

Effektiv transport av vindturbinblader for gjenvinning av glassfiber fra kompositt

Sammendrag

Med det grønne skiftet kommer større krav til bærekraftig ressursbruk og materialgjenvinning. Turbinbladene består til stor del av glassfiber (55%, som i motsetning til organisk materiale ikke kan brennes. Resirkulering av materiale er spesielt en utfordring for materialer som er laget for å vare lenge og tåle sterke krefter, som kompositt. For å håndtere store komposittkomponenter, som vindturbinblader, ved end-of-life kuttes og makuleres de som regel til små biter. Slik kutting gir kortere glassfiber som svekker styrken i det resirkulerte materialet mye.

Denne oppgaven undersøker transport av glassfiber fra end-of-life materiale fra vindturbinblad. Dette gjøres gjennom å identifisere noen produkter som kan være mulige å produsere av resirkulert glassfiber av forskjellig lengde. En antakelse er at lange fibre fra vindturbinblader, med bedre mekaniske egenskaper, kan selges til en høyere pris enn korte fibre med dårlige mekaniske egenskaper. For å gjenvinne lange fibre kreves det at man gjenvinner komposittmaterialet i store biter. Slike store biter stiller andre krav til transport enn kuttete biter og finmalt kompositt. I studien beregnes transportkostnadene for å transportere materiale avhengig av størrelsen det kuttes i. Det tas utgangspunkt i hvor mye som kan transporteres på en lastebil ved en gitt størrelse på delene. Dette vil gi et bilde av hva som kan være en optimal størrelse på delene som turbinbladene kuttes opp i, sett fra et transportperspektiv, basert på transportkostnader og prisen man kan få ved videre salg av glassfiber materialet. Salgsprisen til glassfibrene tar utgangspunkt i prisen for noen eksempelprodukter som materialet kan brukes til.

Opgaven tar utgangspunkt i et ønske om å bidra til en mer sirkulær økonomi og at glassfiber materialet derfor skal gjenvinnes i så høyverdige produkter som mulig. Samtidig er det ikke ønskelig å betale mer enn nødvendig for å oppnå dette. Denne oppgaven skal derfor kvantifisere kostnadsforskjellene ved transport og videre salg av glassfiber.

Modellen viste at det billigste sluttproduktet, av de som er undersøkt i denne oppgaven, er kajakk og det dyreste er å transportere hele turbinblader

Forkortelser

EoL = End-of-Life

PET = Polyetylentereftalat

Figurer og tabeller

Figure 1: Illustrasjon av verdikjeden fra Baltyk til gjenvinningsanlegget.....	8
Figure 2: Kart over Polen med havnen markert med rødt og pyrolyseanlegget markert med blått. Kartene er hentet fra The World Factbook (2021) og Equinor (2021)	8
Figure 3: Enkel illustrasjon av at materiale går tapt dersom det kuttes i lite hensiktsmessige lengder. Svart linje viser lengden som brukes for transport, grønn del viser lengden som brukes og rød del viser det som ikke brukes.....	10
Figure 4: Visualisering av lineær og sirkulær økonomi (Buren et al, 2016, s. 4).....	14
Figure 5: Oversikt over tiltak for å fremme sirkulær økonomi i følge 9R rammeverket (Hekkert et al, 2017, s. 223-224).....	14
Figure 6: Eksempel på vindpark laget av gjenbrukte vindturbinblad (Windmills tech, 2024)	16
Figure 7: Kart over Baltyk (Equinor, 2021)	32
Figure 8: Sammenheng mellom massen til turbinblader og maks kapasitet for en vindturbin (Barlow og Liu, 2016, s. 3).....	33
Figure 9: Sammenheng mellom kapasitet per vindturbin og mengden materiale for Baltyk .	33
Figure 10: Kjøreavstand mellom Leba og nærmeste pyrolyseanlegg: Klean Industries i følge google maps	34
Figure 11: Illustrasjon av alternativene for verdikjeden fra Baltyk til pyrolyseanlegget der delene som dekkes av beregningene er markert med blått	35
Figure 12: 67 m langt turbinblad som transporteres (Braata, 2021)	36
Figure 13: Inputvariabler og formler for beregninger som er uavhengige av størrelse på delene som transporteres.....	38
Figure 14: Formler for beregning av kostnader for eksempelprodukter	39
Figure 15: Formler for beregning av kostnader for kuttet glassfiber	39
Figure 16: Formler for beregning av kostnader ved transport av hele vindmølleblad	40
Figure 17: Formler for beregning av kostnader dersom størrelse på glassfiberbitene tar utgangspunkt i containeren	40
Figure 18: Kart over Polen med Leba markert i rødt og en sirkel som viser hva som havner innenfor 213km i kjøreavstand på Leba. Pyrolyseanlegget om denne oppgaven tar utgangspunkt i er markert med blått.....	47
Table 1: Totalkostnad for 5 alternativer for transport.....	42
Table 2: Ekstra kostnad for å prioritere sirkularitet i de ulike scenarioene	43
Table 3: Nødvendig pris for glassfibrene for å tjene like mye ved salg av materialet som transportkostnadene.....	43
Table 4: Sluttsum ved forskjellig type container for ulike scenarioer	46

Innholdsfortegnelse

Sammendrag	1
Forkortelser	2
Figurer og tabeller	3
Innholdsfortegnelse	4
1. Introduksjon	6
1.1. Problemstilling og mål.....	9
1.2. Begrensninger	12
2. Teori	12
2.1. Sirkulærøkonomi	13
2.2. Reverse logistics.....	15
2.3. Dagens løsning.....	16
2.3.1. Alternativer for materialet	16
2.3.2. Transport og verdikjede	17
2.4. Material.....	20
2.4.1. Glassfiber	20
2.4.2. Epoksy.....	21
2.4.3. Andre materialer	21
2.5. Pyrolyse.....	21
2.6. Transport	23
2.6.1. Eksempelprodukter	23
2.6.2. Transportmåte og kostnad	25
2.6.3. Lastbærer.....	26
2.6.4. Effektivt design	26
2.6.5. Forsinke valg	27
2.7. Beregningsmodell	27
2.7.1. Transportkostnader	27
2.7.2. Potensiell fortjeneste	30
3. Metode	31
3.1. Litteraturstudie	31
3.2. Case	31
3.2.1. Baltyk	32
3.2.2. Gjenvinning.....	33
3.2.3. Verdikjede	35
3.3. Beregningsmodell	36
3.3.1. Inputvariabler	37
3.3.2. Beregninger	38
3.3.3. Eksempelprodukter	41
3.3.4. Transport	41

3.4.	Feilkilder.....	41
4.	Resultater	42
4.1.	Modell.....	42
4.1.1.	Kuttet glassfiber	43
4.1.2.	Skateboard.....	44
4.1.3.	Kajakk.....	44
4.1.4.	Hele turbinblad.....	44
4.2.	Sensitivitetsanalyse.....	45
4.2.1.	Endre containerstørrelse	45
4.2.2.	Transportkostnader og avstand.....	46
4.2.3.	Mengde material	47
5.	Diskusjon	48
5.1.	Dagens situasjon som utgangspunkt	48
5.2.	Forventning videre	48
5.2.1.	Marked for gjenvunnet glassfiber	49
5.2.2.	Tilgjengelig teknologi	49
5.3.	Sirkularitet som forutsetning.....	49
5.4.	Lagerkostnader	50
6.	Konklusjon	50
7.	Kilder.....	51

1. Introduksjon

Denne bacheloroppgaven handler om logistikkutfordringer knyttet til resirkulering av glassfiber fra kompositt i vindturbinblader. Turbinbladene består til stor del av glassfiber (55%; Siemens Gamesa, u.å.), som i motsetning til organisk materiale ikke kan brennes. I dag blir vindturbinbladene ofte ikke resirkulert, men legges på deponi ved end-of-life (EoL). Derfor finnes det i dag få verdikjeder for gjenvunnet komposittmateriale. Det er dermed ingen standardløsning for hvor store deler som er mest effektive å transportere til gjenvinningsanlegget eller hvordan de transporteres, når vindparken avvikles.

I denne oppgaven lages en modell for å beregne transportkostnadene og sette dette sammen med på gjenvunnet glassfiber av forskjellig lengde. Det er lagt til grunn at tilnærmet alt materiale i bladene skal brukes videre i et nytt produkt. Dermed er det ikke ønskelig å transportere deler som er større enn nødvendig, dersom dette betyr at en del av glassfibrene ikke kan brukes i et nytt produkt.

Opgaven er skrevet i samarbeid med Equinor, som en del av et forskningsprosjekt som handler om sirkulære løsninger innenfor vindkraftproduksjon. Jeg valgte denne problemstillingen fordi jeg vil jobbe med logistikkutfordringer knyttet til fornybar energi. Equinor har flere prosjekter innenfor vind og ble dermed en naturlig samarbeidspartner.

Med det grønne skiftet kommer også økt krav til gjenbruk. For eksempel har EU nye direktiv som handler om bærekraftig avfallshåndtering, med mål om å fremme sirkulære verdikjeder. Vindindustrien får dermed ansvar for hvordan materialet fra vindparker brukes videre etter EoL (EU, 2018, s. 1). Flere land har dessuten begynt å forby deponering av komposittmaterialer (Karavida og Peponi 2023, s. 3-4; Birkved et al, 2023, s. 2) og i 2021 søkte Wind Energy Europe om å gjøre det ulovlig i hele Europa (Lund og Madsen, 2024, s. 1). Dette blir en stor utfordring da materialet i vindturbinbladene er laget for å vare lenge og tåle sterke krefter, som vindturbinblader.

Når glassfibrene er kombinert med et annet materiale, for eksempel epoxy, endres egenskapene til materialet. Det nye materialet kalles en kompositt. Komposittmaterialer brukes mest i luftfart, kjøretøy, maritime applikasjoner og vindkraft. Til tross for at disse bruksområdene sliter veldig på materialet, beholder kompositter mye av styrken ved EoL (Gagani et al, 2021, s. 2-3). Ordet kompositt refererer dermed til materialet i turbinbladene

som inneholder glassfiber, mens glassfiber er materialet som etter gjenvinning skal selges videre.

I dag blir ikke glassfiberkompositt gjenbrukt i stor grad, da få gode gjenvinningsmetoder finnes på industriell skala (Enevoldsen og Paulsen, 2021, s. 7). I følge Karavida og Peponi (2023, s. 2, 4) mangler dessuten de som gjenvinner komposittmaterialer ofte kontakt med slutt kunder som kan bruke gjenvunnet materiale i nye produkter. Dette gjør det vanskelig å utnytte gjenvunnet materiale i nye verdikjeder. Gjenvinning vil likevel være nødvendig for å møte strengere bærekraftskrav i framtiden.

Oppgaven tar utgangspunkt i en av Equinors planlagte vindparker, Baltyk, og spesifikt logistikken knyttet til gjenvinning av glassfiber fra vindturbinblader fra denne vindparken. Denne oppgaven er også brukt som eksempel i en tidligere oppgave (Magnusson, 2023). Baltyk er en vindpark til havs i Østersjøen mellom 22 og 37km utenfor kysten til Polen (Equinor, 2022). Før vindturbinene skal gjenvinnes må de derfor transporteres inn til en havn og derfra videre til gjenvinning, via landtransport. For å unngå komplikasjoner ved transport over landegrenser tar oppgaven utgangspunkt i eksisterende infrastruktur i Polen. Det antas også at samme havn brukes når vindparken avvikles, som når den ble bygget. Denne havnen har alle fasiliteter som trengs for håndtering, transport og oppbevaring av denne typen blader, fra etableringen av vindparken. Det er derfor naturlig å anta at havnen også er egnet for å håndtere bladene ved demontering.

Fra havnen transporteres vindturbinbladene til et gjenvinningsanlegg for resirkulering av materialet i bladene. Her behandles bladmaterialet, kompositten, med en egnet metode slik at glassfiber og organisk material fra epoxy separeres fra hverandre. De nye produktene som produseres ved resirkuleringen skal deretter transporteres til kunder for bruk i produksjon av nye produkter. Et skjema over alternativene for verdikjeden er vist i figur 1. I figur 2 vises også et kart over Polen, med havnen markert med rødt og gjenvinningsanlegget, i dette tilfellet et pyrolyseanlegg, er markert med blått.

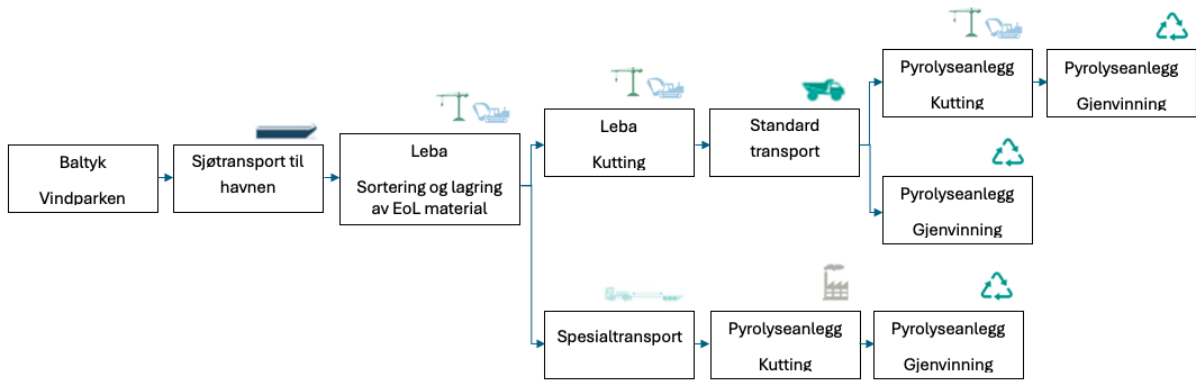


Figure 1: Illustrasjon av verdikjeden fra Baltyk til gjenvinningsanlegget



Figure 2: Kart over Polen med havnen markert med rødt og pyrolyseanlegget markert med blått. Kartene er hentet fra The World Factbook (2021) og Equinor (2021)

Transporten av gjenvunnet materiale fra gjenvinningsanlegget til kunden er avhengig av hvem kunden er og hvor de har sin produksjon. Oppgaven tar utgangspunkt i at anlegget som i dag fremstår som best egnet for resirkulering av bladmaterialer fra den aktuelle vindparken, med hensyn til avstand til havnen og tilgjengelig teknologi (pyrolyse), kan brukes ved resirkulering av turbinbladene etter vindparkens avvikling. Det antas at dette anlegget

utvikler sin virksomhet I de kommende årene slik at muligheter finnes til å lagre, håndtere og prosessere fiber og kompositt fra turbinblader når vindparken Baltyk tas ut av drift.

Siden vindturbinbladene består av flere materialer enn kompositt, er det også mulig å få ut flere materialtyper ved gjenvinningen, men glassfiber utgjør hoveddelen av materialet I bladene. Likevel finnes det i dag ingen industrielle metoder for å gjenvinne eller gjenbruke glassfiber. Det pågår I dag mange forskningsprosjekter på dette området (J. Paus, personlig kommunikasjon, 21. mai 2024). Senden mengden komposittavfall er et voksende problem, antar denne oppgaven at før Baltyk avvikles, vil gjenvinningsmetodene som I dag forskes på, kunne gjenvinne glassfiber fra vindturbinblader I industriell skala.

Målet med denne oppgaven er å finne ut hvor store deler av vindturbinbladere som er mest hensiktsmessig å transportere fra havnen til gjenvinningsanlegget. Transporten mellom vindparken og havnen antas være lik uavhengig av hva som skal skje med materialet videre. Transporten mellom gjenvinningsanlegget og kunden er kompleks, siden man kan forvente at den resirkulerte glassfiberen kan brukes I forskjellige produkter, som produseres av forskjellige kunder. Derimot er havnen fastsatt og denne oppgaven antar at det mest egnede gjenvinningsanlegget kan brukes.

1.1. Problemstilling og mål

I dag legges ofte komposittavfall fra vindturbinblader på deponi, da dette er billigere enn å gjenvinne materialet. Fordi deponering er et rimelig alternativ blir det vanskelig å etablere nye verdikjeder for gjenvunnet materiale. Transport, håndtering og gjenvinning av materialet koster penger, noe som gjør at produktene fra gjenvinningen blir relativt dyre. Dette blir en ond sirkel, der en lav kostnad for deponering gjør at det ikke finnes mye materiale som kan gjenvinnes. Dette fører videre til usikkerhet knyttet til tilgangen til råvarer for bedrifter som ønsker å bruke dette materialet. Til tross for at det i noen sammenheng kan være billigere å kjøpe gjenvunnet materiale enn nytt, blir det ikke gjort (Gagani et al, 2021, s. 6-7). I dag skjer resirkulering av kompositt i forsknings- eller pilotskala og det er få selskaper som produserer noe nytt av materialet. Selskapene som gjenvinner materialet tjener penger på å ta betalt for å ta imot komposittmaterialet, en såkalt "gate fee" (J. Paus, personlig kommunikasjon, 11. april 2024).

