



Norges miljø- og
biovitenskapelige
universitet

Masteroppgave 2020 30 stp

Fakultet for miljøvitenskap og naturforvaltning (MINA)

Resirkulerings- og ombruksløsninger for vindturbinblader fra norske vindkraftanlegg

Reuse and recycling solutions for wind turbine
blades from Norwegian wind power plants

Tobias Bjerkomp

Fornybar Energi

Forord

Denne masteroppgaven avslutter min skolegang på *Norges Miljø- og Biovitenskapelige Universitet*. Oppgaven tilsvarer 30 studiepoeng, og avslutter mastergraden *Fornybar Energi* ved *Fakultet for Miljøvitenskap og naturforvaltning (MINA)*. Den er inkludert i et forskningsprosjekt bestående av Østfoldforskning, landets ledende aktør innen miljø- og livsløpsvurderinger, samt vindkraftselskapet Zephyr. Oppgaven kan regnes som en del av en forstudie til prosjektets videre arbeid. Jeg ønsker å takke min veileder Ole Jørgen Hanssen og Zephyr, med Johnny Hansen i spissen, for å gi meg dette oppdraget med et tema som på mange måter er «i vinden».

Oppgaven symboliserer mine fem år på Ås, en tid jeg alltid vil se tilbake til med glede. Under arbeidet med oppgaven traff pandemien COVID-19 verdenssamfunnet med enorm styrke. Undertegnedes hverdag ble preget i form av smittevernstiltak, sosial usikkerhet og en unormal økonomisk situasjon. Tilgjengeligheten på vitale ressurser som helsevesen, sosial eksponering og offentlige bygg som universitetslokaler og kontorer var tidvis begrenset. Jeg ønsker derfor å uttrykke min største takknemlighet til følgende: mine foreldre som alltid er der for meg med støtte og kjærlighet; mine kamerater Knut, Eivind, Emil og Lars Erik som har lest min oppgave underveis og gitt konstruktive tilbakemeldinger; Malene for å språkvaske engelsken min; mine kollektivsamboere som gjorde tiden under COVID-19-pandemien langt lettere å komme igjennom; Ana, Didrik, Knut, Jonatan, Tomas, og gutta på Sørumsand som holdt motet mitt oppe og spredte godt humør i de vanskeligste periodene; Julie for å initiere lunsjtreff med klassen over internett, som bygde samhold og eksponerte meg for andre i samme situasjon.

Jeg håper studien tilfører deg ny kunnskap, og vil med det ønske deg en fornøylig lesning.

Norges miljø og biovitenskapelige universitet

Ås, 2. juni 2020



Tobias Bjerkomp

Sammendrag

Norsk vindkraft er i kraftig vekst, med 16 nye vindkraftanlegg klare for å driftsettes i løpet av 2020. Med dagens designede levetid på 25 år er det lenge til turbinene skal legges ned, og det er krevende å planlegge hvordan fremtidig avfall skal håndteres. Samtidig som stadig nye kraftverk settes opp, vil flere av de eldste konsesjonene utløpe fram mot 2030. Spørsmål enkelte konsesjonærer nå stiller seg er: *Hvilke premisser gjelder for vindturbinbladene, og de glassfiberarmerte plastkomposittene (GFK) de består av? Er det mulig å håndtere avfallet i tråd med FNs mål om bærekraftig utvikling og ressurseffektivitet, og hvordan?*

Denne oppgaven ble bestilt av et norsk forskningsprosjekt for å besvare disse spørsmålene. Det er blitt gjennomført et litteraturstudie av publisert forskning på feltet, intervjuer med eksperter, en spørreundersøkelse og en kost/nytte-vurdering. Forskning og empiriske data ble systematisk gjennomgått og vurdert for å gjengi et bilde av dagens status og muligheter. Kostnadsdata for kost/nytte-vurderingen ble samlet inn fra eksperter og utslippsdata ble simulert i dataprogrammet SimaPro ved å håndtere data fra databasen ecoinvent 3.3.

