblad omvandlas till strukturella element för broar eller andra konstruktionskomponenter. Genom att använda återvunna material kan man dra nytta av deras styrka och hållbarhet samtidigt som man minimerar miljöpåverkan.

För att främja återvinning av rotorblad och skapa ett mer attraktivt område krävs det en positiv inverkan från reglering och lagstiftning. Genom att införa regler och lagar som uppmuntrar till hållbara alternativ kan man skapa incitament för att främja cirkuläritet inom vindkraftsåtervinning. Samarbeten och regleringar spelar en avgörande roll i att främja cirkuläritet inom vindkraftsåtervinning. Genom att samarbeta kan olika centrala intressenter, såsom tillverkare, återvinningsföretag, forskningsinstitutioner och myndigheter, dra nytta av varandras kunskap och resurser för att utveckla hållbara och effektiva lösningar. Genom att samarbeta kan man identifiera och övervinna hinder för återvinning och arbeta mot gemensamma mål för att främja en cirkulär ekonomi inom vindkraftsindustrin.

Cirkulär ekonomi anpassas i flera områden i samhället och leder dessutom till innovation. Byggandet av vindkraft borde övervägas från det tidiga projektplaneringsstadiet för att minimera den totala resursförbrukningen och negativa effekter relaterade till dessa. Detta

examensarbete visar att det fortfarande behövs fler och mer djupgående undersökningar om rotorbladens återvinning för att kunna komma på innovativa lösningar för att göra rotorbladen mer hållbara samtidigt som dess egenskaper hålls. Nya metoder för återvinning, nya material, förlängd livslängd och innovativ återanvändning behövs nämligen för att gå mot en cirkulär ekonomi. Vidare är underhållning, noggrann planering och installation samt användning av hållbara material väsentligt för att minimera de skadliga effekterna av rotorbladen och därmed gå mot en mer cirkulär ekonomi.

Enligt resultaten från litteraturoversikten och intervjun framkommer det tydligt att det finns en stark strävan att övergå till en cirkulär ekonomi inom vindkraftverk och att hitta innovativa lösningar för en mer effektiv återvinning av rotorblad. Dock erkänns det att denna övergång är utmanande och kommer att ta tid. Detta bekräftades även i intervjun med Hertzberg (2023) och genom Ilmatars samarbete med Stena Recycling för återvinning av rotorblad. Eftersom demonteringen av vindkraftverken först är aktuellt om cirka 20–30 år följer Ilmatar aktivt med pågående och ny forskning om återvinning av rotorblad och är aktiva i olika evenemang. Då återvinningen blir relevant, kan företaget på detta sätt ha all aktuell information om de bästa återvinningsmöjligheterna. Hertzberg (2023) hoppas på att det finns bättre återvinningsmöjligheter om 20–30 år än idag och litar också på att hela branschen kommer att utvecklas så att det finns mer information då Ilmatar skall avveckla sina vindkraftverk. Detta är även väsentligt för andra stora och mindre vindkraftverksföretag som kan leda till nya idéer och möjligheter för återvinningsprocessen.

Med tanke på att flera vindkraftverk måste demonteras inom en snar framtid blir det avgörande att hitta modeller för att återvinna rotorblad. Med den ökande expansionen av vindkraftverk blir det allt viktigare att designa vindkraftverk med återvinningsaspekten i åtanke. Genom att redan i ett tidigt skede ta hänsyn till detta och använda material som är återvinningsbara eller återanvändbara kan man gå från en linjär ekonomi till en cirkulär ekonomi inom vindkraftverk.

4. Slutsatser

Idag finns det lovande framsteg och lösningar som pekar mot en mer hållbar framtid för återvinning av rotorblad i vindkraftverk. En total återanvändning av material av

vindkraftsparker är dock inte realistisk därför bör tillverkare sträva efter renare produktionstekniker och återvinningssystem med slutna kretslopp. Att sträva efter en cirkulär ekonomi inom vindkraftsindustrin, där material och komponenter kan återanvändas eller återvinnas, är nödvändigt för att säkerställa att denna förnybara energikälla fortsätter att vara en hållbar och miljövänlig lösning för framtiden. Det är även värt att notera att återvinning av rotorblad inte är den enda lösningen för att uppnå hållbarhet inom vindkraftverk. För att främja hållbarheten inom vindkraftsindustrin är det viktigt att inte bara fokusera på återvinning av rotorblad, utan även att minska energiförbrukningen och utsläppen från tillverkning och installation av dessa blad.