Samtidig er vindturbinblad vanskelig å transportere og bearbeide på grunn av størrelsen. Turbinbladene som behandles i denne oppgaven er 115m lange (Bauer og Matsysik, 2024). All forflytning av hele vindturbinblader må derfor skje med transportmidler spesifikt laget for vindturbinblad. For å unngå denne utfordringen kan vindturbinbladene deles i mindre biter. Desto tidligere i verdikjeden dette gjøres, desto enklere blir transporten.

Med hensyn på verdikjeden er det mest hensiktsmessig å beholde bladene som størst mulig deler. På den måten kan glassfibrene kuttes i ønsket størrelse ved bestilling, og selges til flere potensielle kunder. Dette gjør det enklere å selge glassfibrene etter gjenvinning, da de ikke er kuttet spesifikt for et bestemt sluttprodukt.

Et viktig hensyn i oppgaven er målet om å bidra til en mer sirkulær økonomi. En ulempe med å kutte bladene i store biter før transport, for deretter å kutte glassfibrene etter kundens ønske er at dette potensielt kan føre til svinn og tap av materiale. For eksempel gjelder dette hvis kunden trenger deler som er lengre enn halvparten av det som transporteres. En illustrasjon av dette er vist i figur 3, der den svarte linjen skal være lengden som er kuttet for å transportere glassfibrene, den grønne linjen er lengden som brukes og den røde er for kort for å brukes. Uten en plan for restene av glassfibrene blir det kastet, noe som er uønsket i en sirkulær økonomi. Å tilpasse størrelsen på komposittdelene til lastbæreren begrenser dermed også hvilke kunder som glassfibrene kan selges til. Denne oppgaven tar utgangspunkt i et mål om å bidra til en mer sirkulær økonomi, samtidig som det ikke skal koste mer enn nødvendig, slik at det kan etableres et marked for produktene fra gjenvinningen.



Figure 3: Enkel illustrasjon av at materiale går tapt dersom det kuttes i lite hensiktsmessige lengder. Svart linje viser lengden som brukes for transport, grønn del viser lengden som brukes og rød del viser det som ikke brukes

Det mer sirkulært å bevare styrken i materialet mest mulig, slik at materialet kan gjenvinnes flere ganger. Problemstillingen blir da «hvor store deler er mest effektivt å transportere med hensyn på pris, uten at det går på bekostning av sirkulær materialutnyttelse?». Problemstillingen besvares ved å gjøre en vurdering av forskjellen på

pris for ulike lengder på glassfiber materialet. Målet med oppgaven er å finne en effektiv størrelse på deler av vindturbinblader som fraktes til gjenvinning, med hensyn på transport. Resultatmålene blir dermed en beregningsmetode og et transportforslag som bidrar til en mer sirkulær økonomi, uten at det koster mer enn nødvendig. Effektmålet er bærekraftig utnyttelse av brukte vindmølleblader og transportressurser.

I første del av oppgaven identifiseres noen relevante eksempelprodukter og leverandører som kan bruke gjenvunnet glassfiber, i stedet for nyprodusert. Disse eksempelproduktene representerer mulige marked for resirkulert glassfiber. Eksempelproduktene vil da representere flere mulige produkter med felles eller lignende krav til glassfibrene. Siden styrken til materialet er avhengig av lengden på glassfibrene og måten de settes sammen (Gagani et al, 2021, s. 23), er fiberlengde et egnet mål på kvaliteten til glassfibrene. Derfor velges eksempelproduktene slik at de representerer glassfibre av forskjellig lengde. Det antas at lengre glassfiber har en høyere verdi og kan selges dyrere.

Andre del består av beregninger for kostnader ved transport av komposittdelene og fortjensten som kan forventes ved videre salg. Beregningene gjøres ut ifra tre scenarier: enten finfordelt materiale (<10cm), større deler (1,2m og 5m) og hele vindturbinblad (115m). Transportkostnadene antas være høyere hvis man transporterer større deler sammenlignet med finfordelt material, dersom de ikke kan pakkes på en god måte. Det kreves flere turer for å transportere samme mengde materiale da store deler ikke kan pakkes like tett som finfordelt materiale. Lastebilene vil dermed transportere en større andel luft, noe som ikke er gunstig. Siden vindturbinblad er bygget for å være lette (J. Paus, personlig kommunikasjon, 21. mai 2024), antas den begrensende faktoren for hvor mye som kan transporteres per enhet være volumet, ikke vekten.

I beregningen av kostnadene ved transport av hele vindturbinblader, antas det at de kan kuttes senere. Dette gjør verdikjeden mer fleksibel. Samtidig medfører transport av hele vindturbinblad store utfordringer knyttet til logistikk. Carpenter et al (2022, s. 4-5) poengterer at transport av hele vindturbinblad er vanskeligere fordi det krever spesialutstyr og stenging av veien mens materialet transporteres. Dessuten kreves spesialtillatelse for å bruke kjøretøy av den nødvendige størrelsen for å transportere vindturbinblad.

Basert på disse antakelsene og begrensningene, beregnes den ideelle størrelsen på deler som kan transporteres mest mulig kostnadseffektivt. Utgangspunktet for beregningene er avstanden fra havnen til gjenvinningen og hvor mye som får plass på en lastebil.

1.2. Begrensninger

Noen begrensninger for oppgaven er beskrevet tidligere i teksten, som hvilken del av transporten som vurderes. I tillegg vurderer oppgaven kun prisforskjellen mellom forskjellige scenarier. Dermed blir ikke deler av verdikjeden som er lik for alle eksempelprodukter tatt med i beregningene. Noen kostnader som tas ut er kutting av vindturbinbladene (se Birkved et al, 2023, s. 3) og selve gjenvinningen. Siden turbinbladene kun ligger på lager når de kommer til havnen eller når de skal gjenvinnes, havner dette utenfor delen som behandles i denne oppgaven. I tillegg brukes noen hele vindturbinblader til utskifting i andre vindparker eller i et annet prosjekt som gjenbraker vindturbinbladene uten å først ta ut glassfibrene (se Re-Wind, u.å.). Disse blir tatt hensyn til gjennom å anta at en prosentandel av vindturbinbladene ikke resirkuleres som glassfiber.

Oppgaven tar ikke heller hensyn til eventuelle utskiftninger av vindturbinblader for vedlikehold mens vindparken er i drift. I stedet fokuserer oppgaven på avvikling av vindparken, selv om enkelte vindturbinblader kan byttes ut tidligere også. I utgangspunktet kan disse behandles på samme måte. Johnsson og Savvidou (2023, s.477) poengterer at før 2050 vil hovedgrunnen til å installere nye vindturbiner være utskifting av vindturbiner, noe som gjør dette til en relevant problemstilling. Derimot vil det bli en for stor oppgave hvis det skal tas hensyn til her.

2. Teori

Denne delen av oppgaven beskriver utgangspunktet for valgene som tas i modellen og informasjonen som brukes i diskusjonsdelen. Kapitlet starter med en kort beskrivelse av sirkulærøkonomi, reverse logistics og hvordan materialet håndteres i dag. Deretter introduseres materialene i vindturbinbladene og metoden for gjenvinning som denne oppgaven tar utgangspunkt i. Målet er å poengtere at disse materialene kan gjenvinnes med samme prosess og gjenvinning av glassfiber går ikke på bekostning av gjenvinning av andre materialer. Deretter presenteres transportmåten og formlene som brukes i modellen.

2.1. Sirkulærøkonomi

Sirkulærøkonomi går ut på å bruke materiale fra gamle produkter i et nytt kretsløp og ny produksjon, i stedet for å utvinne og produsere nye råmaterialer. Målet er å bruke et produkt, eller materialer fra et produkt, så lenge som mulig. Når det ikke kan brukes lengre skal materialet gjenvinnes. Ideelt sett skal ingenting ende opp på deponi og det skal ikke tas ut nye råvarer.

I dag er det vanlig å tenke at varer brukes en gang og så kastes, men i sirkulærøkonomi skal materialene i stedet brukes videre. Varer og produkter skal, i en sirkulærøkonomi, produseres for å være enkle å reparere og gjenvinne (Bakshi, 2019, s. 396-398). Det skal også være mulig å ta ut komponenter som kan brukes igjen, selv om det helhetlige produktet er for skadet for å repareres. I tilfeller der en vare ikke kan gjenvinnes skal den kunne brytes ned i naturen og være produsert av fornybart materiale (Karavida og Peponi, 2023, s. 5). Et alternativ for at dette skal være gjennomførbart er at kunden leier varen, i stedet for å kjøpe den. Kunden er dermed ansvarlig for å levere den tilbake, og de som leier ut har et insentiv til å reparere varen så lenge det er mulig. For å bidra til denne utviklingen begynner noen bedrifter å heller si «bruker» i stedet for «kunde» (Karavida og Peponi, 2023, s. 5). Dette er et eksempel på at menneskenes holdning også er viktig for å oppnå sirkulærøkonomi. En interessert leser kan se Carpenter et al (2022) for informasjon om hvordan eiere av vindparker forholder seg til gjenvinning.

Det finnes flere modeller som skal illustrere sirkulærøkonomi. Det vanligste er å visualisere det som en sirkel med piler som viser materialstrømmene, som vist i figur 4 nedenfor. Det finns også flere måter å nå dette målet, og et av dem (9R) er vist i figur 5 nedenfor (Hekkert et al, 2017, s. 223-224).

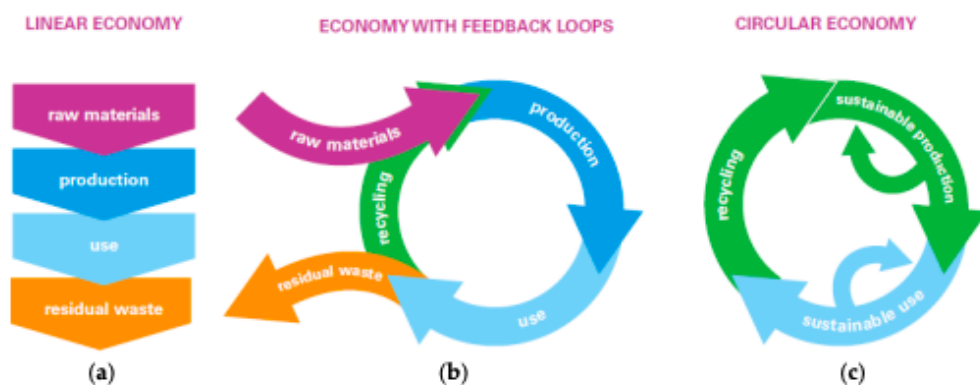


Figure 4: Visualisering av lineær og sirkulær økonomi (Buren et al, 2016, s. 4)

		Strategies	
		Strategy	Description
Circular economy ↑ Increasing circularity ↓ Linear economy	Smarter product use and manufacture	R0 Refuse	Make product redundant by abandoning its function or by offering the same function with a radically different product
		R1 Rethink	Make product use more intensive (e.g. by sharing product)
		R2 Reduce	Increase efficiency in product manufacture or use by consuming fewer natural resources and materials
	Extend lifespan of product and its parts	R3 Reuse	Reuse by another consumer of discarded product which is still in good condition and fulfils its original function
		R4 Repair	Repair and maintenance of defective product so it can be used with its original function
		R5 Refurbish	Restore an old product and bring it up to date
		R6 Remanufacture	Use parts of discarded product in a new product with the same function
		R7 Repurpose	Use discarded product or its parts in a new product with a different function
	Useful application of materials	R8 Recycle	Process materials to obtain the same (high grade) or lower (low grade) quality
R9 Recover		Incineration of material with energy recovery	

Figure 5: Oversikt over tiltak for å fremme sirkulær økonomi i følge 9R rammeverket (Hekkert et al, 2017, s. 223-224)

Arbeidet for å oppnå sirkulærøkonomi må inkludere verdikjeder. Dette omtales i så fall som sirkulære verdikjeder, der man gjennom hele verdikjeden tar hensyn til at produktet skal brukes lengst mulig og deretter gjenvinns. Hovedpoenget er å inkludere prinsippene for sirkulærøkonomi i styringen av verdikjeden (Cui et al, 2024, s. 61-62).

Abdulkadir et al (2023, s. 12-14) skriver i sin rapport om hvordan verdikjeder kan bidra til sirkulær økonomi. De trekker fram tillit og samarbeid, og at verdikjedene må være

utformet mer som et nettverk. Både informasjon, varer og penger må deles mellom bedriftene og verdiene må kunne spores. Dette krever at verdikjedene bygges opp slik at sluttkunden også anses som en leverandør av råvarer til nye sirkulære verdikjeder.

Det begynner å bli vanligere å ta hensyn til at produkter skal kunne resirkuleres effektivt både i produksjonen generelt (Karavida og Peponi, 2023, s. 5) og produksjon av vindturbinblader spesifikt. Primært sett skal vindturbinbladene kunne brukes lengst mulig, noe som kan gjøres med å forbedre materialene, redusere belastning og reparere vindturbinbladene hvis de blir skadet. Det jobbes også med å bedre forstå hva som sliter mest på vindturbinbladene, for å mer effektivt kunne hindre at de blir ødelagt (Mishnaevsky, 2021, s. 3-4).

Ved avvikling av vindparken er tanken at vindturbinbladene ideelt sett skal upcykles, altså at kompositten skal få samme eller større verdi enn det tidligere produktet hadde. Alternativt kan de downcykles. Dette er når enten de nye produktene får lavere verdi, det blir rester som ikke kan brukes videre eller prosessen fører til miljøproblem (Karavida og Peponi, 2023, s. 5-6; Chen et al, 2024b, s. 5).

2.2. Reverse logistics

All håndtering av EoL-material, enten det skal gjenbrukes, gjenvinnes eller behandles som avfall, betegnes som reverse logistics. Konseptet kommer fra en endring i lover som gir bedriften ansvaret for hvordan deres produkt håndteres ved EoL (Mallick et al, 2024, s. 1).

Målet i reverse logistics er å få ut verdien i EoL-materialet. Det første som gjøres er å sortere ut deler som fortsatt har verdi og derfor ikke skal kategoriseres som avfall. Disse delene blir deretter sortert igjen, ut ifra materialets verdi. Dette avgjør hvordan materialet behandles videre for å få ut denne verdien på best mulig måte (Helo og Mayanti, 2024, s. 60).

Denne oppgaven handler om hvordan kompositt fra vindturbinblader kan gjenvinnes. I utgangspunktet sorteres turbinblader ut dersom hele turbinbladet kan brukes i en ny vindpark. Materialet i vindturbinblader som ikke kan selges videre som de er, anses som avfall og havner på deponi.

I følge Mishnaevsky (2021, s. 7) blir 20% av vindturbinbladene i Nederland pusset opp og solgt videre. Disse vindturbinbladene er dermed ikke bandt vindturbinbladene som

behandles i denne oppgaven. I tillegg til dette kan noen vindturbinblad oppgraderes og brukes til andre strukturer. Et eksempel på andre strukturer laget av vindturbinblad er en lekeplass, vist i figur 6.



Figure 6: Eksempel på vindpark laget av gjenbrukte vindturbinblad (Windmills tech, 2024)

2.3. Dagens løsning

Det finnes flere alternativer til hvordan kompositt fra vindturbinblader kan brukes videre, men få av dem brukes i stor skala i dag. Denne delen av oppgaven presenterer først hvilke alternativ for gjenvinning som finnes eller antas komme, og deretter hvordan operasjonene rundt dette ser ut. Bare gjenvinning av vindturbinbladene presenteres her da resten av vindturbinen til stor grad kan gjenvinnes (Bettini og Spini, 2024, s. 1) og ikke er en del av denne oppgaven.

2.3.1. Alternativer for materialet

Den vanligste måten å håndtere komposittmateriale fra vindkraft har til nå vært deponering. Deponering vil ikke være et alternativ i framtiden, fordi dette tar store landområder og kan forurense grunnvannet og miljøet rundt (Abdelnaby et al, 2024, s. 522).