Studiens funn bekreftet at det inntil nå har vært få føringer for håndteringen av vindturbinbladene. Norges Vassdrags- og Energidirektorat (NVE) skal revidere konsesjonsprosessen, og en eventuell veileder for nedlegging kan legge opp til forutsigbarhet og bedre planlegging på temaet. Det viser seg at reetablering av anlegg øker i frekvens, noe som innebærer at flere vindturbiner skal fjernes og håndteres. Avfallsstrømmene kan derfor komme fortere og større enn først antatt, noe som krever en mobilisering av mottak og løsninger for håndtering av GFK-avfallet.

Ombruk og resirkulering er eksempler på løsninger for håndtering av vindturbinblader. For ombruk ble det i studien funnet at turbinblader kan benyttes som komponenter i lekeplass- og skurkonstruksjoner. De tre mest lovende resirkuleringssporene for GFK var mekanisk resirkulering, pyrolyse og co-prosessering. Noen få nordiske aktører, samt en tysk sementprodusent, har allerede utviklet forretningsmodeller som håndterer dette avfallet. I Norge er det to aktører som kan justere seg mot å motta og håndtere vindturbinblader. Gjennom kost/nytte-vurderingen ble det vist at co-prosessering er den klart mest miljøvennlige løsningen, sett opp mot deponi og energigjenvinning. Den høye systemkostnaden for co-prosessering kan kompenseres for ved at løsningen flyttes nærmere norske vindkraftverk. Dette krever at det utvikles et marked for avfall fra vindturbinblader, gjennom samarbeid og investeringsvilje fra både vindkraftbransjen og komposittbransjen.

Abstract

The wind industry in Norway is going through tremendous growth, with 16 new wind power projects to be installed and set to produce in 2020. As today's designed lifetime is 25 years, it is considered difficult to plan how the different components are to be handled when they reach end-of-life. Simultaneously with the growth of new installations, several old permits will reach their expiry date towards 2030. Questions that have arisen are as follows: Which premises are applicable for the wind turbine blades, and the glass-fiber reinforced plastics (GFRP) they consist of? Is it possible to handle GFRP waste in line with the UN's sustainability goals and resource efficiency, and how?

This study was ordered by a Norwegian research project to answer these questions. A "state-of-the-art" literature review of published research on this field were conducted, along with interviews with experts, a questionnaire and a cost/benefit analysis. Research and empirical data were checked systematically and assessed to draw a picture of today's status and opportunities. Cost data for the cost/benefit analysis were gathered from experts and emission data were simulated in the data program SimaPro by handling data from the ecoinvent 3.3-database.

The study's findings confirms that it has until now been few guidelines on wind turbine blades. The Norwegian Water Resources and Energy Directorate are working on revising their licensing process. An eventual guide on decommissioning can deliver predictable conditions and better planning on the subject. It has been shown that the repowering of wind farm projects is increasing in frequency, which comprises that more wind turbine blades must be removed and managed. Thus, waste streams could come faster and bigger than previously assumed, which calls for mobilizing of receptions and treatment solutions of the GFRP waste.

Reuse and recycling are two examples of solutions for handling wind turbine blade waste. In this study it was found that turbine blades can be reused as components in playground and shed constructions. For recycling, the three most promising pathways for GFRP were found to be mechanical recycling, pyrolysis and co-processing. Some Nordic businesses, as well as a German cement producer, have already developed business models that handle this waste. The cost/benefit analysis showed that co-processing was the by far most environmentally beneficial solution compared with landfilling and incineration. The high system cost of co-processing can be compensated by moving the solution closer to Norwegian wind farms. This calls for marked development for turbine blade waste, through collaboration and investments from both the wind power industry and the composites industry.