Denna forskning är väsentlig och visar att det fortfarande finns områden som kräver ytterligare forskning när det gäller den cirkulära ekonomin för rotorblad. För att effektivt nyttja jordens resurser och undvika överutnyttjande är det av största vikt att hitta nya lösningar på de utmaningar som vindkraftverk medför. Endast då kan vi säkerställa att energiproduktionen är hållbar. Detta är särskilt relevant med tanke på de många stora vindkraftsprojekt som planeras eller är under konstruktion. Det kräver ett aktivt samarbete mellan aktörer inom området och en noggrann planering redan i design skedet för att övergå från en linjär ekonomi till en cirkulär ekonomi vid konstruktion och demontering av vindkraftverk.

Det är tydligt att politiker, företag och institutioner har ett betydande ansvar när det gäller att främja en mer cirkulär återvinning av rotorblad och därigenom hela vindkraftverket. Företag borde inse den verkliga fördelen med cirkulär ekonomi och betrakta det som en affärsmodell för att framgångsrikt kunna anpassa sig till återvinningsmetoder. Men detta kräver att återvinningen blir ekonomiskt lönsamt, att man kan säkra en hög kvalitet på materialen och att det finns en efterfrågan på återvunnet material på marknaden. Vidare kan finansiärer och leverantörer av nya vindkraftsprojekt uppmuntra till en mer cirkulär ekonomimodell. Dessutom måste politiker och internationella institutioner ta initiativ genom att tillhandahålla policyrekommendationer, lagstiftning och direktiv för att säkerställa att miljökraven följs genom hela vindkraftverkets livscykel, från tillverkning till avveckling. Detta är avgörande för att främja övergången till en mer hållbar och cirkulär ekonomi inom vindkraftsindustrin.

Slutligen finns det utmaningar som påverkar den cirkulära ekonomin för rotorblad, såsom ökad resursanvändning, konkurrens och bristande utveckling av lösningar för avvecklade komponenter och material när vindkraftverken når slutet av sin livscykel. Fortsatt forskning

för att kunna utvärdera återvinningsgraden av rotorblad är av avgörande betydelse i denna snabbt växande form av energikälla. Genom att fortsätta undersöka och utveckla innovativa metoder och tekniker för att återvinna och återanvända rotorblad kan vi adressera dessa utmaningar och främja en mer hållbar och cirkulär ekonomi inom vindkraftsindustrin. Det är viktigt att vi fortsätter att arbeta tillsammans för att hitta effektiva lösningar och främja en mer hållbar framtid för vindkraftverk och deras komponenter.

Källor

André, A., Kullberg, J., Nygren, D., Mattsson, C., Nedev, G., & Haghani, R. (2020). Re-use of wind turbine blade for construction and infrastructure applications. In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (Vol. 942, No. 1, p. 012015). IOP Publishing.

Nagle, A. J., Delaney, E. L., Bank, L. C., & Leahy, P. G. (2020). A Comparative Life Cycle Assessment between landfilling and Co-Processing of waste from decommissioned Irish wind turbine blades. *Journal of Cleaner Production*, 277, 123321.

Berg, A., Antikainen, R., Hartikainen, E., Kauppi, S., Kautto, P., Lazarevic, D., ... & Saikku, L. (2018). Circular economy for sustainable development. Finnish Environment Institute

Beauson, J., Madsen, B., Toncelli, C., Brøndsted, P., & Bech, J. I. (2016). Recycling of shredded composites from wind turbine blades in new thermoset polymer composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 90, 390–399.

Boverket. 2009. Vindkraftshandboken: Planering och prövning av vindkraftverk på land och i kustnära vattenområden.

Broom, D (2021). These bike shelters are made from wind turbines. World Economic Forum. Tillgänglig: <https://www.weforum.org/agenda/2021/10/recycle-bike-wind-turbine/> (Hämtad: 19.5.2023)

Bryman, A. & Nilsson, B. (2018) Samhällsvetenskapliga metoder. Upplaga 3. Stockholm: Liber AB.

Dawson, D. A., Purnell, P., Roelich, K., Busch, J. & Steinberger, J. K. (2014). Low Carbon Technology Performance vs Infrastructure Vulnerability: Analysis through the Local and Global Properties Space. *Environmental science & technology*, 48 (21), s. 12970–12977. doi:10.1021/es500902b

Europaparlamentet. 2021. Hur vill EU uppnå en cirkulär ekonomi senast till år 2050?

Tillgänglig:

<https://www.europarl.europa.eu/news/sv/headlines/society/20210128STO96607/hur-vill-eu-uppna-en-cirkular-ekonomi-senast-till-ar-2050> (Hämtad: 14.4.2023)

Ellen MacArthur Foundation (2015a). Towards a circular economy: Business rationale for an accelerated transition. Tillgänglig:

https://www.ellenmacarthurfoundation.org/assets/downloads/TCE_Ellen-MacArthur-Foundation_9-Dec-2015.pdf (Hämtad: 15.5.2023.)