I noen tilfeller brukes komposittavfall fra vindturbinblader til grønn sement (Karavida og Peponi 2023, s. 3-4) eller i asfalt (Gagani et al, 2021, s. 8). Dette er en mer sirkulær løsning enn deponering, men det har vist seg å ikke være holdbart på grunn av stort tap av materiale (Eberle et al, 2022, s. 8). Likevel er det en mer realistisk løsning enn flere andre, da dette er mer kostnadseffektivt. Det er også en av tre løsninger som Birkved et al (2023, s. 2) anser skalerbar og godt nok utviklet for å vurderes som en løsning.

Alternativt kan materialet gjenvinnes ved pyrolyse. Man får da tilbake fiber som kan brukes i nye materialer. Bindemidlet brytes ned til en olje, som kan brukes for å produsere elektrisitet, bevare varme eller som råvare i kjemisk industri (Karavida og Peponi 2023, s. 3). Dette er ifølge Birkved et al (2023, s. 2) også en av tre teknologier som anses skalerbar og godt nok utviklet for å vurderes som realistisk. Den siste er mekanisk resirkulering, som går ut på å bruke finfordelt materiale i nye produkter. Pyrolyse beskrives nærmere i del 2.4.

Et annet alternativ er solvolyse, der man gjenvinner hele fibre ved hjelp av et løsemiddel. Denne metoden krever store mengder løsemiddel, som kan utgjøre en helseisiko (Karavida og Peponi 2023, s. 3). Dermed er denne løsningen vanskelig å gjennomføre i praksis. Diez-Canamero og Mendoza (2023, s. 104) har i sin studie konkludert at dette er den mest sirkulære løsningen og at den har lavest karbonfotavtrykk. Hovedproblemet med solvolyse er at løsemidlene kan være skadelige for miljøet (Gagani et al, 2021, s. 17).

Det har også blitt foreslått å bruke kompositt fra vindturbinblader til isolering og støydemping, men dette gjøres sjeldent i dag. I tillegg fins det flere forslag til alternative løsninger som sannsynligvis ikke er kommersielt realistiske i en nær framtid (Karavida og Peponi 2023, s. 4).

2.3.2. Transport og verdikjede

Avhengig av hvordan materialet gjenvinnes, ser verdikjeden litt forskjellig ut. Lund og Madsen (2024, s. 7-8) har laget en oversikt over deler av verdikjeden som er lik eller ulik for forskjellig måter å gjenvinne kompositt. Oversikten er vist i figur 7. Denne oppgaven fokuserer mest på termisk gjenvinning i form av pyrolyse, men behandler også mekanisk gjenvinning. Dette er henholdsvis de blå og grønne pilene på bildet.

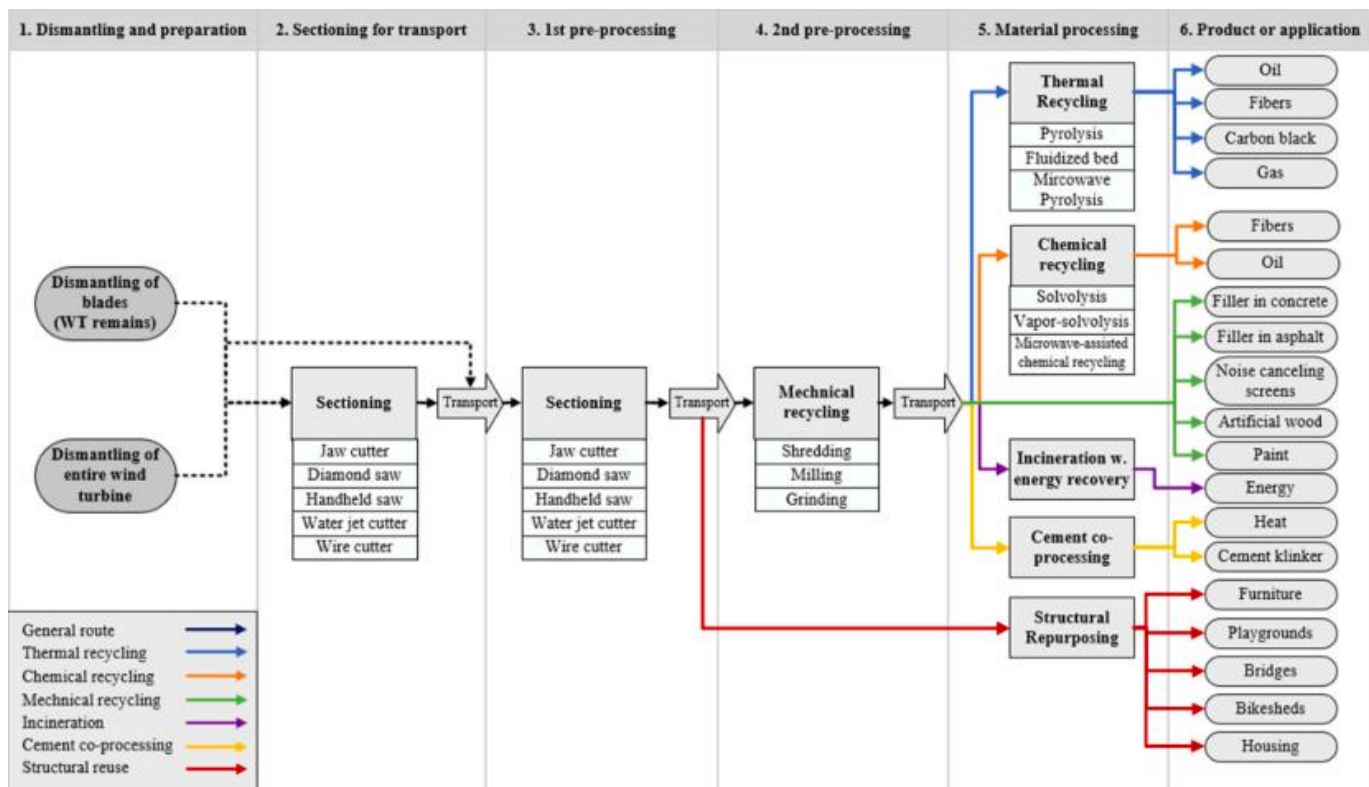


Figure 7: Lund og Madsens (2024, s.8) oversikt over verdikjeden for ulike gjenvinningsmetoder

Dagens metoder for materialhåndtering og transport ved avvikling av vindparker er beskrevet av Gauderis og Severijns. Når en vindpark tas ut av drift blir komponentene, ifølge forfatterne, typisk delt opp på stedet, før transport. Metaller, som kan selges videre til gjenbruk eller omsmelting, selges, mens turbinbladene må deles i små nok deler til å transportere med konvensjonell transport. Dette materialet blir ofte sendt til deponi, eller i noen tilfeller kuttet (delt opp i biter på opp til 10cm) og gjenvunnet. Siden både lagring av turbinblader, kraner og annet utstyr for å håndtere denne typen materiale er dyrt, unngår man å legge bladene på lager. Dette krever i så fall at materialet flyttes mellom lastebil og lageret (Gauderis og Severijns, 2022, s. 9, 11). Figur 8 viser en generell oversikt over hvordan EoL-materiale håndteres dersom det skal gjenvinnes, og figur 9 viser verdikjeden for Baltyk spesifikt.

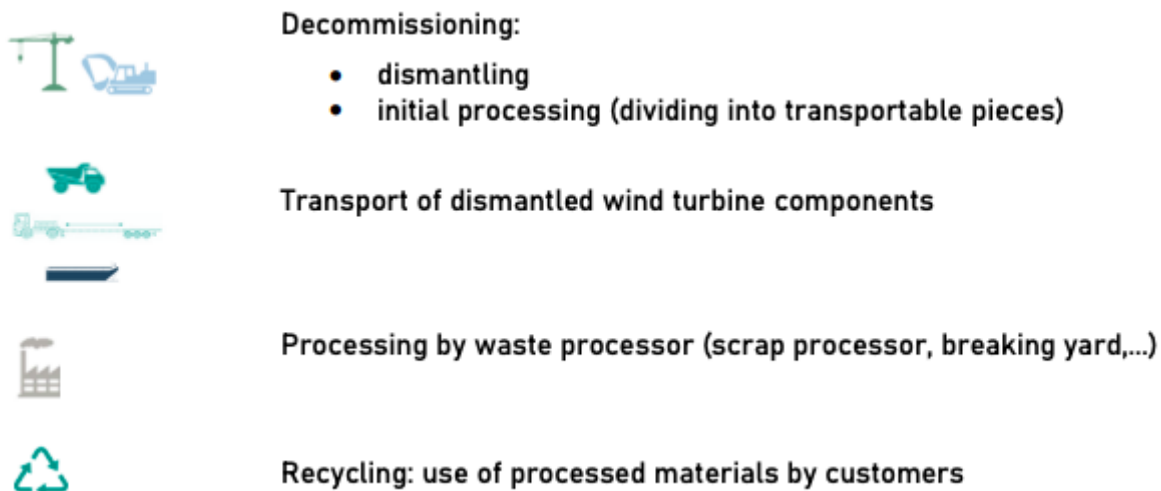


Figure 8: Generell oversikt over verdikjeden for EoL-materiale fra en vindpark (Gauderis og Severijns 2022, s. 9)

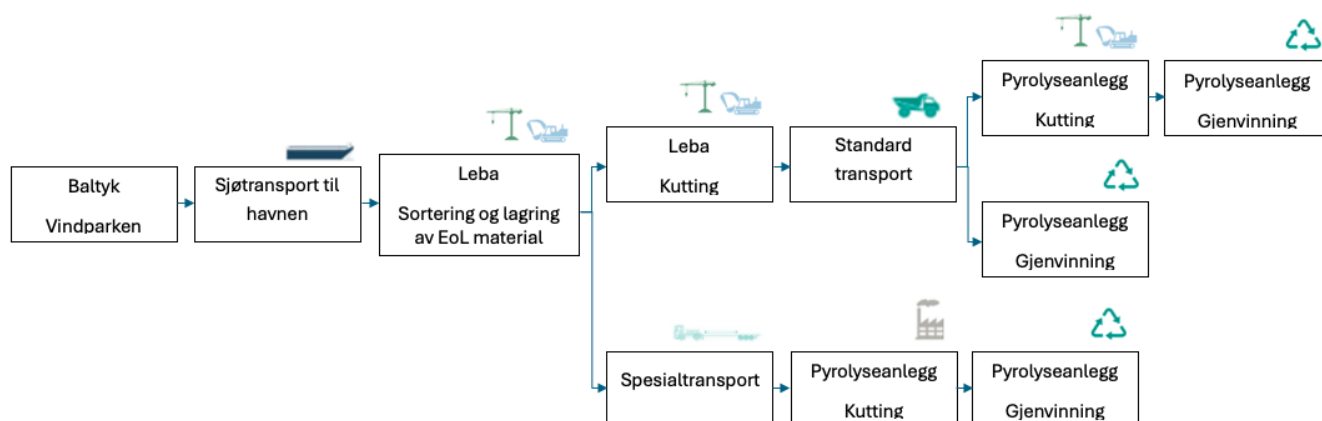


Figure 9: Detaljert oversikt over alternativene til verdikjeden for kompositt fra vindturbinblad fra Baltyk

Det er i dag vanlig at avvikling, transport og salg av EoL-materialet utføres av samme selskap. Avhengig av hvilket selskap som avvikler vindparken gjøres det på forskjellig måte, da det ikke finnes en standard for beste metode som gjelder for alle vindparker. Metoden varierer også basert på den spesifikke vindparken som avvikles. Det er fortsatt veldig lite erfaring innenfor området og det finnes bare omtrent 6 selskaper som driver med dette i Europa i dag. Fra et kostnadsperspektiv foretrekkes sjøtransport over landtransport og ved landtransport foretrekkes standardtransportmiddel over spesialtransport. Uansett hvilken metode som brukes, er avvikling av vindparker kostbart. I beste fall dekker fortjenesten ved salg av materialet kostnadene for avviklingen (Gauderis og Severijns, 2022, s. 11-12, 21, 27-28).

2.4. Material

Fokuset i denne oppgaven er på glassfiber, men et vindturbinblad består av flere materialer som må skilles fra glassfibrene før de kan selges, helst uten å ta for stor skade av prosessen. Figur 10 viser sammensetningen av materialer i et vindturbinblad. Bladene som brukes i Baltyk er laget av E-glassfiberforsterket epoksy, med kjernemateriale av balsa og PET. Disse materialene beskrives nærmere nedenfor. Målet med dette er å vise at resten av materialet i vindturbinbladene også behandles, selv om de ikke behandles i denne oppgaven. Festet til vindturbinen er forsterket av karbon (Bauer og Matysik, 2024). Dette settes sammen ved en prosess som kalles pultrudering, som er beskrevet av Baran (2014), men ikke dekkes i denne oppgaven.

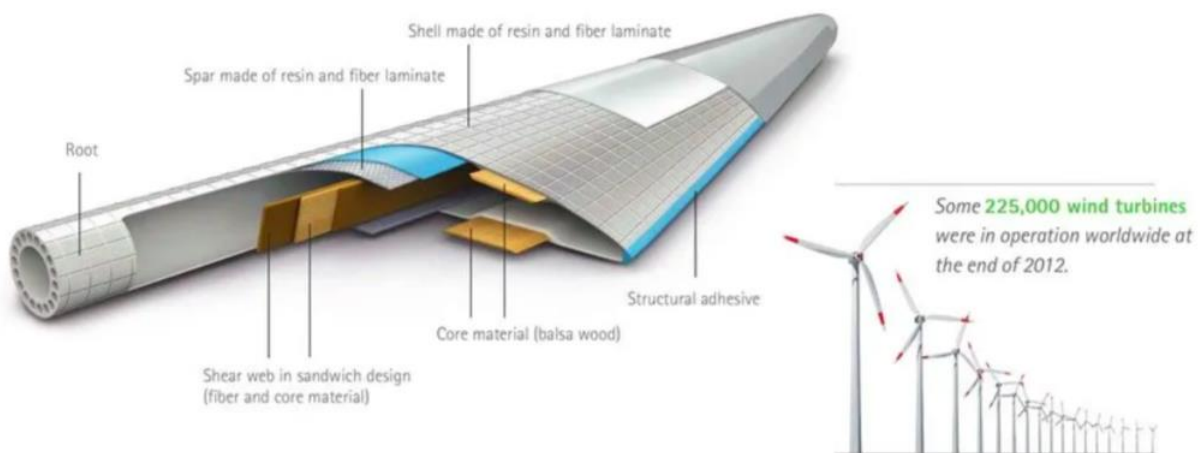


Figure 10: Illustrasjon av oppbygningen til et vindturbinblad (Market Data Library, 2023)

2.4.1. Glassfiber

Glassfiber er det vanligste materialet å bruke for å forsterke vindturbinblader. Alternativet er karbonfiber, som er dyrere (Eimontas et al, 2024, s. 2). I 2020 sto glassfiberforsterket kompositt for over 90% av markedet (Gagani et al, 2021, s. 12). Dette kommer av at det er et billig materiale. For å kunne konkurrere med nyprodusert glassfiber må derfor gjenvunnet glassfiber også være billig (Gagani et al, 2021, s. 25).

Gagani et al (2021, s. 12) estimerer prisen for glassfiber til mellom 1 og 26\$/kg, avhengig av hvilken type glassfiber det er. De fleste typene koster mellom 1 og 3\$/kg, mens S/S-2-glass og R-glass koster mellom 16 og 26\$/kg. Disse typene glassfiber er sterkere enn de

andre. Dermed må gjenvunnet glassfiber selges til en sammenlignbar pris for å være relevant for kundene.

2.4.2. Epoksy

Epoksy er en type kjemisk forbindelse som er veldig reaktiv. I tillegg til kompositt, brukes epoksy for eksempel i plast, lim og lakk (Glass Forum, 2024). Det brukes ofte i vindturbinblader fordi det tåler mye. Styrken kommer fra strukturen i materialet, og dette gjør det også umulig å resirkulere gjennom smelting. Det kan resirkuleres med pyrolyse, men mister da mye av verdien (Pu et al, 2024, s. 1-2). Det fins flere typer epoksy, men det som brukes mest i vindturbinblader er en type som reagerer sakte (Hu et al, 2024, s. 2).

2.4.3. Andre materialer

Vindturbinbladene består også av Balsa og PET. Balsa er treslag som en interessert leser kan finne mer om i Duan et al (2024). Materialet er lett og billig i forhold til andre sterkere materialer og brukes derfor i turbinblader (Carron et al, 2023, s. 72-73).