Innholdsfortegnelse

Forord	ii
Sammendrag	iv
Abstract	v
Innholdsfortegnelse	vi
Liste over figurer	viii
Liste over tabeller	ix
Definisjoner og forkortelser	x
1. Introduksjon	1
2. Mål og problemstilling	5
3. Kunnskapsgrunnlag	7
3.1. Omfang av fremtidige avfallsstrømmer	7
3.2. Metoder for avfallsbehandling	7
3.2.1. Deponering	9
3.2.2. Forbrenning med energiutnyttelse	10
3.2.3. Kjemisk konvertering	10
3.2.4. Mekanisk resirkulering	10
3.2.5. Co-prosessering	11
3.2.6. Fragmentering ved hjelp av stadige elektriske høyspenningspulser (SEH)	12
3.2.7. Pyrolyse	12
3.2.8. Fluidisering	12
3.2.9. Mikrobølgeassistert pyrolyse (MAP)	13
3.2.10. Solvolyse	13
3.2.11. Ombruk	13
3.3. Teknologisk modenhet	14
3.4. Oppsummering	15
4. Metodikk, datagrunnlag og studieobjekter	16
4.1. Metodikk	16
4.2. Datagrunnlag	17
4.3. Studieobjekter	20
4.4. Beskrivelse av case	25
4.4.1. Avhendingsscenarioer	25

4.4.2. Forutsetninger	29
5. Resultater	35
5.1. Dagens status for vindturbinblader i Norge	35
5.2. Demontering, ombruk og resirkulering: verdikjeder og anvendelser	38
5.2.1. Avviklingsfase og demontering	38
5.2.2. Ombruk	44
5.2.3. Resirkulering	48
5.3. Casestudie: Guleslettene Vindpark og kost/nytte for utvalgte behandlingsmetoder	61
6. Diskusjon	64
6.1. Vurdering av studiens funn	64
6.1.1. Dagens status for vindturbinblader i Norge	64
6.1.2. Demontering, ombruk og resirkulering	65
6.1.3. Casestudie: Guleslettene Vindpark	70
6.2. Resultatenes robusthet	72
6.2.1. Metodikk og datagrunnlag	72
6.2.2. Casestudiets forutsetninger	73
6.3. Studiens interessenter	75
6.3.1. Myndigheter	75
6.3.2. Prosjektledere og konsesjonærer av vindkraftverk	75
6.3.3. Rivningsaktører	76
6.3.4. Aktører innen avfallshåndtering og -prosessering	76
7. Konklusjon	77
8. Videre arbeid	78
9. Kildeliste	79
10. Vedlegg	86

Liste over figurer

Figur 1: Vindturbinbladets behandlingsmetoder presentert i et sirkulærøkonomisk diagram, der de indre sirklene har høyest verdi i et sirkulærøkonomisk perspektiv (Jensen & Skelton, 2018).	8
Figur 2: Oversikt over forskjellige behandlingsmetoder og de tilhørende teknologiske eller metodiske varianter for GFK og KFK.	9
Figur 3: En eksemplifisert oversikt over aktører over et turbinblads verdikjede, og et vindkraftverks prosjekteringstid. Beslutningstakere varierer langs verdikjeden.....	22
Figur 4: Dagens lineære verdikjede for vindturbinblader. Materialene går til deponering eller forbrenning med energiutnyttelse.	23
Figur 5: Flytskjema for de analyserte avhendingsscenarioene. Det røde området markerer perspektivet for anlegg 2.....	26
Figur 6: Oversikt over aktiviteter i driftsfasen for scenario C, markert i gult i figur 5. Da det er det spanske anlegget (C2) som er inkludert i vurderingen gjennom dette anleggets trinn I og trinn II, er det kun høyresiden som er relevant.....	27
Figur 7: Tre alternative flytskjema for nedleggingsfasen avhengig av avviklingsstrategi og bruksformål for vindturbinbladet i motsatt ende av avhendingen. VT = vindturbin, VTB = vindturbinblad.....	39
Figur 8: Et eksempel på en verdikjede der et vindturbinblad resirkuleres og tilføres en ny verdikjede med lukket kretsløp.....	60
Figur 9: Et eksempel på en verdikjede der et vindturbinblad omformes til ombruk med nye formål.	60
Figur 10: Et eksempel på en verdikjede der et vindturbinblad resirkuleres til ny produksjon, og skaper et lukket kretsløp.....	60
Figur 11: Oversikt over resultater fra kost/nytte-vurderingen av utvalgte behandlingsmetoder. Figuren viser de økonomiske funnene.	61
Figur 12: Oversikt over resultater fra kost/nytte-vurderingen av utvalgte behandlingsmetoder. Figuren viser funnene relatert til miljøpåvirkning.....	62