Ellen Macarthur Foundation. Circulate products and materials. Tillgänglig:

<https://ellenmacarthurfoundation.org/circulate-products-and-materials> (Hämtad: 12.5.2023)

Ellen MacArthur Foundation. (2015b) Methodology

Circularity Indicators: An approach to measuring circularity. Project overview.

Europaparlamentet. 2015. Circular economy: definition, importance and benefits. Tillgänglig:

<https://www.europarl.europa.eu/news/en/headlines/economy/20151201STO05603/circular-economy-definition-importance-and-benefits>

Gallagher, J. et al. (2019). Adapting Stand-Alone Renewable Energy Technologies for the Circular Economy through Eco-Design and Recycling. *Journal of industrial ecology*, 23 (1), s. 133–140. doi:10.1111/jiec.12703

Gardiner, G. (2008). Wind blade manufacturing, Part II: Are thermoplastic composites the future. *High performance composites*, 10, 21.

Guezuraga, B., Zauner, R., & Pölz, W. (2012). Life cycle assessment of two different 2 MW class wind turbines. *Renewable Energy*, 37(1), 37-44.

Hartley, K, Van Santen, S, Kirchherr, J. (2020). Policies for transitioning towards a circular economy: Expectations from the European Union (EU). *Resources, Conservation and Recycling*, Volume 155.

Leising, E., Quist, J. & Bocken, N. (2018). Circular Economy in the building sector: Three cases and a collaboration tool. *Journal of cleaner production*, 176, s. 976–989. doi: 10.1016/j.jclepro.2017.12.010

International Renewable Energy Agency. (2018). Renewable energy prospects for the European Union. International Renewable Energy Agency (IRENA).

Jani, H. K., Kachhwaha, S. S., Nagababu, G., & Das, A. (2022). A brief review on recycling and reuse of wind turbine blade materials. *Materials Today: Proceedings*.

Jensen, P. D., Purnell, P., & Velenturf, A. P. (2020). Highlighting the need to embed circular economy in low carbon infrastructure decommissioning: The case of offshore wind. *Sustainable Production and Consumption*, 24, 266-280.

Korhonen, J., Honkasalo, A., & Seppälä, J. (2018). Circular economy: the concept and its limitations. *Ecological economics*, 143, 37-46.

Larsen, K. (2009). Recycling wind turbine blades. *Renewable energy focus*, 9(7), 70-73.

Mail, S & Garrett P., (2022). Life Cycle Assessment of Electricity Production from an onshore V136-4.2 MW Wind Plant – 22nd March 2022. Vestas Wind Systems A/S, Hedeager 42, Aarhus N, 8200, Denmark.

Martínez, E., Sanz, F., Pellegrini, S., Jiménez, E. & Blanco, J. (2009). Life-cycle assessment of a 2-MW rated power wind turbine: CML method. *The international journal of life cycle assessment*, 14 (1), s. 52–63. doi:10.1007/s11367-008-0033-9

Mattson, C. (2021). Creating circular streams from GFRP composite waste. Chalmers, Gothenburg Circular Materials Conference. Tillgänglig: https://www.circularmaterialsconference.se/wp-content/uploads/2021/04/Cecilia-Mattsson-Circular-Materials-Conference-2021_april21.pdf

Mattsson, C., Juntikka, M., Sott, R., & Tränkle, T. (2020). Kemisk återvinning av glasfiberkomposit från vindturbinblad.

Mendoza, J. M. F., Gallego-Schmid, A., Velenturf, A. P., Jensen, P. D., & Ibarra, D. (2022). Circular economy business models and technology management strategies in the wind industry: Sustainability potential, industrial challenges and opportunities. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 163, 112523.

Miljöministeriet. Utbyggnad av vindkraft. Tillgänglig: <https://ym.fi/sv/utbyggnad-av-vindkraft#:~:text=Cirka%209%20procent%20av%20v%C3%A5r,2021%20byggdes%20141%20nya%20vindkraftverk>. (Hämtad:14.4.2023)

Mishnaevsky, L., Branner, K., Petersen, H., Beauson, J., McGugan, M., & Sørensen, B. (2017). Materials for Wind Turbine Blades: An Overview. *Materials*, 10(11), 1285. MDPI AG. Retrieved from <http://dx.doi.org/10.3390/ma10111285>

Pimenta, S., & Pinho, S.T. (2011). Recycling carbon fibre reinforced polymers for structural applications: Technology review and market outlook. *Waste Management* 31(2): 378–392. Available at: <https://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2010.09.019>.