Polyetylentereftalat, PET en polyester, og en av de mest brukte typene plast, som brukes i flasker, forpakninger og tekstiler. Begge materialene kan brytes ned med pyrolyse (Chen et al, 2024b, s. 5-6; Eimontas et al, 2024, s. 1).

2.5. Pyrolyse

Enevoldsen og Paulsen (2021, s. 7) har identifisert pyrolyse som den mest realistiske løsningen for å håndtere kompositt fra vindturbinblad på en god måte. Figur 11 under viser hvordan de vurderer pyrolyse sammenlignet med andre løsninger.

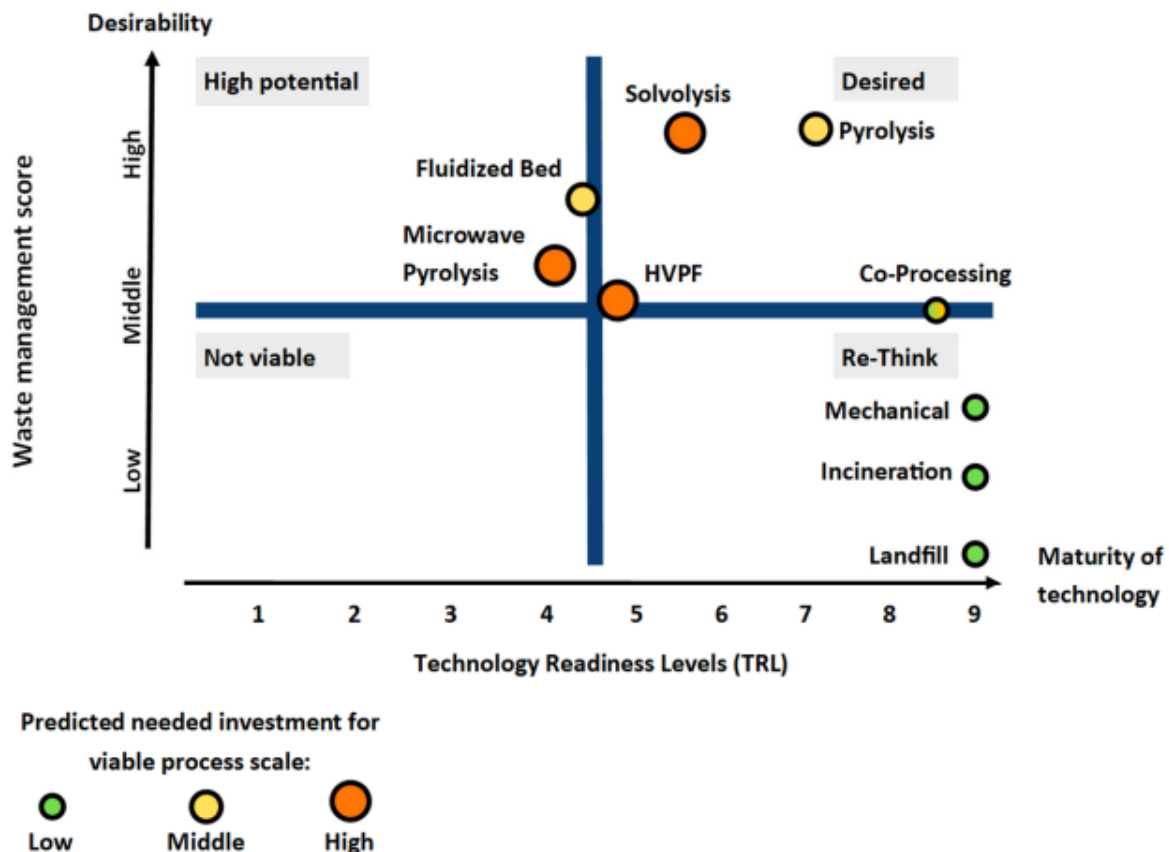


Figure 11: Enevoldsen og Paulsens (2021, s. 7) oversikt over realistiske og ønskelige gjenvinningsmetoder

Pyrolyse går ut på å ta ut fibre fra vindturbinbladene med å først kutte dem til en hensiktsmessig størrelse, og etterpå varmebehandle materialet. Dette gjøres typisk ved en temperatur på 450-700°C (Karavida og Peponi 2023, s. 3), uten at oksygen kommer i kontakt med materialet under prosessen (Cherrington et al, 2012, s. 15). Muligheten til å bruke pyrolyse ved forskjellige temperaturer er en fordel når produktet inneholder flere typer plast (Chen et al, 2024b, s. 24), som det gjør i dette tilfellet. Ved denne metoden gjøres platen om til gass, mens fibre ligger igjen og kan hentes etterpå (Cherrington et al, 2012, s. 15). Med pyrolyse får man også ut biprodukter som kan brukes som drivstoff og olje (Gagani, 2021, s. 17).

Chen et al (2024a, s. 7) konkluderte at for vindturbinblad med glassfiber er pyrolyse mest effektivt ved en temperatur på 500°C og pyrolysetid på 20 min og at strukturen i glassfibrene ikke tar skade av det. Gagani et al (2021, s. 16) skriver i sin artikkel at det optimale er 450°C i to timer. Uansett krever pyrolyse høye temperaturer og krever dermed mye energi, noe som gjør prosessen dyr. Den har ikke blitt testet i stor skala enda (Birkved et

al, 2023, s. 4), men denne oppgaven antar at det kan skaleres opp for å håndtere kompositt fra vindturbinblader når en vindpark avvikles.

Cousins et al (2018, s. 3) poengterer at denne metoden kan gjøre det vanskelig å bruke gjenvunnet materiale i nye produkter, da det mister mekaniske egenskaper ved temperaturer over 450°C. Derimot har en nyere studie av Eimontas et al (2024, s. 12) vist at gjenvunnet materiale kan sammenlignes med nyprodusert materiale. Ut ifra at forskjellige studier viser forskjellige ideelle temperaturer, forteller om forskjellige sluttprodukter og er uenige i kvaliteten på materialet etterpå, ser det ut som at prosessen kan brukes for å gjenvinne forskjellige materialer i vindturbinbladet, men på bekostning av de andre materialene.

Noe annet som må tas hensyn til ved pyrolyse er at prosessen produserer gasser som CO og CO₂, som er skadelig for miljøet (Gagani et al, 2021, s. 17).

2.6. Transport

Transportkostnaden er avhengig av avstand og transportmåte. Avstanden er i dette tilfellet den totale kjøreavstanden for å transportere alt materiale, som er avhengig av hvor mye som får plass per transport. Denne delen starter derfor med å bestemme hvilke produkter modellen skal ta utgangspunkt i, og finne den nødvendige lengden på glassfiber for disse produktene. Målet er å få et utgangspunkt for hvor store deler av materialet som skal transporteres mellom havnen og gjenvinningsanlegget. Deretter bestemmes avstanden som materialet skal transporteres ved å finne et pyrolyseanlegg som antas kunne skaleres opp. Til slutt beskrives transportmidlene som brukes og hvor dyrt dette vil være.

Kostnadene derom det ikke settes begrensninger på å unngå materialsvinn beregnes også. Da antas lengden på glassfibrene være samme som lengden på lastbæreren.

2.6.1. Eksempelprodukter

For å være sikker på at lengden på glassfibrene er relevante å se på, tar denne oppgaven utgangspunkt i tre produkter som potensielt kan produseres av resirkulert glassfiber. Er glassfibrene lange nok, kan de også brukes i et mindre produkt, men det er ikke mulig å bruke korte glassfiber i større produkt. Dette kommer av at glassfibrene mister styrke dersom de kuttet og produktet de brukes i kan stille krav til styrken. Det er ikke heller

ønskelig å bruke lange glassfiber i et mindre produkt enn de er kuttet for, da dette fører til svinn. Denne delen av oppgaven ser derfor på hvor lange glassfibrene minst må være for å kunne brukes i enten fliser, fibertapet, skateboard eller havkajakk. Det er verdt å merke igjen at eksempelproduktene representerer flere produkter med lignende krav til styrke, og brukes som et utgangspunkt for beregningene.

Eksempelproduktene er valgt basert på at de allerede produseres av glassfiber og det finnes enkle mål på hvor lange glassfiber som brukes i produksjonen. Dette forventes ikke å endres i nærmeste framtid. I tillegg krever eksempelproduktene glassfiber i forskjellig lengde.

Fliser og fibertapet

Et produkt som allerede lages av gjenvunnet glassfiber er fliser (continuum, 2024). De bruker kuttet glassfiber som typisk er kortere enn 10 cm (J. Paus, personlig kommunikasjon, 21. mai 2024). I sin prosess bruker de kuttet vindturbinblad som ikke er pyrolysert (mekanisk gjenvinning). Continuum (2024) markedsfører seg som en grønn bedrift som bidrar til en sirkulær økonomi med å produsere holdbare fliser av gjenvunnet kompositt.

Et lignende produkt er fibertapet som brukes for å hindre at det oppstår sprekker i vegger (Xingying, 2024). For dette produktet trengs rene glassfiber, men det kan også lages av kortere glassfiber enn 10 cm. Kuttet glassfiber antas bli gitt bort gratis da dette er tilfellet i dag (J. Paus, personlig kommunikasjon, 21. mai 2024).

Skateboard

Cousins et al (2018, s. 2, 5, 8, 13) har studert metoder for å gjenvinne vindturbinblad og brukte i sin studie et skateboard som eksempelprodukt. De bekrefter dermed at det er mulig å bruke gjenvunnet glassfiber til dette produktet. Studien bruker termoforming for å lage skateboardet og forsterker det med en tynn plate av kompositt. BakyardEngineering (2016) viser en video av hvordan et skateboard kan lages av glassfiber.

Et typisk skateboard er 90 til 120 cm langt (Jørgensen, 2023). Denne oppgaven vil ta utgangspunkt i at et skateboard er 120 cm langt.

Havkajakk

Det største eksempelproduktet i denne oppgaven er en havkajak på 5 meter. Det finnes også større kajaker, men kajaker generelt er ikke nødvendigvis laget av glassfiber. Havkajakker lages av glassfiberkompositt og egner seg dermed godt som eksempelprodukt (Askjem, 2023). Lincoln Canoe & Kayak (2017) viser i sin video hvordan en kajak kan lages av glassfiber.

2.6.2. Transportmåte og kostnad

Før man kan regne på transportkostnadene må man avgjøre hvilken transportmåte som er mest hensiktsmessig og om dette er hensiktsmessig for vindparkoperatøren å gjøre selv, eller om det er bedre å sette bort transporten. Bø og Grønland (2014, s. 129) lister opp 6 grunner til å velge å sette bort transporten til eksterne aktører. Hovedsakelig handler det om å bruke ressursene mest mulig effektivt og å fokusere på bedriftens kjernekompetanse. Alternativt er det fordi bedriften vil unngå å binde opp kapital i kjøretøyer og sjåførere. Siden Equinor primært sett ikke driver med transport, og transporten bare er nødvendig over en kortere tidsperiode antar denne oppgaven at transporten settes bort til en ekstern transportør. Transportkostnadene handler dermed om prisen for å kjøpe transporttjenesten, der prisen for transportmidlet, lønnskostnader og lignende er inkludert.

Lastebil

Den vanligste måten å transportere deler av vindturbinblader og gods generelt er på lastebil (J. Paus, personlig kommunikasjon, 21. mai 2024). Hovedfordelen med dette er at lastebilen er fleksibel og kan transportere varen helt fram til kunden, eller i dette tilfellet gjenvinningsanlegget. De fleste bedrifter leier transporttjenesten av et firma som jobber spesifikt med dette fordi de kan ofte utnytte kapasiteten bedre (Bø et al, 2018, s. 169). I følge Grønland (2022, s. 9) koster transporten 9,1 kr/km. Dette tallet blir brukt i modellen da det er vanskelig å få tak i eksakte tall.

Spesialtransport

Spesialtransport brukes dersom man ønsker å transportere noe som ikke er egnet for standardtransport. Det kan være noe flytende, farlig gods eller fordi godset er større deler enn som får plass på et standardtransportmiddel. For vindturbinblad estimeres kostnadene for dette å være mellom 30 000\$ og 40 000\$ per turbin ved relativt korte avstander (Utility

Dive, 2022). I norske kroner blir det 327 300nok til 436400nok. Kostnadene kommer primært fra logistiske løsninger relatert til vindturbinbladenes størrelse (Utility Dive, 2022).

Transport av hele vindturbinblader kan for eksempel kun skje på en relativt rett vei, noe som kan bety at nye veier må bygges ut ved etablering av nye vindparker. Dette vurderes som verdt kostnadene ved utbygging av en ny vindpark, men ikke når vindparken tas ned. I tillegg må veien stenges for å kunne transportere vindturbinblad, noe som betyr at de ikke kan transporteres gjennom en større by (J. Paus, personlig kommunikasjon, 21. mai 2024).

2.6.3. Lastbærer

Lastbærer er beholderen til varene når de transporteres eller flyttes mellom ulike typer transport. For små varer er det vanlig å bruke paller, mens for større varer er det vanlig å bruke containere (Bø og Grønland, 2014, s. 22-23).

De første containerne kom fra USA og dermed brukes fot som måleenhet for å bestemme størrelsen på en container. En standardcontainer har en høyde på 8 fot, bredde på 8 fot og lengde på 10, 20, 30 eller 40 fot. Det er vanlig å kalle en 20 fots container en TEU, som er en forkortelse for «twenty-foot equivalent unit». TEU brukes da som enheten for størrelsen på en container. En 10 fot lang container blir da $\frac{1}{2}$ TEU, 30 fot blir 1,5 TEU og 40 fot blir 2 TEU. Ved transport innenfor samme land kan også andre standarder brukes (Bø og Grønland, 2014, s. 49).

2.6.4. Effektivt design

For å spare penger ved lager og transport er det ønskelig å produsere deler som kan pakkes mest mulig kompakt. Dette gjelder spesielt i tilfeller der den begrensende faktoren er volum, ikke tyngde. På denne måten blir det enklere å transportere varene i bulk, som ofte er billigere enn å transportere dem stykkevis (Kaminsky et al, 2022, s. 268-269). For vindturbinbladene betyr dette at den mest kostnadseffektive størrelsen på delene er å tilpasse dem til lastbæreren. Grunnen til at andre størrelsen også undersøkes i denne oppgaven er at det fører til svinn av material.

2.6.5. Forsinke valg

Dersom det er mulig, er det en fordel å differensiere mellom ulike sluttprodukter senest mulig i prosessen. Dette gjør det mulig å tilpasse seg etterspørselen i markedet i større grad. En vanlig måte å løse dette er å ha et standardprodukt med muligheten til å legge til flere elementer dersom kunden ønsker det (Kaminsky et al, 2022, s. 273). Siden produktet i dette tilfellet i stedet kuttes til varierte lengder, kan man få en lignende effekt av å ha lengde glassfiber på lager, som kan kuttes dersom kunden ønsker kortere.

2.7. Beregningsmodell

Denne delen av oppgaven beskriver formlene som brukes i modellen. Modellen er tredelt og beregner først størrelsen på deler som skal transporteres for å få størrelsen på glassfibre som kreves for et gitt produkt. Deretter regner beregnes 1) transportkostnadene og 2) potensiell fortjeneste. Disse tallene settes til slutt sammen for å vurdere om den potensielle fortjenesten veier opp for kostnadene ved transporten. Der litteraturreferanser mangler for formlene er disse satt opp basert på grunnleggende volumberegninger.

2.7.1. Transportkostnader

For å beregne transportkostnadene tar modellen utgangspunkt i den nødvendige størrelsen på delene som transporteres og størrelsen på en container. Ut ifra dette beregnes antall deler som får plass i en container. Antallet containere som må kjøres er da mengden materiale delt på mengden som får plass i en container. Dette tallet ganget med anstanden fra havnen til gjenvinningsanlegget blir den totale kjøreavstanden. Kjøreavstanden ganget med prisen per km blir den totale prisen for transporten.

Kuttet glassfiber

For kuttet glassfiber antas det at containeren kan fylles helt og mengden materiale per transport blir samme som volumet av en container. For å transportere alt material kreves antallet containere som kan transportere volumet av materialet i et vindturbinblad.