Liste over tabeller

Tabell 1: Liste over studiens benyttede forkortelser, samt definisjoner på benyttede uttrykk.x	
Tabell 2: Oversikt over funn fra en studie om «Tech Readiness Level» for de mest relevante teknologiene tilknyttet behandling av avfall fra vindturbinblader (Ierides et al., 2019). 14	14
Tabell 3: Oversikt over intervjuede personer og deres bidrag, samt personlig meddelelser (P.M.) i form av et ekspertmøtenotat, e-post og muntlig meddelelse. 19	19
Tabell 4: Oversikt over materielle data for Guleslettene Vindpark. 24	24
Tabell 5: Oversikt over diverse data relatert til beregning av den miljømessige kost/nytte-vurderingen. 33	33
Tabell 6: Oversikt over transportrelaterte forutsetninger av betydning for både den økonomiske og miljømessige kost/nytte-vurderingen. 34	34
Tabell 7: Oversikt over kostnadsrelaterte forutsetninger av betydning for den økonomiske kost/nytte-vurderingen, samt total vekt for referanseturbinen. Alle kostnader i €/tonn der ikke annet er oppgitt. 34	34
Tabell 8: Oversikt over alternativt utstyr som kan benyttes ved demontering av vindturbiner. 40	40
Tabell 9: Oversikt over alternativt utstyr som kan benyttes ved oppdeling av vindturbinblader. 42	42
Tabell 10: Vurderingskriterier og karakterer for løsninger relatert til ombruk..... 44	44
Tabell 11: Oversikt over både praktiske eksempler og teoretiske konsepter av forskjellige ombruksformål for vindturbinblader 45	45
Tabell 12: Vurderingskriterier og karakterer for løsninger relatert til resirkulering..... 48	48
Tabell 13: Oversikt over utvalgte resirkuleringsløsninger og tilhørende anvendelsesmuligheter. 49	49
Tabell 14: Oversikt over kost/nytte-verdier per installert effekt (MW)..... 63	63

Definisjoner og forkortelser

For leseopplevelsens skyld og for å komprimere tekst er det blitt benyttet forkortelser for enkelte uttrykk i denne oppgaven. I tillegg er det hensiktsmessig å definere noen begreper som er gjenstand for en rekke varierende definisjoner i academia i dag, samt noen engelske ord det ikke finnes representative norske ord for. Definisjoner og forkortelser kan leses fra Tabell 1.

Tabell 1: Liste over studiens benyttede forkortelser, samt definisjoner på benyttede uttrykk.

Forkortelser		
	IEA	The International Energy Agency / Det internasjonale energibyrået
	HMS	Helse, miljø og sikkerhet
	HTS	Høytemperert solvolyse
	GFK	Glassfiberarmerte plastkompositter
	KFK	Karbonfiberarmerte plastkompositter
	LTS	Lavtemperert solvolyse
	MAP	Mikrobølgeassistert pyrolyse
	MTA	Miljø-, transport- og anleggsplan
	NORWEA	Norwegian wind energy association / Norsk vindkraftforening
	NVE	Norges vassdrags- og energidirektorat
	SEH	Stadige elektriske høyspenningspulser
	TRL	Tech Readiness Level / Teknologisk modenhetsnivå
	TØI	Transportøkonomisk institutt