Plastics New Zealand. Polymer Basics. Tillgänglig: <https://www.plastics.org.nz/environment/educational-resources/general-plastics-resources/polymer-basics#:~:text=Thermoset%20polymers%20do%20not%20soften,linked%20together%20and%20remain%20rigid> (hämtad: 10.5.2023)

Rani, M., Choudhary, P., Krishnan, V., & Zafar, S. (2021). A review on recycling and reuse methods for carbon fiber/glass fiber composites waste from wind turbine blades. *Composites Part B: Engineering*, 215, 108768.

Rathore, N., & Panwar, N. L. (2022). Environmental impact and waste recycling technologies for modern wind turbines: An overview. *Waste Management & Research*;41(4): 744–759. doi:10.1177/0734242X221135527

Reike, D., Vermeulen, W. J., & Witjes, S. (2018). The circular economy: new or refurbished as CE 3.0? - exploring controversies in the conceptualization of the circular economy through a focus on history and resource value retention options. *Resources, conservation and recycling*, 135, 246-264.

Rogge, K.S., Reichardt, K., 2016. Policy mixes for sustainability transitions: An extended concept and framework for analysis. *Research Policy*, 45, 1620–1635.

Rahimizadeh, A., Kalman, J., Fayazbakhsh, K., & Lessard, L. (2019). Recycling of fiberglass wind turbine blades into reinforced filaments for use in Additive Manufacturing. *Composites Part B: Engineering*, 175, 107101.

Schubel, P. J. & Crossley, R. J. (2012). Wind Turbine Blade Design. *Energies*, 5 (9), s. 3425–3449. doi:10.3390/en5093425

Stöker, H. (2013) Loads on wind turbine blades i Brøndsted, P. and Nijssen, R.P. red., 2013. *Advances in wind turbine blade design and materials*. pp, 29-58

Systemtechnik Weser-Ems GmbH. Rotor blade inspection. Syswe.fi. Tillgänglig: <https://www.syswe.de/en/windenergie-rotorblattinspektion/> (hämtad: 16.5.2023).

Sørensen, B. F. (2009). Materials and structures for wind turbine rotor blades—An overview. In *Proceedings of the 17th International Conference on Composite Materials* (pp. 27-31)., Chicago,

Vattenfall. Vindkraft. Tillgänglig: <https://www.vattenfall.fi/sv/elavtal/energikallor/vindkraft/> (Hämtad:19.4.2023)

Vidal, O., Goffé, B. & Arndt, N. (2013). Metals for a low-carbon society. *Nature geoscience*, 6 (11), s. 894–896. doi:10.1038/ngeo1993

Vindkraften.se. Konstruktion och funktion. Tillgänglig: <https://vindkraften.se/konstruktion-funktion-2/> (Hämtad: 13.5.2023)

Wind Europe. (2021). WindEurope CEO visits German cement plant that's running on blade waste. Tillgänglig: <https://windeurope.org/newsroom/news/windeurope-ceo-visits-german-cement-plant-thats-running-on-blade-waste/> (Hämtad:20.5.2239)

Wood, K. (2012). Wind turbine blades: Glass vs. carbon fiber. Composite world. Tillgänglig: <https://www.compositesworld.com/articles/wind-turbine-blades-glass-vs-carbon-fiber> (hämtad: 25.5.2023)

Yurdusev, M. A., Ata, R. A. Ş. İ. T., & Çetin, N. S. (2006). Assessment of optimum tip speed ratio in wind turbines using artificial neural networks. *Energy*, 31(12), 2153-2161., Chicago,

Ziegler, L., Gonzalez, E., Rubert, T., Smolka, U., & Melero, J. J. (2018). Lifetime extension of onshore wind turbines: A review covering Germany, Spain, Denmark, and the UK. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, 1261-1271.

Bilagor

Bilaga : Intervjuguide.

- Hur arbetar Ilmatar med återvinning av rotorblad för vindkraftverk och vilka metoder används för att hantera detta avfall?
- Vilka utmaningar står ni inför när det gäller återvinning av rotorblad, och hur har ni arbetat för att lösa dessa utmaningar?
- Vilka framsteg har Ilmatar gjort när det gäller återvinning av rotorblad, och hur har detta påverkat företagets ESG-mål?
- Finns det några framtida teknologier eller innovationer som ni undersöker för att förbättra återvinningen av rotorblad?
- Hur samarbetar Ilmatar med andra aktörer inom vindkraftsindustrin för att främja hållbar återvinning av rotorblad?
- T.ex. finns det liknande projekt som det med Stena Recycling
- Vilka ekonomiska och affärsmässiga möjligheter ser du i återvinning av rotorblad? Hur kan detta bidra till företagets hållbarhetsstrategi och långsiktiga tillväxt?
- Vad ser du som de största utmaningarna och möjligheterna inom återvinning av rotorblad i framtiden, och hur planerar Ilmatar att möta dem