Modellen bruker et enkelt delestykke for å finne antallet kjøreturer. Deretter ganges antallet kjøreturer med avstanden for å finne den totale avstanden for transporten. For beregningene av antall kjøreturer bruker modellen derfor uttrykket:

$$\frac{\text{mengde per transport}}{\text{total mengde EoL materialer}} = \text{antall kjøreturer}$$

$$2 * \text{avstand havn til behandlingssted} * \text{antal kjøreturer} \\ = \text{total avstand transport}$$

Her kommer tallet 2 fra at bilene kjører både fra havnen til pyrolyseanlegget med delene og fra pyrolyseanlegget til havnen for å hente neste lass. Dette tar ikke hensyn til retningsbalanse, altså om transportfirmaet eventuelt kan frakte noe annet i motsatt retning (Bø og grønland, 2014, s.116). Dersom transportselskapet kan fylle bilene begge veier, blir transporten billigere.

Bø og Grønland (2014) presenterer følgende formel for turpris:

$$\text{Turpris} = (\text{faste kostnader pr km} + \text{variable kostnader pr km}) * \text{distanse} \\ + \text{tidsforbruk} * \text{timelønn}$$

Denne oppgaven tar ikke hensyn til timelønn fordi oppgaven antar at transporten settes ut til en ekstern transportør og det er dermed en del av prisen. I tillegg brukes et felles tall for kostnader per km fordi det er vanskelig å få tak i eksakte tall. Dessuten beregnes prisen totalt, ikke per tur. Dermed brukes den totale distansen. Formelen blir da:

$$\text{Turpris} = \text{kostnader per km} * \text{distanse}$$

Skateboard og kajakk

For skateboard og kajakk er lengden på delene bestemt av lengden på sluttproduktet. I dette tilfellet må antallet deler som får plass på en container regnes ut. Dette bestemmes av antallet deler som får plass i lengden, bredden og høyden. Deretter kan samme formler som for kuttet glassfiber brukes. Formlene som er brukt i modellen for deler som er avhengig av produkt er:

$$\frac{\text{plass i lengden på lastbærer}}{\text{lengde på bit}} = \text{antal deler i lengden per container}$$

Tilsvarende formel brukes for bredden og høyden også. Tallene for lengden og høyden er rundet ned fordi dersom det ikke er nok plass, kan ikke flere deler transporteres i den bilen. Bredden er ikke avrundet da det er brukt et gjennomsnittlig tall og dersom lastebilene pakkes effektivt, kan mer enn en gjennomsnittlig del pakkes i lastebilen.

Fordi det ikke er plass for vindmøllebladene i høyden i en container uten å dele dem i minst 3, regnes antallet deler som transporteres ut med formelen:

$$\frac{3 * \text{total lengde vindmølleblad}}{\text{lengde glassfiber per bit}} = \text{antal deler som transporteres}$$

Tallet 3 kommer her fra at vindturbinbladene må deles i tre for å få plass i en container i høyden. Det er dermed tilsvarende tre ganger lengden på vindturbinbladene som skal transporteres totalt.

Antall deler per transport er funnet med:

$$\begin{aligned} \text{antall deler i lengden} * \text{antall deler i bredden} * \text{antall deler i høyden} \\ = \text{antal deler per transport} \end{aligned}$$

Dette ganget med mengden per del, blir mengden materiale som transporteres i hver container. Deretter bestemmes antall transporter på samme måte som for kuttet glassfiber.

$$\text{antal deler per transport} * \text{størrelse per del} = \text{mengde material per transport}$$

Hele vindturbinblad

Hele vindturbinblad bruker den enkleste beregningen, som er:

$$\text{pris per transport} * \text{antal vindmølleblad} = \text{pris transport}$$

2.7.2. Potensiell fortjeneste

Den potensielle fortjenesten er basert på hva kunden er villig til å betale for de forskjellige produktene. Denne oppgaven tar utgangspunkt i tre produkter som kan produseres med kompositt basert på et prinsipp i lean om at kunden bestemmer kvaliteten til produktet. Det går ut på at produsenten først må identifisere kundens behov og deretter finne en måte å møte disse behovene. Hvis produsenten starter med et produkt er det stor risiko for at ingen har behov for det og at produktet dermed ikke blir solgt (Nicholas, 2018, s. 97-99).

For kompositt fra vindturbinblader betyr dette at allerede ved gjenvinningen må sluttproduktet tas hensyn til. Dette er fordi det er stor risiko for at enten en stor andel materiale blir avfall ved produksjon av nye produkter, eller kutting av glassfibrene gjør at materialet ikke kan brukes i større produkter. Igjen er dette vist i figur 12, der den svarte streken viser lengden på kompositt som transporteres, den grønne streken viser lengden som brukes og det røde kappes av og er for kort for å brukes i dette produktet. Å prøve å selge gjenvunnet materiale etter gjenvinning uten å ta hensyn til sluttkunden, blir dermed en lite effektiv måte å bidra til sirkulærøkonomi.



Figure 12: Enkel illustrasjon av at materiale går tapt dersom det kuttes i lite hensiktsmessige lengder. Svart linje viser lengden som brukes for transport, grønn del viser lengden som brukes og rød del viser det som ikke brukes

Dette beregnes med å gange mengden materiale med salgsprisen for materialet. Modellen antar at alt materiale blir solgt og at alle vindturbinblad kuttes selges i samme lengde.

Fortjeneste er beregnet som:

$$\text{Salgspris lignende produkt} * \text{mengde materiale som selges} = \text{fortjenst}$$

Dette beregnes på samme måte uansett produkt og formelen er hentet fra Heggernes et al (2016, s. 279) som skriver at TR (total revenue) er antallet solgte enheter ganget med prisen.

Denne oppgaven antar at alt materiale selges, og antall solgte enheter blir dermed alt materiale.

3. Metode

Denne delen av oppgaven beskriver hvordan informasjonen har blitt hentet inn, mer detaljert om caset og hvordan modellen er satt sammen. Til slutt er det også gjort en sensitivitetsanalyse fordi flere av variablene er til stor grad usikre. Dette gir et innblikk i hvordan endringer i variablene påvirker sluttresultatet.

Siden modellen tar utgangspunkt i et scenario der det prioriteres at alt materiale brukes, ikke å kunne selge til flest mulig kunder, er ingen av scenarioene ideelle i forhold til logistikk. Derfor beregnes også et ideelt scenario med hensyn på logistikken, til sammenligning. Dette scenarioet tar utgangspunkt i at delene kuttet i lengder som stemmer med størrelsen på containeren.

3.1. Litteraturstudie

Litteraturstudien går ut på å samle informasjon om beregningsmodeller, transport og hvordan kvaliteten på materialet påvirkes ved klipping. Litteraturen kommer hovedsakelig fra artikler på google scholar. I tillegg er noen artikler tilsendt av veileder. Informasjon om produkter er primært hentet fra googlesøk og nettsidene til produsenter av relevante produkter. I tillegg brukes pensumbøker fra fag som inngår i logistikkstudiet.

3.2. Case

Som et case tar denne oppgaven utgangspunkt i vindparken Baltyk. Figur 13 viser hvor denne vindparken ligger. Beregningene vil dermed ta utgangspunkt i sammensettingen av materialer i Siemens Gamesa, som er leverandøren til denne vindparken (Equinor, 2022). De tar også utgangspunkt i avstandene mellom havnen Leba og nærmeste sted som kan håndtere kompositt, da Leba blir knutepunktet for alle logistikkaktiviteter relatert til denne vindparken (Equinor, 2021). Oppgaven antar at før Baltyk skal avvikles vil nærmeste pyrolyseanlegg ha skalert opp så de kan håndtere mengden kompositt som kommer fra vindparken, og gjøre pyrolyse av denne typen materiale.



Figure 7: Kart over Bałtyk (Equinor, 2021)

3.2.1. Bałtyk

Bałtyk er tre vindparker til havs (Bałtyk 1, Bałtyk 2, Bałtyk 3), 81 km utenfor kysten til havnen Leba. Vindparkene bygges i samarbeid mellom Equinor og Polenergia. For å gjøre det enklere å gjøre vedlikehold på disse vindparkene, bygger Equinor en drift- og vedlikeholdsbase i Leba. Til sammen vil disse vindparkene dekke et område på omtrent 368,5 km² (Power Technology, 2023) og de har en samlet kapasitet på 1440 MW. En enkelt vindturbin skal normalt produsere 14MW, og har en maks kapasitet på 15MW (Equinor, 2022). For å lese mer om prosjektet se Equinor og Polenergia (2020a) og Equinor og Polenergia (2020b).

Figur 14 viser en graf for mengden materiale som kreves for å lage vindturbinblad til vindturbiner med forskjellig kapasitet (Barlow og Liu, 2016, s. 3). Etter denne grafen kreves 64735,27kg materiale for vindturbinbladene i Bałtyk. Dette tallet kommer fra å sette inn grafen i geogebra og finne skjæringspunktet mellom en kapasitet på 15MW og grafen, som vist i figur 15.

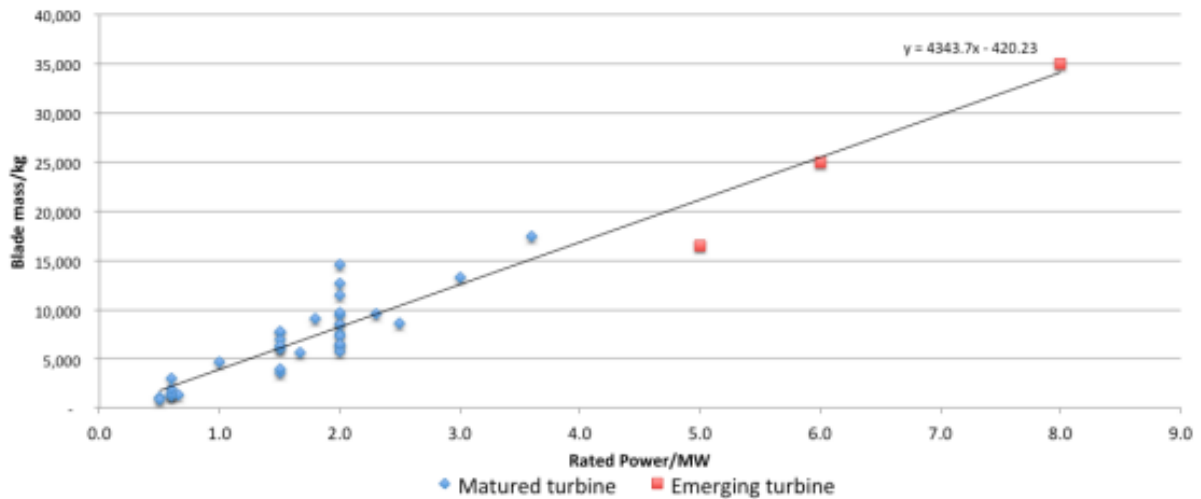


Figure 8: Sammenheng mellom massen til turbinblader og maks kapasitet for en vindturbin (Barlow og Liu, 2016, s. 3)

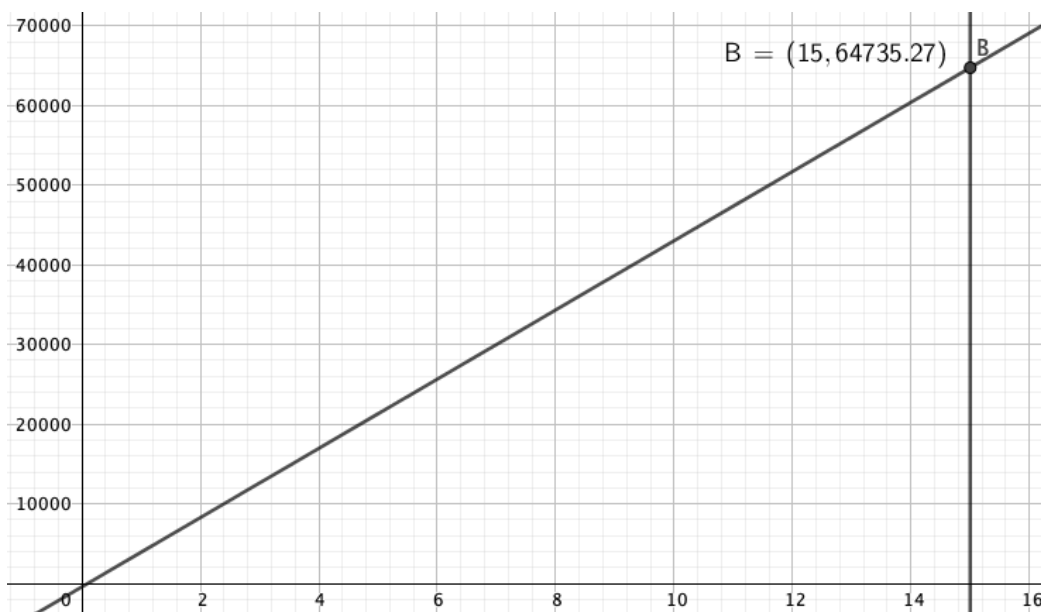


Figure 9: Sammenheng mellom kapasitet per vindturbin og mengden materiale for Baltyk

Turbinene som brukes i denne vindparken er fra Siemens Gamesa, av typen SG 14-236 DD. Disse bladene er 115m lange og vindturbinen dekker dermed et område på 43 500m² (Power Technology, 2023). I denne typen vindturbinblad er 55% av materialet i vindturbinbladene glassfiber (Siemens Gamesa, u.å.).

3.2.2. Gjenvinning

Denne oppgaven antar at nærmeste pyrolyseanlegg kan håndtere kompositten fra Baltyk når vindparken avvikles. Dette pyrolyseanlegget jobber ikke med glassfiber fra vindturbinblad,

men siden det i dag ikke eksisterer pyrolyseanlegg for komposittmateriale fra vindturbiner (Gauderis og Severijns, 2022, s. 23), tar denne oppgaven utgangspunkt i Klean Industries. De bruker pyrolyse for å gjenvinne bildekk (Klean Industries, 2024). For å finne avstanden mellom Leda og pyrolyseanlegget, er google maps brukt. Reisetiden blir da 6,5 timer og korteste vei blir 627 km. Dette er vist i figur 16.

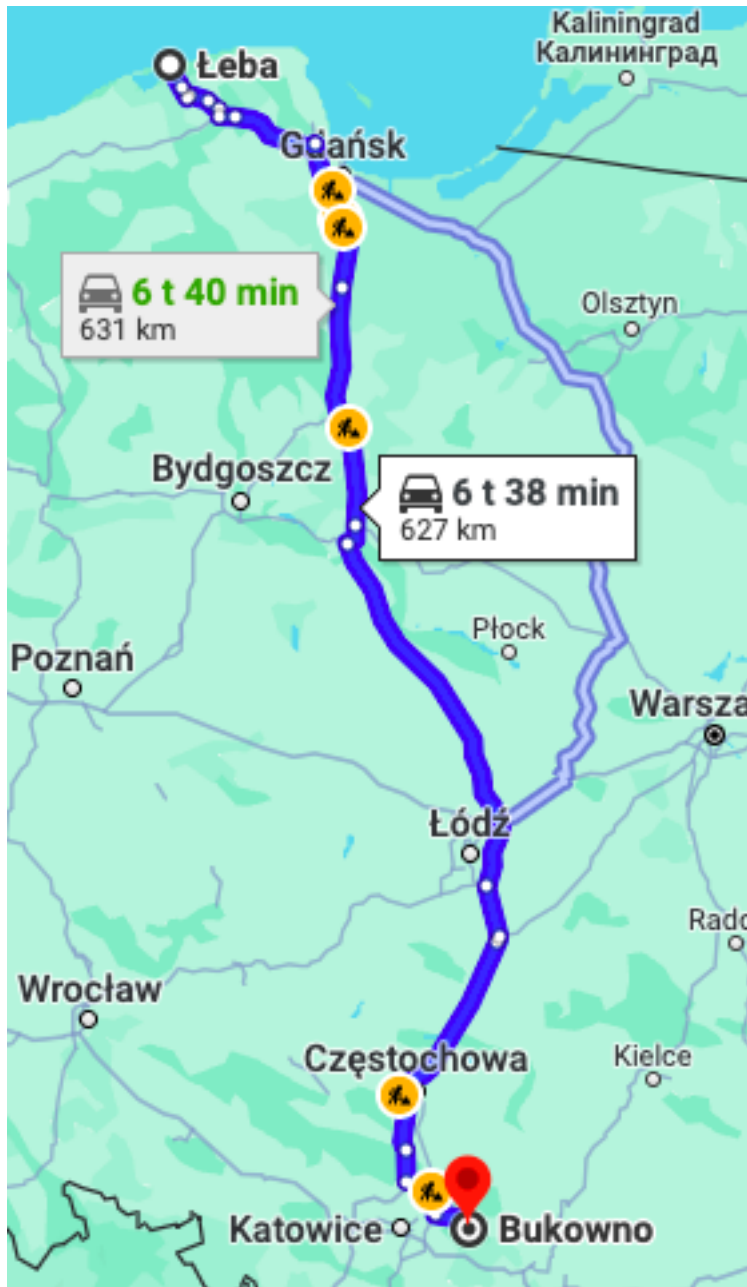


Figure 10: Kjøreavstand mellom Leda og nærmeste pyrolyseanlegg: Klean Industries i følge google maps

3.2.3. Verdikjede

Denne oppgaven tar for seg materiale som kommer til havnen fra Baltyk og skal prosesseres videre for å kunne brukes i nye produkt. Vindturbinbladene kommer fra Baltyk og transporteres med båt inn til havnen. Der må de kuttes opp i passende lengde dersom standardtransportmidler skal brukes. Denne oppgaven behandler transporten mellom Leba og pyrolyseanlegget, altså delene som er markert med blått i figur 17.