Definisjoner		
	Avfall	«Avfall er kasserte løseøregjenstander eller stoffer. Som avfall regnes også overflødige løseøregjenstander og stoffer fra tjenesteyting, produksjon og rensesanlegg mv.» (Avfallsforskriften, 2004, § 9-3).
	Bærekraftig utvikling	«En utvikling som imøtekommer dagens behov uten å ødelegge mulighetene for at kommende generasjoner skal få dekket sine behov. Bærekraftig utvikling består av tre dimensjoner: økonomi, miljø og sosiale forhold» (FN-sambandet, 2019).
	Jomfruelige materialer/råvarer	Et begrep som favner alle naturressurser som er utvunnet fra dens naturlige tilstand, og siden brukt i industrielle prosesser eller produksjonsprosesser. Eksempler kan være tømmer, plastharpiks fra oljeraffineringsprosesser, samt utvinnede og prosesserte metaller (SFTool, u.å.).
	Reetablering	På engelsk: «Repowering». En prosess der et vindkraftanlegg fjerner eksisterende vindturbiner for å installere nyere og mer effektive modeller. Ofte installeres et færre antall turbiner, samtidig som anleggets totale installerte effekt øker betraktelig.
	Sirkulær økonomi	Ved en sirkulær økonomi blir verdien i produkter, materialer og ressurser opprettholdt i økonomien så lenge som mulig, og generering av avfall minimeres (EU-kommisjonen, 2015).
	Tech Readiness Level	Et uttrykk for hvor moden en teknologi er for implementering i markedet, gjerne målt på hvilket utviklingsnivå teknologien befinner seg på, med bakgrunn i et mål om å realisere evnen til å skalere teknologien opp til et industrielt nivå (EU-kommisjonen, 2019).
	Zero Waste	Et prinsipp som bygger på en konservering av ressurser gjennom ansvarlig produksjon, forbruk, ombruk og gjenvinning av produkter, emballasje og materialer uten forbrenning og uten utslipp til land, vann eller luft som truer miljøet eller menneskers helse (ZWIA, 2018).

1. Introduksjon

FNs bærekraftsmål er blitt selve varemerket for verdenssamfunnets ønske om en felles utvikling mot en bedre fremtid, for både dyr, miljø og mennesker. Bærekraftssymbolet vises stolt fram i de fleste bransjer og arenaer der grønn og bærekraftig utvikling står høyt på agendaen. Men symbolet i seg selv er ikke nok. Faktum er at vi i dag bruker 12,2 tonn av jordens materielle ressurser per innbygger, noe som på sikt bryter med jordens tåleevne (Steffen et al., 2015). Dette tallet ble lagt fram av det internasjonale ressurspanelet i en rapport av situasjonen slik den var i 2019 (IRP, 2019). Samlet har verdens befolkning doblet seg siden 1970-tallet, mens den globale BNP har økt med det firdobbelte (UNEP, 2016). Dette har krevd store mengder ressurser for å drive økonomisk vekst og velstand, og medført det største uttaket av jomfruelige råvarer noensinne (IRP, 2019). Det er ventet at jordens befolkning vil øke med ytterligere to og en halv milliard til ti milliarder totalt innen 2060, samtidig med et unisont og definert mål om at fattigdom og urettferdig fordeling av ressursene skal elimineres. Dette krever at ressursbruken må snus, og at ressurseffektivitet må introduseres i utstrakt grad globalt for å dempe verdensbefolkningens totale belastning.

I Europa er det EU som setter målsetningene og som er førende for den nasjonale politikken. De har satt ambisiøse og nødvendige mål for både kutt av klimagassutslipp og sirkulær økonomi. Disse er inkludert i rammeverk som medlemsland av EU og EØS har forpliktet seg til å implementere på nasjonalt nivå og i egen politikk (Utenriksdepartementet, 2018). De senere tids strategipakker, med det seneste tilskuddet kalt for «European Green Deal», legger klare føringer for samfunnsutviklingen i tiårene fremover (EU-kommisjonen, 2020).

European Green Deal er en strategipakke som ble vedtatt i desember 2019, med det formål å gjøre overgangen til et bærekraftig samfunn på en rettferdig måte slik at alle kan ta del i nytten uten at det går utover de vanskelig stilte. Strategipakken dekker områder som bærekraftig ressursbruk, utslippskutt, investeringer i grønn og bærekraftig innovasjon, samt vern av natur og miljø. Inkludering og innsats fra både beslutningstakere og innbyggere blir nødvendig for å nå det overordnede målet om å bli verdens første klimanøytrale kontinent innen 2050. Det er i strategipakken satt fokus på klima, energi og rene, sirkulære verdikjeder.

Vindkraft er stadig mer på agendaen i den europeiske klima- og energipolitikken, samtidig som den i Norge og flere europeiske land er gjenstand for en polarisert samfunnsdebatt. Blant forskere anses vindkraft som en av de reneste (Paulillo et al., 2019; Raadal et al., 2011; Turconi et al., 2013; Vujic et al., 2012) og billigste (IRENA, 2019) teknologiene for å forsyne samfunnet med elektrisitet. Samtidig er

det materialer i vindturbinen som per i dag ikke har gode systemer for resirkulering. Ett av disse er de glassfiberarmerte plastkomposittene (GFK) i vindturbinbladene. Løsninger for å gjøre disse produktene mer sirkulære vil medføre at vindkraften blir enda renere, og mer i tråd med målene om bærekraftig utvikling (FN-sambandet, 2019).

Den europeiske bransjeorganisasjonen for vindkraft, WindEurope, overvåker utviklingen av vindkraft i Europa, og rapporterer årlig hvordan situasjonen fremstår. Den siste rapporten ble utgitt vinteren 2020 og beskriver statusen for vindkraft i Europa slik den var ved utgangen av 2019. Da var den installerte effekten for vindkraft i Europa på 205 GW. Vindkraften stod for om lag 15 % av EUs totale forbruk av elektrisitet (Walsh, 2020). I rapporten ble det funnet at 178 MW av vindkapasiteten ble nedlagt i løpet av 2019, til forskjell fra 421 MW året før (Walsh & Pineda, 2019). De som bygde ned mest var Tyskland, Østerrike og Danmark. Mye av kapasiteten som legges ned er med den hensikt å forbedre anleggets kapasitet gjennom å installere nye og mer effektive vindturbiner. Slike prosjekter gjennomføres oftest i Tyskland, mens det i 2019 var flere reetableringer også i Østerrike, Hellas og Storbritannia.

I Norge er vindkraften forholdsvis ung sammenliknet med andre europeiske land. Det er til nå ingen større vindkraftverk (>10 MW) som har nådd sitt siste driftsår, og derfor har vi nesten ingen praktiske erfaringer med å avvikle og håndtere avfall fra slike anlegg (NVE, u.å.). Et unntak er Hundhammerfjellet der driftsansvarlig og medeier NTE Energi AS måtte avvikle store deler av sitt vindkraftverk midt i driftsfasen, grunnet driftsutfordringer og konkurs hos turbinleverandøren. Blant turbinene som nå er fjernet ble én turbin nedlagt i 2012, tre turbiner ble tatt ned i 2017, mens ytterligere syv turbiner ble avviklet i 2019 som en del av reetableringen av vindkraftanlegget. Fjerningen av samtlige vindturbiner ble ifølge NTE Energi utført gjennom «kontrollert velting», unntatt den ene demonstrasjonsturbinen fra Vestas som ble montert i 1998. Det meste av materialene vindturbinene bestod av ble sendt til gjenvinning, mens turbinbladene ble sendt til deponering (Holstad, 2019).

Norges vassdrags- og energidirektorat (NVE) er en myndighetsutøvende aktør som blant annet har ansvar for å forvalte landets vann- og energiresurser, overvåke kraftforsyningen, samt å gi tillatelser til utbygging av nye kraftverk gjennom konsesjonsordningen. Ifølge NVE ble det produsert 5,5 TWh elektrisk strøm fra vindkraft i Norge i 2019 (NVE, 2020). Dette tilsvarer å forsyne 343 750 husholdninger med et årsforbruk av elektrisitet på 2016-nivå (SSB, 2018). Den samlede installerte effekten ble funnet til å være 2,4 GW, og det var 800 vindturbiner i drift. Av den totale installerte effekten ble 32 % ferdigstilt i løpet av 2019, hvorav ett av kraftverkene gjennomførte en reetablering. For den totale kraftproduksjonen i Norge samme år stod vindkraften for om lag fire prosent. Vindkraftbransjen er i kraftig vekst i Norge og det er forventet at 16 nye vindkraftverk vil settes i drift i løpet av 2020, noe