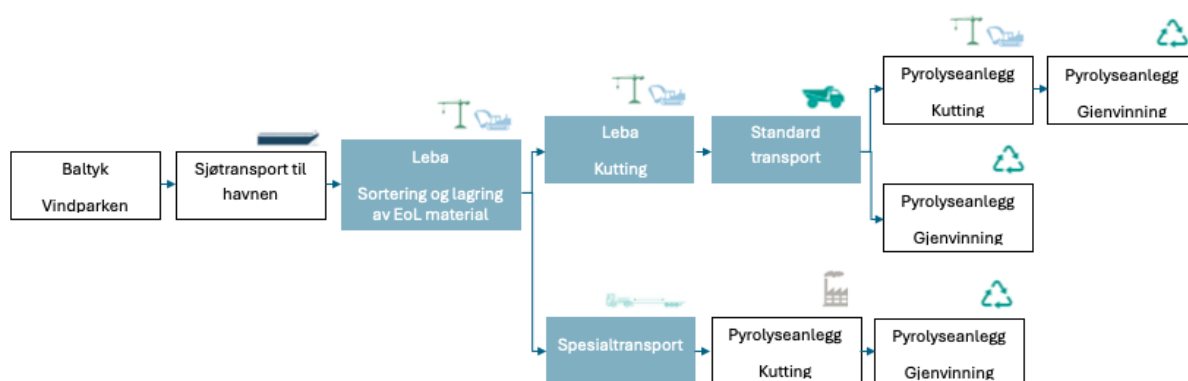


Figure 11: Illustrasjon av alternativene for verdikjeden fra Baltyk til pyrolyseanlegget der delene som dekkes av beregningene er markert med blått

Dersom målet om å bruke alt materiale videre kan ignoreres er det, med hensyn på logistikken, mest hensiktsmessig å transportere deler som er tilpasset lastbæreren. Dette fører til maks utnyttelsesgrad under transporten. Glassfibrene kan også selges til flere potensielle kunder dersom det ikke er kuttet mer enn nødvendig.

Dersom spesialtransport brukes, krever det spesialutstyr både ved havnen og ved pyrolyseanlegget. Dessuten må veien stenges under transporten. Dette blir både dyrt og forstyrrer i stor grad omgivelsene. Figur 18 viser et eksempel på hvordan et kortere turbinblad ville blitt transportert.



Figure 12: 67 m langt turbinblad som transporteres (Braata, 2021)

Denne oppgaven ser på hvor store deler som er mest hensiktsmessige å transportere mellom Leba og gjenvinningsanlegget der materialet pyrolyseres og videre transporteres til kunden. Det første som må vurderes er om det er mest hensiktsmessig å kutte opp materialet nok for å transportere det videre, og igjen kutte det senere for pyrolyse, eller om det er mer hensiktsmessig å kutte materialet en gang i riktig størrelse. Hvis materialet skal kuttet med en gang er transportkostnadene avhengig av hvor store deler som er mest hensiktsmessig å pyrolysere. Skal vindturbinbladene kuttet senere blir transportkostnadene avhengig av hvor mye som kan transporteres, da det er mer relevant å kunne bruke glassfibrene til flere produkter. Oppgaven gjør også en forenklet vurdering av å transportere hele turbinblader til pyrolyseanlegget.

3.3. Beregningsmodell

Beregningene gjøres i Excel da dette er et standardprogram å bruke for beregninger. Dette kapitlet starter med en oversikt over inputvariablene som er brukt. Deretter presenteres oppsettet for formlene.

3.3.1. Inputvariabler

I modellen er inputvariabler markert med blå celler. De er i utgangspunktet samlet, med unntak av priser og størrelser på deler som er spesifikke for det enkelte produktet. Tallene er hentet fra leverandører og informasjon om Baltyk. Inputvariablene som er relevant for flere deler av rapporten er:

- Antall vindturbiner
- Mengde materiale per vindturbinblad
- Lengde på vindturbiner
- Andel av vindturbinen som er glassfiber
- Maks bredde på vindturbinbladene
- Prosentandel av vindturbinbladene som brukes til annet formål og dermed ikke er en del av denne modellen
- Tykkelse på vindturbinbladene som transporteres
- Lengde, bredde og høyde på lastbæreren
- Transportpris per km
- Avstanden mellom havnen og pyrolyseanlegget
- Forventet salgpris for glassfibrene

Disse variablene er relevant fordi de forteller hvor mye material som transporteres og hvor stor en lastbærer er. Det er også disse tallene som endres i sensitivitetsanalysen, for å undersøke hvor stor betydelse disse variablene har for sluttprisen.

For beregning av totalprisen ved salg av hele vindturbinblad, tar modellen utgangspunkt i prisen for transport av et vindturbinblad uavhengig av avstanden vindturbinbladet transporteres. Grunnen til dette er at det er vanskelig å finne mer eksakte tall for spesialtransport.

Beregningene med utgangspunkt i eksempelprodukter inkluderer også den nødvendige lengden på glassfiber for å produsere det gitte produktet. Dette er vist i figur 19.

generelle størrelser		
antal vindmøller	70	baltyk 2
antal vindmølleblad	210	antal vindmøller * 3
mengde material per vindmølleblad	65,25	tonn
lengde vindmølleblad	115	m
maks bredde vindmølleblad	3,35	m
anttt gjennomsnittlig bredde vindmølleblad (cm)	167,5	maks bredde vindmølleblad / 2
andel glassfiber av materialet	55%	
total mengde EoL material	13702,5	antal vindmølleblad * mengde material per vindmølleblad
prosentandel til annet	20%	
lengde vinsmølleblad som trnsporteres	19320	lengde vindmølleblad * antal vindmølleblad * (1 - prosentandel til annet)
tykkelse vindmølleblad (cm)	192,333333	aprosimerer 5m, på tykkeste del må de uansett deles opp, antar det deles opp 3 ganger
høyde transport (fot)	8	
høyde transport (cm)	243,84	høyde transport (fot) * 30,48
antal glassfiber i høyden	1	rounddown (høyde transport (cm) / tykkelse vindmølleblad)
bredde transport (fot)	8	
bredde transport (cm)	243,84	bredde transport * 30,48
lengde transport (fot)	20	standard kontainer
lengde transport (cm)	609,6	lengde transport (fot) * 30,48
plass per transport (fot^3)	1280	Høyde transport (fot) * lengde transport (fot) * bredde transport (fot)
plass per transport (cm^3)	36245563,6	plass per transport (fot) * 28316,8466
pris per anstand	9,1	kr/km
avstand havn til behandlingssted	627	km

Figure 13: Inputvariabler og formler for beregninger som er uavhengige av størrelse på delene som transporteres

3.3.2. Beregninger

Beregninger som er felles uavhengig av hvilket produkt de tar utgangspunkt i er plassert sammen med inputvariablene. Dette er typisk omgjøring av enheter.

Resten av modellen er tredelt, med en del for kuttet glassfiber, en del for lengder knyttet til eksempelproduktene og en del for hele vindturbinblad. Denne oppgaven legger mest vekt på delen om beregninger basert på eksempelprodukter, da disse er nærmere hverandre i pris enn hele vindturbinblad og kuttet glassfiber.

Modellen for lengder knyttet til eksempelprodukt er også tredelt, der størrelsen på vindturbinbladdelene beregnes først for å få et grunnlag for neste del. Deretter beregnes transportkostnadene basert på disse størrelsene, før den mulige fortjesten ved salg av glassfibrene regnes ut. Til slutt trekkes transportkostnadene fra fortjenesten for salg av glassfiber for å få en total kostnad/fortjeneste for denne delen av regnskapet. Lengden som gir høyest fortjeneste/minst tap er mest lønnsomt å selge. Figur 20 viser formlene for beregningene for eksempelproduktene.

størrelser avhengig av produkt		
	skateboard	kajak
størrelse EoL deler		
nødvendig lengde glassfiber for produktet	120	500
bredden EoL deler (cm)	167,5	167,5
antal EoL deler i lengden	5	1
antal EoL deler i bredden	1,45576119	1,45576119
antal deler	48300	11592
transportkostnader		
antal deler per transport	7,27880597	1,45576119
mengde per transport	873,456716	727,880597
antal kjøreturer	56	16
total avstand transport	70224	20064
pris transport	639038,4	182582,4
salgspris		
pris lignende produkt	20	25
material som selges videre	7536,375	7536,375
total salgspris	150727,5	188409,375
total kostnad	-488310,9	5826,975

Figure 14: Formler for beregning av kostnader for eksempelprodukter

I tillegg beregnes kostnadene ved transport av kuttet glassfiber, fordi dette er løsningen som brukes i dag dersom vindturbinbladene ikke skal deponeres. For dette antas glassfiberbitene kunne pakkes tett nok til at andelen luft per transport blir null. Oppgaven antar at Equinor ikke tjener noe på å selge disse bitene, siden glassfiber i dag blir gitt gratis til bedrifter som kan resirkulere det (J. Paus, personlig kommunikasjon, 21. mai 2024). Disse beregningene er vist i figur 21.

klipt (max 10 cm)		
transportkostnader		
mengde per transport	36245563,6	cm ³
antal kjøreturer	17,1720298	total mengde EoL materialer / mengde per transport
total avstand transport	21533,7254	2 * avstand havn til behandlingssted * antal kjøreturer
pris transport	195956,901	total avstand transport * pris per avstand
salgspris		
mengde material	7536,375	total mengde EoL material * andel glassfiber
salgspris	0	i dag gis det bort gratis
total salgspris	0	mengde material * salgspris
total kostnad	-195956,9	total salgspris - pris transport

Figure 15: Formler for beregning av kostnader for kuttet glassfiber

Kostnadene ved transport av hele turbinblad vil også bli beregnet fordi turbinbladene i så fall kan kuttes senere i verdikjeden. Dette er en fordel dersom noen bestillinger kommer sent, men må veies opp mot prisen av spesialtransport og større avstand dersom veiene ikke er egnet. Siden fordelene i dette tilfellet ikke er høyere salgspris, antar denne oppgaven

samme salgspris som for å produsere en kajakk. Formlene for å beregne dette er vist i figur 22.

hele turbinblad		
transportkostnader		
antal kjøreturer	168	antal vindmølleblad
pris per kjøretur	327 300	
pris transport	54986400	antal kjøreturer * pris per kjøretur
salgspris		
mengde material	7536,375	total mengde EoL material * andel glassfiber
salgspris	25	sier høyeste alternativ for glassfibret da det kan kuttes i hvilken lengde som helst
total salgspris	188409,375	mengde material * salgspris
total kostnad	-54797991	salgspris - pris transport

Figure 16: Formler for beregning av kostnader ved transport av hele vindmølleblad

I tillegg til dette beregnes også prisen for den ideelle logistikk-løsningen dersom det ikke stilles krav om at alt materiale skal brukes videre. Dette gjøres med samme formler som dersom man tar utgangspunkt i sluttproduktene. Målet med dette er å få en oppfatning av hvor mye ekstra det koster å dele opp materialet tidligere i verdikjeden. Utrekningene for dette er vist i figur 23.

størrelser avhengig av lastbærer		
	containerstørrelse	
størrelse EoL deler		
nødvendig lengde glassfiber for produktet	609,6	cm
bredde EoL deler	167,5	gjennomsnittlig bredde vindmøllebladene, største delen må uansett kuttes for å få plass
antal EoL deler i lengden	1	rounddown (lengde transport / nødvendig lengde EoL deler for produkt)
antal EoL deler i bredden	1,455761194	bredde transport / bredde EoL deler
antal deler	9508	roundup (3 * lengde vindmølleblad som transporteres / (nødvendig lengde EoL deler for produkt / 100))
transportkostnader		
antal deler per transport	1,455761194	antal EoL deler i lengden * antal EoL deler i bredden * antal glassfiber i høyden
mengde per transport	887,4320239	antal deler per transport * nødvendig lengde EoL deler for produkt
antal kjøreturer	11	roundup (mengde per transport / total mengde EoL materialer)
total avstand transport	13794	2 * avstand havn til behandlingssted * antal kjøreturer ganget med to fordi bilen kjører begge veier
pris transport	125525,4	total avstand transport * pris per avstand
salgspris		
pris lignende produkt	25	aprosimert
material som selges videre	7536,375	total mengde EoL material * andel glassfiber
total salgspris	188409,375	pris lignende produkt * material som selges videre
total kostnad	62883,975	total salgspris - pris transport

Figure 17: Formler for beregning av kostnader dersom størrelse på glassfiberbitene tar utgangspunkt i containeren

3.3.3. Eksempelprodukter

Modellen tar utgangspunkt i lengden på glassfiber som trengs for å lage de tre eksempelproduktene. Det antas da en bredde på vindturbinbladdelene som ganges med lengden for å få et volum.

Det estimeres også en mulig fortjeneste for de ulike lengdene på glassfiber. Dette brukes for å finne ut hva man kan tjene på å selge glassfiber av ulik kvalitet.

3.3.4. Transport

Oppgaven antar at samme transportmiddel brukes uavhengig av hvilket sluttprodukt som skal produseres. Ut ifra volumet til både vindturbinbladdelene og transportmidlene regnes det ut hvor mye som får plass per transport. Ut ifra dette kan man regne ut hvor mange transporter som kreves for å få med alle deler. Dette svaret ganget med transportkostnadene for å finne prisen for å transportere materialet.

3.4. Feilkilder

Denne oppgaven er skrevet basert på tilgjengelig informasjonen om prosesser som eventuelt skal gjøres om 30 år. Tallene er basert på dagens situasjon, som ikke kan forventes å være representative når Baltyk avvikles. Det betyr at det er store usikkerheter knyttet til alle tall i denne oppgaven. Likevel gir dette et utgangspunkt for beslutningen om hvordan vindturbinbladene transporteres fra havnen til pyrolyseanlegget.

Det er ikke heller ønskelig for transportselskaper eller fabrikker å oppgi prisen for transport og råvarer, da denne informasjonen kan brukes av konkurrenter. Tallene i denne oppgaven er tatt fra nettsider og artikler og kan ikke antas være nøyaktige. Fordi det er vanskelig å finne eksakte tall, brukes også samme generalisering ved beregningene for alle containerstørrelsene. Det er logisk at større containere koster mer å transportere, men det blir ikke tatt hensyn til.

Tilgjengelig teknologi vil også utvikles, noe som endrer forutsetningene for oppgaven. Dersom det kommer et bedre alternativ på markedet innen Baltyk avvikles, kan det bli verdt å transportere delene lengre, transportere større/mindre deler eller transportere dem på en annen måte.

Modellen finner også kun forskjeller på pris mellom ulike transportsenarioer og er ikke ment til å finne de totale kostnadene ved gjenvinning av glassfiber fra vindturbinblad. Dermed er ikke alle kostnader relatert til gjenvinningen tatt med. Dersom noen kostnader som er antatt like viser seg å ikke være det, vil dette også kunne føre til feil resultat.

Å ikke inkludere lagerkostnader kan også føre til misvisende resultater i denne oppgaven. Disse er i stor grad avhengig av hvor lenge en vare ligger på lager, noe som i dag er uvisst. Det må dermed antas at lagerkostnader legges til på transportkostnadene i denne oppgaven.

4. Resultater

Denne oppgaven har laget en modell for å bestemme kostnadsforskjellene mellom ulike alternativer for å transportere deler av vindturbinblad til pyrolyseanlegget der de skal gjenvinnes. Denne delen av oppgaven starter med en presentasjon av resultatene, og deretter resultatene fra sensitivitetsanalysen.

4.1. Modell

Etter modellen er kostnadene som tas hensyn til her større enn fortjenesten ved videre salg, bortsett fra hvis materialet skal brukes til en kajakk eller hvis størrelsene bestemmes av lastbæreren. Tabell 1 viser fortjenesten eller tapet i de 5 senarioene undersøkt i denne oppgaven.