som tilsvarer 1,6 GW. I 2019 ble anleggene installert med turbiner av en gjennomsnittlig størrelse på omtrent 4 MW (NVE, u.å.). Om vi forutsetter det samme for 2020 vil de planlagte vindkraftverkene installere 400 nye vindturbiner, og 1200 nye vindturbinblader (NVE, 2020). Ved inngangen av 2020 var 42 vindkraftanlegg bygget og iverksatt i Norge. 31 av disse hadde en installert effekt på over 10 MW. Av NVE sin oversikt kan det stadfestes at seks konsesjonærer må avhende vindturbiner i sine anlegg innen 2030 (NVE, 2019).

Det finnes i dag klare retningslinjer for håndtering av avfall. Avfallsdirektivet ble vedtatt av EU i 2008 (EU-kommisjonen, 2008), og senere revidert i 2018 (EU-kommisjonen, 2018). Dette rammeverket legger føringer for hvordan aktører i EU og EØS skal ta hånd om avfall i sine virksomheter. Et av prinsippene som ble presentert i direktivet påpeker at avfall skal håndteres uten å være til fare for mennesker eller til skade for natur og miljø. Videre skal samfunnet gjøre sitt ytterste for å hindre at avfall oppstår, og når det faktisk oppstår så skal det håndteres i en prioritert rekkefølge: Forberedelse for ombruk, materialgjenvinning, energigjenvinning og deponering. Det kommer av direktivet at energigjenvinning ikke skal anses som resirkulering. Denne prioriterte rekkefølgen kalles i direktivet for avfallshierarkiet, og av denne vises det at resirkuleringsgraden for en bedrift eller et produkt gir et godt estimat på hvor godt disse bidrar til å oppnå direktivets målsetning. For den europeiske vindkraftbransjen rapporterer WindEurope at vindturbinen har en resirkuleringsgrad på mellom 85 og 90 %, og at ønsket om å oppnå en fullstendig resirkuleringsgrad står høyt på agendaen (WindEurope, 2020). Turbinleverandørene Siemens Gamesa og Vestas har lagt ned strategiske veikart for å sørge for en bedre avfallshåndtering og en høyere resirkuleringsgrad for sine vindturbiner i årene som kommer.

Vestas hadde en markedsandel på 18 % i 2019, og er dermed blant de største leverandørene av vindturbiner globalt (Henze, 2020). I januar 2020 offentliggjorde Vestas fire bærekraftsmål for egen virksomhet som et tilsvarende til deres bærekraftsrapport for 2019 (Vestas, 2020). Ett av disse gikk ut på å levere «Zero Waste»-vindturbiner (se definisjon i Tabell 1) på markedet innen 2040. Deres vindturbiner er per i dag 85 % resirkulerbare, mens turbinbladene og navet består av ikke-gjenvinnbare plastkompositter. Delmålene som legges til grunn på veien dit er å øke gjenvinningsgraden på disse komponentene fra 44 til 50 % innen 2025, og til 55 % innen 2030. Videre skal de støtte og implementere initiativer som kan sørge for gode håndteringsløsninger for eksisterende turbinblader. For å bygge opp nødvendige verdikjeder som må til for å nå hovedmålet om Zero Waste, skal de innen to år utvikle og implementere en ny avfallsstrategi for selskapet. På denne måten setter Vestas standarden for de andre leverandørene, og går foran for vindkraftbransjen som helhet.