Kuttet (<10 cm)	-195 957 kr (se figur 21)
Skateboard (120 cm)	-388 311 kr (se figur 20)
Kajakk (5 m)	5 827 kr (se figur 20)
Utgangspunkt i container	62 884 kr (se figur 23)
Hele turbinblad (115 m)	-54 797 991 kr (se figur 22)

Table 1: Totalkostnad for 5 alternativer for transport

Det beste alternativet kun med hensyn på pris er å ta utgangspunkt i størrelsen på lastbæreren. Det vil si kutte kompositten i lik lengde som lastbæreren. Dette vil være de

største bitene som får plass å transportere samtidig. Tabell 2 viser hvor mye dyrere de andre alternativene er enn dersom man bare tar hensyn til lastbæreren. Det vil si hvor mye Equinor taper på å kutte kompositten med hensyn på å unngå materialsvinn i forhold til å ta utgangspunkt i størrelsen på lastbæreren. Å transportere størst mulig biten vil øke antallet potensielle kunder, men også sannsynligvis øke mengden svinn dersom glassfibrene må kuttes igjen før ny produksjon. Hele turbinblad er ikke tatt med da de kan tilpasses den enkelte kunden. Denne transportmåten er dermed mulig uten å gå på bekostning av sirkularitet.

Kuttet	258 841 kr
Skateboard	452 195 kr
Kajakk	57 057 kr

Table 2: Ekstra kostnad for å prioritere sirkularitet i de ulike senarioene

En annen måte å visualisere forskjellen i kostnadene er med å finne salgsprisen for glassfibrene som etter denne modellen går i null. Dette er vist i tabell 3.

Kuttet	26,00kr
Skateboard	84,79kr
Kajakk	24,23kr
Utgangspunkt i container	16,66kr
Hele turbinblad	7296,13kr

Table 3: Nødvendig pris for glassfibrene for å tjene like mye ved salg av materialet som transportkostnadene

4.1.1. Kuttet glassfiber

Denne oppgaven viser at å makulere vindturbinbladene er det nest billigste alternativet. Dette er også dagens løsning dersom materialet gjenvinnes. Av alternativene som ble vurdert i denne oppgaven, taper materialet mest verdi ved makulering. Det betyr at glassfibrene kan brukes i færre nye produkt og resirkulering av de nye produktene blir mer utfordrende. I lengden blir dette dermed det minst holdbare alternativet.

Samtidig går ingenting av materialet tapt i videre produksjon på grunn av ujevnheter i lengden på glassfibrene. Denne typen produkter lages av glassfiber på opp til 10cm, men en stor andel av glassfibrene er også kortere.

Etter beregningene i denne oppgaven er dette billigste løsning dersom det er få vindturbinblader. Dermed kan dette anses som en bedre løsning for utskifting av vindturbinblader mens vindparken er i drift, men en dårlig løsning når vindparken avvikles.

4.1.2. Skateboard

Å transportere lengder som er ideelle for å produsere skateboard er etter beregningene i denne oppgaven et dårlig alternativ. Denne typen produkt krever at glassfibrene har en lengde på minst 120cm, som betyr at dersom en del ikke møter kravet kan den ikke brukes. Samtidig kuttet vindturbinbladene i små deler før transporten, noe som ikke er en god logistikk-løsning. Transporten blir dermed for kostbar samtidig som prisen for disse glassfibrene blir lavere og det er et mindre marked for dem.

4.1.3. Kajakk

Kajakk er det beste alternativet dersom man tar utgangspunkt i et produkt. Transporten blir billigere fordi lengden på delene er bedre tilpasset lengden på en container, samtidig som kunden er villig til å betale mer for lengre glassfiber. Dette er også en bedre løsning med tanke på logistikk fordi det fortsatt er mulig å dele opp materialet flere ganger og selge det til en kunde som ønsker kortere glassfiber.

4.1.4. Hele turbinblad

Å transportere hele vindturbinblad fører til ekstremt høye kostnader uten stor direkte fortjeneste, og er dermed det dyreste alternativet undersøkt i denne oppgaven. Indirekte kan Equinor få bedre avtaler fordi de kan levere til bestillinger som kommer senere og dermed tjene mer, men dette er vanskelig å kvantifisere. De kan da tilpasse seg kunden mer og dermed oppnå en høyere servicegrad. Det må gjøres en vurdering av hva kunden er villig til å betale for høyere servicegrad dersom dette alternativet vurderes.

Hele vindturbinblad er delen av modellen med størst usikkerhet. For eksempel tar ikke dette alternativet utgangspunkt i et bestemt produkt, og lignende produkter kan dermed ikke brukes som utgangspunkt for å fastsette en salgspris. En annen faktor som fører

til større usikkerhet, og større potensial for fortjeneste ved transport av hele vindturbinblad, er framtidig utvikling. Denne oppgaven tar utgangspunkt i metodene som i dag oppfattes som mest realistiske, og den tilgjengelige informasjonen om dem. Dersom ny teknologi utvikles eller dagens teknologi utvikles videre kan eventuelt lengre glassfiber utvinnes. De vil da ha flere potensielle bruksområder, og dermed selges dyrere. For eksempel antas solvolyse kunne brukes for å ta ut lengre glassfiber enn pyrolyse, noe som muliggjør salg av lengre glassfiber enn denne oppgaven har vurdert.

Med videre utvikling innenfor spesialtransport er det også mulig at kostnadene knyttet til transport minsker. Dette gjør transport av hele vinmølleblad til et mer attraktivt alternativ. Endringen kan komme av enten billigere utstyr, bedre veier eller transportmiddel som er mer fleksible i forhold til hvor de kan kjøre.

Til tross for at kostnadene for dette alternativet potensielt kan minske før Baltyk avvikles, er det ikke sikkert at det er mulig å transportere helt vindturbinblad. Denne typen transport stiller store krav til veiene. Dersom veiene ikke er egnet for denne typen transport, er det irrelevant hvor store fordeler det er ved transport av hele vindturbinblad.

4.2. Sensitivitetsanalyse

Sensitivitetsanalysene er gjort med å endre en variabel om gangen til rekkefølgen på hva som er mest og minst lønnsomt endres. I utgangspunktet er rekkefølgen fra mest til minst lønnsomt:

1. Kajakk
2. Kuttet glassfiber
3. Skateboard
4. Hele turbinblad

Sensitivitetsanalysen undersøker hvordan resultatet endres dersom transporten gjøres på en annen lastbærer, transportkostnadene eller avstanden endres, mengden materiale endres og dersom prosentandelen glassfiber som går tapt ved kutting endres.

4.2.1. Endre containerstørrelse

Første del av sensitivitetsanalysen undersøker kostnader for transport og videre salg av glassfiber materialet, ved bruk av andre containerstørrelser. Resultatene fra dette er vist i

tabell 4. I alle tilfellene er det beste alternativet å bruke størst mulig container. Dette kommer sannsynligvis av at samme transportkostnaden er brukt for alle containerstørrelsene.

Containertype	½ TEU	TEU	1,5 TEU	2 TEU
Kuttet	-391 914 kr	-195 957 kr	-130 638 kr	-97 978 kr
Skateboard	-1 435 457 kr	-388 311 kr	-305 729kr	-168 792 kr
Kajakk	Ikke mulig	5 827 kr	5 827 kr	97 118 kr
Utgangspunkt i container	-302 281 kr	62 884 kr	131 352 kr	154 175 kr
Hele turbinblad	-54 797 991 kr	-54 797 991 kr	-54 797 991 kr	-54 797 991 kr

Table 4: Sluttsum ved forskjellig type container for ulike scenarioer

Tabellen viser også samme pris dersom deler til en kajakk transporteres med en 20 eller 30 fot container. Det kommer av at en kajakk er lengre enn 10 fot, som er forskjellen på lengden til disse containerene.

4.2.2. Transportkostnader og avstand

Rekkefølgen for hva som er mest og minst lønnsomt er lik ved transportkostnader mellom 3kr/km og 783kr/km. Hvis transportkostnaden går ned til 3kr/km blir det billigere å transportere deler til skateboard enn å makulere det. Ved 783kr/km er det, etter denne modellen, billigere å transportere hele turbinblad enn deler til skateboard. Det er lite forskjell på prisforskjellen mellom å transportere kuttet glassfiber og deler til kajaker.

Dersom transportkostnaden ikke endres, men det er mulig å gjenvinne glassfibrene innenfor 213km, endres også rekkefølgen på hva som er mest hensiktsmessig. Dette er området innenfor sirkelen i figur 24. For sammenligning er pyrolyseanlegget som denne oppgaven tar utgangspunkt i markert med blå på kartet. I dette tilfellet blir det billigere å produsere skateboard enn å makulere vindturbinbladene. Det er fortsatt billigst å produsere kajaker av materialet.

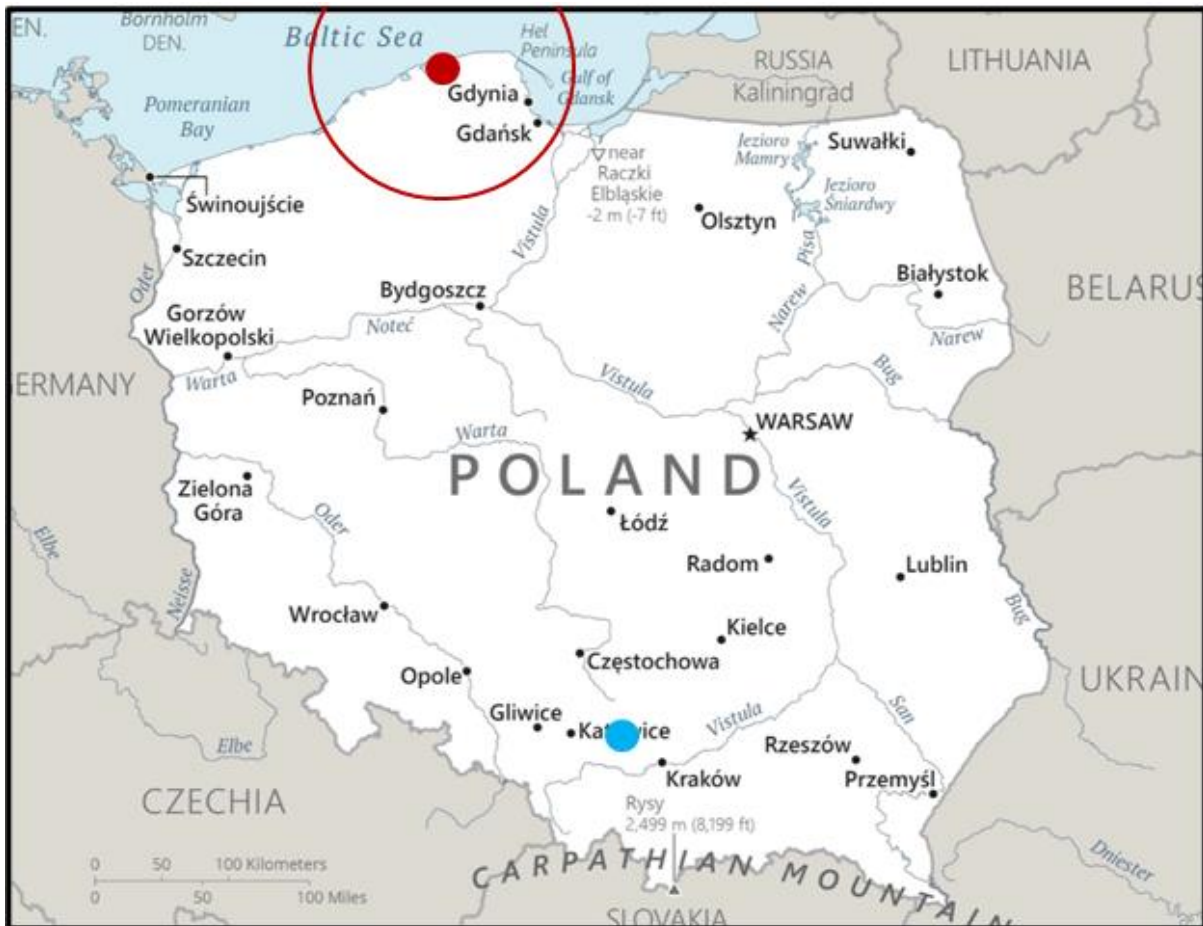


Figure 18: Kart over Polen med Leba markert i rødt og en sirkel som viser hva som havner innenfor 213km i kjøreavstand på Leba. Pyrolyseanlegget om denne oppgaven tar utgangspunkt i er markert med blått

4.2.3. Mengde material

Dersom antallet vindturbiner øker blir det ingen forskjell i hva som er den mest hensiktsmessige løsningen. Ved færre vindturbiner er kajak det beste alternativet så lenge det er flere vindturbiner enn 2. Da blir det billigst å transportere kuttet glassfiber.

Dersom en større del av materialet brukes til annet ser man en lignende trend. Ved 73% som brukes til annet blir det billigere å produsere skateboard enn å makulere vindturbinbladene. Det er ingen endring dersom en mindre andel av vindturbinbladene brukes til annet. Det vil si dersom alle vindturbinene skal transporteres.

5. Diskusjon

Resultatene i denne oppgaven stemmer godt overens med det man kan forvente fra teorien om logistikk og verdikjeder. Til tross for stor usikkerhet, kommer det fram at større transportmidler er en bedre egnet løsning enn mindre. På grunn av usikkerheten, kan det diskuteres hvor realistiske resultatene fra denne oppgaven er. Få tall er eksakte ut ifra situasjonen i dag, og den vil sannsynligvis endres før Baltyk avvikles.

Samtidig viser sensitivitetsanalysen at det kreves store endringer i pris og mengde material for å få en annen beste løsning. Dersom endringene er små, vil dette gi et godt bilde av hvilket alternativ som er best egnet.

Derimot er det realistisk å forventesotre endringer. For eksempel legges store ressurser i å finne gode metoder for å gjenvinne komposittmateriale, noe som betyr at løsningene sannsynligvis blir både billigere og bedre i framtiden. Store endringer i forutsetningene er dermed ikke usannsynlig. Noen faktorer som kan påvirke hvor representative disse resultatene er for framtiden, er presentert under.

5.1. Dagens situasjon som utgangspunkt

Å bruke tall fra dagens situasjon i beregningene, gjør at talene ikke kan være representative når denne vindparken avvikles. En måte å gjøre tallene mer relevante ville vært å ta utgangspunkt i en vindpark som skal avvikles innenfor nærmeste framtid. Samtidig ville dette bety at flere av metodene for gjenvinning ikke er tilgjengelige og det er færre alternativ for gjenvinning. Dessuten finnes det ikke et marked for gjenvunnet glassfiber enda, og resultatet ville ikke vært relevant av den grunn. Sannsynligheten for at gjenvunnet materiale blir solgt er dermed lavere enn dersom det tas utgangspunkt i en framtidig vindpark.

5.2. Forventning videre

Siden denne oppgaven tar utgangspunkt i vindparken Baltyk som ikke er bygget enda, forventes det at forutsetningene i denne oppgaven kommer til å endres. Dette gjelder både markedet for gjenvunnet glassfiber og den tilgjengelige teknologien.

5.2.1. Marked for gjenvunnet glassfiber

Med strengere krav til sirkularitet og et økt fokus på miljøvennlige produkter, kan man forvente at markedet for gjenvunnet materiale generelt øker. Dette betyr at det sannsynligvis kommer flere produsenter av gjenvunnet materiale, samtidig som etterspørselen øker. Avhengig av hvor stort tilbudet er i forhold til etterspørselen, vil prisen enten øke eller minske. Siden det i dag er stort fokus på gjenvinning, virker det mer sannsynlig at etterspørselen vil øke fordi markedet for denne typen produkter øker.

5.2.2. Tilgjengelig teknologi

I dag finnes det i teorien flere metoder for å gjenvinne glassfiber fra vindturbinblader, men de fleste metodene er ikke godt nok utviklet for å brukes på en industriell skala. Så langt er det stor usikkerhet rundt metodene og denne oppgaven har tatt utgangspunkt i den mest realistiske metoden ut ifra det vi vet så langt. Sannsynligvis vil dagens metoder utvikles videre før Baltyk avvikles, fordi det kan forventes at markedet øker. Dette vil i stor grad endre forutsetningene for gjenvinning og salg av glassfiber. For eksempel vil sannsynligvis kuttet glassfiber kunne selges, ikke i beste fall gis bort gratis.

Det er også mulig at helt nye gjenvinningsmetoder eller bruksområder for vindturbinblad dukker opp. Dersom flere bedrifter for eksempel bruker vindturbinbladene som de er, minsker behovet for materialgjenvinning.

5.3. Sirkularitet som forutsetning

Det er satt som forutsetning i denne oppgaven at alt materiale skal brukes videre i et nytt produkt, og beregningene er gjort ut ifra at alt materiale selges til en gitt pris. Dette er ikke nødvendigvis et realistisk scenario, da det ikke tar hensyn til mengden materiale som kreves for å produsere hvert enkelt produkt. En mer sannsynlig løsning vil være å selge materialet til flere sluttbrukere, og at det dermed brukes i flere ulike produkter.

Hvor mye transportkostnadene øker med denne forutsetningen i forhold til dersom målet er å transportere kompositten billigst mulig er også kvantifisert i denne oppgaven. Disse tallene er derimot lave i forhold til hva som er realistisk å forvente, fordi de ikke tar hensyn til lagerkostnader. Å begrense hvilke kunder man er villig til å selge glassfibrene til, vil enten senke prisen eller føre til at glassfibrene havner på lager over lengre tid. Dette er ikke

ønskelig fordi det koster å bruke plassen og varen mister verdi dersom det kommer bedre alternativer på markedet.

5.4. Lagerkostnader

Denne oppgaven har ikke beregnet kostnadene for lager, noe som kan forventes være en stor del av kostnadene i en verdikjede. Det er nevnt i teorien at dersom hele turbinblad transporteres, stiller dette krav til dyrt utstyr. Mindre deler kan antas være enklere å flytte, noe som gjør håndtering av materialet på lager enklere. Dette vil i så fall øke forskjellen i kostnader for lager.

Samtidig må mindre deler plasseres med større mellomrom og krever dermed større areal. Dette vil også føre til økte lagerkostnader som påvirker kostnadene i motsatt retning.

6. Konklusjon

Målet med oppgaven var å vurdere hvilke størrelser på deler av vindturbinblader som er mest hensiktsmessig å transportere til gjenvinning, uten at det går på bekostning av sirkulariteten til materialet. Det vil si at alt materiale skal brukes i et nytt produkt, uten at det selges med større tap enn nødvendig.

Ut ifra beregningene gjort i denne oppgaven er det billigere å produsere kajaker av de resirkulerte glassfibrene enn de andre eksempelproduktene. Samtidig er dette basert på den tilgjengelige informasjonen i dag, som sannsynligvis ikke stemmer med situasjonen når Baltyk avvikles. Det er knyttet stor usikkerhet til alle tall brukt i disse beregningene og det er umulig å si noe sikkert basert på bare dette.

Det kostnadmessig dårligste alternativet, med stor margin, er transport av hele vindmølleblad. Fordelen med dette scenarioet er fleksibiliteten, men det går på bekostning av større logistikkutfordringer og krav til utstyr ved håndtering av materialet.

Samtidig kreves store endringer før det gir utslag på hvilket alternativ som er billigst. Høy grad av usikkerhet knyttet til avstand for transporten, salgspris og tilgjengelig teknologi kan likevel gjøre utslag. Oppgaven vurderer for eksempel ikke den kombinerte effekten av flere usikkerheter samtidig. Dermed er det viktig å følge med på både endringer i markedet og utviklingen av teknologi for gjenvinning av glassfiber.

7. Kilder

Abdelnaby, M; Eimontas, J; Striūgas, N; Yousef, S (2024). *Recovery of styrene from waste wind turbine blades (fiberglass/polyester resin composites) using pyrolysis treatment and its kinetic behavior. Journal of Thermal Analysis : an International Forum for Communications on Thermal Investigations*, 149(2), 521–538. <https://doi.org/10.1007/s10973-023-12714-z>

Abdulkadir, R; Avolio, A; Dull, D; Gravis, L; Hedley, A; Henao, L; Jackson, G; Jhweri, D; Kittali-Weidner, S; Krishnan, B; LeGeland, G; Lozano, A; Marsh, E; Passerini, S; Robertson-Fall, T; Stankeviciute, I; Tai, V; Vegter, D; Venho, C; ... Wrightson, J (2023). *Building a circular supply chain: Achieving resilient operations with the circular economy* s. 1-38

Askjem, Vigdis (6. Februar 2023). *Havkajakk* (2. Mai 2024), Hentet fra: <https://snl.no/havkajakk>

BakyardEngineering (3. juni 2016). *Home made Fiberglass skateboard* [video] YouTube, Hentet fra: <https://www.youtube.com/watch?v=fK1f8vRYWQI>

Bakshi, B (2019). *Sustainable Engineering Principles and Practice* Cambridge university press

Baran, I (2014). *Modelling the pultrusion process of off shore wind turbine blades*. [PhD Thesis - Research UT, graduation UT, Technical University of Denmark]. Technical University of Denmark. <https://www.persistent-identifier.nl/urn:nbn:nl:ui:28-103286>

Barlow, C og Liu, P (2016). *An update for wind turbine blade waste inventory* Cambridge universitet s. 1-9

Bauer, L og Matysik, S (2024). *Siemens Gamesa SG 14-236 DD* (24. mars 2024), Hentet fra: <https://en.wind-turbine-models.com/turbines/2473-siemens-gamesa-sg-14-236-dd>

Bettini, P og Spini, F (2024). *End-of-Life wind turbine blades: Review on recycling strategies*. Composites., 275. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2024.111290>

Birkved, M; Fayyaz, S; Khoshnevisan, B; Lund, K; Madsen, E (2023). *Sustainable end-of-life value chain scenarios for wind turbine blades* 2507(2023) s. 1-14 doi:10.1088/1742-6596/2507/1/012007

Bozer, Y; Tanchoco, J; Tompkins, J og White, J (2010) *Facilities Planning* 4. Utgave John Wiley & Sons

Braata, Espen (9. Februar 2021). *Svinger ingen hindring* (21. april 2024), Hentet fra: <https://www.at.no/transport/551958>

Buren, N; Demmers, M; Heijden, R og Witlox, F (2016). *Towards a Circular Economy: The Role of Dutch Logistics Industries and Governments* 8(7) s. 1-17 <https://doi.org/10.3390/su8070647>

Bø, E og Grønland, S (2014). *Moderne transportlogistikk* Fagbokforlaget

Bø, E; Grønland, S; Jahre, M (2018). *Forsyningskjeder og logistikk* Fagbokforlaget

Carpenter, A; Cooperman, A; Eberle, A; Heath, G; Walzberg, J og Watts, L (2022). *Regional representation of wind stakeholders' end-of-life behaviors and their impact on wind blade circularity* iScience s. 1-19 <https://doi.org/10.1016/j.isci.2022.104734>

Carron, W; Hughes, S; Murdy, P og Snowberg, D (2023). *Using Large-Scale Additive Manufacturing for Wind Turbine Blade Core Structures*. s. 1-92
<https://doi.org/10.2172/1994799>

Chen, Y; Cheng, L; Gu, J; Huhe, T; Tian, S; Yang, J; Yang, J og Yuan, H (2024a). *Upcycling of epoxy resin from waste wind turbine blades: Pyrolysis-methylation tandem reaction to methylated phenols and hexamethylbenzene*. Journal of Cleaner Production., 445.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.140987>

Chen, Z; Gao, S; Li, Z; Liu, W; Qin, P; Wang, A; Xu, Q og Yang, J (2024b). *Towards carbon neutrality: Sustainable recycling and upcycling strategies and mechanisms for polyethylene terephthalate via biotic/abiotic pathways* Elsevier s. 1-44
<https://doi.org/10.1016/j.eehl.2024.01.010>

Cherrington, R; Coles, S; Feito-Boirac, A; Goodship, V; Kirwan, K; Meredith, J; Spee, F; Vuillaume, A og Wood, B (2012) *Producer responsibility: Defining the incentive for recycling composite wind turbine blades in Europe* Energy policy 47(2012) s. 13-21
<https://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2012.03.076>

Continuum (2024). *We turn End-of-Life wind turbine blades, aviation and manufacturing composite waste into recyclable building materials. It's a win-win-win* (3. Mai 2024), Hentet fra: <https://www.continuum.earth/>

Cousins, D; Murray, R; Samaniuk, J; Stebner, A og Suzuki, Y (2018). *Recycling Glass Fiber Thermoplastic Composites from Wind Turbine Blades*. United States.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.10.286>

Cui, L; Lang, X; Li, Y og Wu, H (2024). Exploring circular supply chain practices from a dual perspective: using a hybrid method under uncertainty. *International Journal of Logistics Research and Applications*, 27(1), 59–82. <https://doi.org/10.1080/13675567.2021.1983527>

Diez-Canamero, B og Mendoza, J (2023) *Circular economy performance and carbon footprint of wind turbine blade waste management alternatives* 106(2023) s. 94-105
<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2023.03.041>

Duan, Z; Hua, S; Liang, M; Liu, C og Zhang, J (2024) Improved soil moisture, nutrients, and economic benefits using plastic mulchs in balsa-based agroforestry systems. *Environ Sci Pollut Res* 31, 15733–15745 (2024). <https://doi.org/10.1007/s11356-024-32264-7>

Eberle, A; Ghosh, T; Haes, R; Key, A; Walzberg, J (2022) *The Circular Economy Life Cycle Assessment and Visualization Framework: A Multistate Case Study of Wind Blade Circularity in United States* 185(2022) s. 1-10 <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106531>

Eimontas, J; Stasiulaitiene, I; Striūgas, N; Yousef, S; Zakarauskas, K (2024). *Recovery of energy and carbon fibre from wind turbine blades waste (carbon fibre/unsaturated polyester resin) using pyrolysis process and its life-cycle assessment*. *Environmental Research : a Journal of Environmental Medicine and the Environmental Sciences*, 245. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.118016>

Enevoldsen, P og Paulsen, E (2021). *A Multidisciplinary Review of Recycling Methods for End-of-Life Wind Turbine Blades* *Energies* 14(14) s. 1-13 <https://doi.org/10.3390/en14144247>

EU (2018) *Directive (EU) 2018/851 of the European Parliament and of the Council of 30 May 2018 amending Directive 2008/98/EC on waste*

Equinor (27. Mai 2021). *Leba to become location for operations and maintenance base for Polish Baltic Sea offshore wind projects* (18. April 2024), Hentet fra: <https://www.equinor.com/news/archive/20210527-leba-location-operations-maintenance-base>

Equinor (22. februar 2022). *Turbinleverandør valgt for Baltyk II og III-prosjektene i Polen* (15. april 2024), hentet fra: <https://www.equinor.com/no/news/archive/202202-baltyk-turbine-supplier>

Equinor og Polenergia (2020a). *Offshore wind farm OWF Baltyk* (18. April 2024), Hentet fra: <https://www.mfwbaltyk1.pl/>

Equinor og Polenergia (2020b). *Offshore Wind Farm Baltyk II* (18. April 2024), Hentet fra: <https://www.baltyk2.pl/en>

Gagani, A; Jørgensen, J; Karl, C; Krauklis, A (2021). *Composite materiale Recycling Technology – State-of-the-Art and Sustainable Development for the 2020s* *Journal of Composites Science* s. 1-33 <https://doi.org/10.3390/jcs5010028>

Gauderis, J og Severijns, C (2022) *Decommissioning of offshore and onshore wind turbines – Logistic business case* s. 1-33

Glass Forum (2024) *Hva er epoxy* (11. pril 2024), Hentet fra: <https://www.glassforum.no/hva-er-epoxy.5162451-260793.html>

Grønland, S. (2022). *Kostnadsmodeller for transport og logistikk. Basisår 2021*. Stima s. 1-48

Heggernes, T; Rolfsen, M; Sørheim, R og Torvatn, T (2016). *Teknologiledelse – for ingeniørstudenter* Fagbokforlaget

Hekkert, M; Kirchherr, J og Reike, D (2017). *Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions* Elsevier s. 221-232
<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.09.005>

Helo P. og Mayanti B (2024) *Circular economy through waste reverse logistics under extended producer responsibility in Finland*. *Waste Management & Research*. 42(1) s. 59-73.
doi:10.1177/0734242X231168801

Hu, C; Li, J; Liang, X; Liu, H; Qu, Y; Sun, Y; Xie, D og Xing, W (2024). *Development and Application of Medium-reactivity Epoxy Infusion Resin System in Large-scale Wind Turbine Blades* s. 1-13 10.1088/1742-6596/2737/1/012001

Johnsson, F og Savvidou, G (2023). *material Requirements, Circularity Potential and Embodied Emissions Associated with Wind Energy Sustainable Production and Consumption* 40 (2023) s. 471-487

Jørgensen, H (5. April 2023). *skateboard* (16. april 2024), Hentet fra:
<https://snl.no/skateboard>

Kaminsky, P; Simchi-Levi, D og Simchi-Levi, E (2022). *Designing & Managing the Supply Chain*. McGraw-Hill Education

Karavida, S og Peponi, A (2023). *Wind Turbine Blade Waste Circularity Coupled with Urban Regeneration: A Conceptual Framework* 16 (1464) s. 1-17
<https://doi.org/10.3390/en16031464>

Klean Industries (2024). *Commercializing continuous tyre pyrolysis technology in the European union* (2. Mai 2024), Hentet fra: <https://kleanindustries.com/resource-recovery-projects/tire-pyrolysis-recycling/crr-germany-poland/>

Lee, J; Joon, S (2024). *Perspective for waste upcycling-driven zero energy buildings* *Energy* 289 (2024) s. 1-8

Lincoln Canoe & Kayak (14. oktober 2017). *How We Build Your Kayak (Part 1 of 5)* [Video] YouTube, Hentet fra: <https://www.youtube.com/watch?v=63UkzIP-g7U>

Lund, K og Madsen, E (2024). *State-of-the-art value chain roadmap for sustainable end-of-life wind turbine blades*. 192 (2024) s. 1-11 <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.114234>

Magnusson, E (2023). *Reduction of emissions in the logistics chain for offshore wind operations*. S. 1-30

Mallick, P; McAloone, T; Pigosso, D og Salling, K (2024). *Towards a circular economy: Development of a support tool for designing reverse logistics systems* 351 (2024) s. 1.14
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.119819>

Market Data Library (9. August 2023) *Empowering Wind Energy: The Crucial Role of Glass Fiber in Wind Turbine Blade Innovation* (18. April 2024), Hentet fra: <https://medium.com/@marketdatalibrary/empowering-wind-energy-the-crucial-role-of-glass-fiber-in-wind-turbine-blade-innovation-5e4e9a183a4>

Mishnaevsky, L (2021) *Sustainable End-of-Life Management of Wind Turbine Blades: Overview of Current and Coming Solutions* Materials s. 1-25
<https://doi.org/10.3390/ma14051124>

Nicholas, J (2018). *Lean Production for Competitive Advantage 2*. Utgave CRC press, Taylor & Francis Group

Power Technology (7. juli 2023). *Baltyk Offshore Wind Farms, Poland* (23. Mars 2024), Hentet fra: <https://www.power-technology.com/projects/baltyk-offshore-wind-farms-poland/?cf-view&cf-closed>

Pu, Z; Wang, Q og Yang, S (2024). *Recycling of waste wind turbine blades for high-performance polypropylene composites* Applied Polymer s. 1-12 DOI: 10.1002/app.55474

Re-Wind (u.å.). *REPURPOSING WIND BLADES* (16. Mai 2024), Hentet fra: <https://www.re-wind.info/>

Siemens Gamesa (u.å.). *Blade materiale Passport*. (7. mai 2024), Hentet fra: <https://decomblades.dk/wp-content/uploads/2023/04/SGRE-DecomBlades-0422-solo-2.pdf>

The World Factbook (2021). *Poland – Details* (20. Mai 2024), Hentet fra: <https://www.cia.gov/the-world-factbook/countries/poland/map/>

Utility Dive (16. mai 2022). *Wind turbine blade sizes and transport: A guide* (11. Mai 2024), Hentet fra: <https://www.utilitydive.com/spons/wind-turbine-blade-sizes-and-transport-a-guide/623444/>

Windmills tech (2024). *Wind Turbine Blades Trash Solution* (5. Mai 2024), Hentet fra: <https://windmillstech.com/why-wind-turbines-recycling-matters/>

Xingying (2024). *NON WOVEN FIBERGLASS FABRIC IN 25, 40, AND 50G/SQ.M* (11. mai 2024), Hentet fra: <https://www.fiberglass-tape.org/fiberglass/non-woven-fiberglass-fabric.html>