En av de nevnte utfordringene for Vestas var vindturbinbladene. Et vindturbinblad er komplisert å gjenvinne da det er en kompositt, og består tradisjonelt av materialer som glassfiber, harpiks og plastbelegg/film. Kompositter kjennetegnes ved at en rekke materialer er sammenføyd på en slik måte at det er vanskelig å adskille disse i gjenvinningsfasen (Jensen & Skelton, 2018). I USA har det lenge vært vanlig å deponere disse, men det tar svært lang tid før disse materialene er fullstendig nedbrutt (Edgren, 2019). Tyskland har siden 2005 hatt et forbud mot deponering av komposittmaterialer, og flere europeiske land forventes å følge etter (Cherrington et al., 2012). Det er blant livsløpsanalyser av vindkraftverk, slik som Guezuraga et al. (2012), blitt poengtert at en form for resirkulering av turbinbladene vil gjøre vindkraften enda mer miljøvennlig. Dagens operative turbinblader er på alt fra 30 til 100 meter avhengig av om de står på land eller til havs, samt hvor i teknologiutviklingsløpet de er produsert. Størrelse og form medfører høye transportkostnader, lav transportfleksibilitet og at klimagassutslippene tilknyttet transportfasene i et vindkraftprosjekt er høye. Da er det behov for gode systemer og verdikjeder som kan forsvare disse kostnadene ved å gi en større grad av nytte for samfunnet og naturen, og at de norske prosjektlederne gjør gode valg i tråd med EUs politikk når det kommer til avfallsbehandlingen ved prosjektets slutt.

For å legge opp til gode håndteringsvalg er det behov for mer kunnskap rundt denne utfordringen. Det finnes per i dag ingen norsk sammenstilling av kunnskap omkring dette temaet. Denne studien har til hensikt å kartlegge dagens situasjon i Norge, og sammenstille dagens empiriske kunnskap om behandling av komposittmaterialene i vindturbinbladene. Som en forlengelse av dette skal utvalgte løsninger for håndtering av turbinbladavfall sammenliknes. Gjennom dette kan de aktuelle aktørene i både vindkraft- og komposittbransjen få en økt forståelse rundt emnet, samt inspirere til nye, innovative løsninger slik at norske aktører kan bidra til at EU når sitt mål om et klimanøytralt Europa innen 2050 gjennom å forvalte naturens ressurser på en bedre måte.

2. Mål og problemstilling

Med et formål om å adressere mulighetene for en bærekraftig håndtering av vindturbinbladene ved endt livsløp, må bransjens tilnærming mot denne utfordringen i dag identifiseres. Med en definert sluttdato i konsesjonen et kraftverk er tilegnet er det nødvendig å kunne legge en helhetlig avfallsplan og en strategi for avviklingsfasen. For å være i stand til dette må avfallsbesitteren ha kunnskap om hvilke muligheter den har tilgjengelig og hvert enkelt systems tilhørende økonomiske og miljømessige verdi. For å treffe på disse to interessepunktene har oppgaven følgende problemstilling:

Hvilke utfordringer og muligheter er gjeldende for ombruk og resirkulering av materialer fra vindturbinblader, i hvilken grad er bransjen opptatt av å utvikle sirkulærøkonomiske løsninger, hva er dagens praksis på området, og hva er den økonomiske og miljømessige nytten av de ulike løsningene?

Denne problemstillingen ble forsøkt besvart gjennom tre adskilte forskningsspørsmål:

1. *Hvilke kriterier blir lagt til grunn ved design og prosjektering av vindparker i dag med tanke på nedleggingsfasen, og hvilke konkrete planer foreligger for anlegg som skal demonteres innen 2030? Hva er den gjennomsnittlige utskiftningsraten gjennom turbinenes levetid?*
2. *Hvordan kan turbinblader ombrukes eller resirkuleres med dagens tilgjengelige og nært realiserbare gjenvinningsteknologi, hvordan vil verdikjedene for ombruk og gjenvinning fungere og hvilke anvendelsesmuligheter har de resulterte materialene?*
3. *Med Guleslettene Vindpark som case: Hva er kost/nytte-vurderingen av energiutnyttelse, ombruk og materialgjenvinning av komponenter fra anleggets turbinblader, både økonomisk og miljømessig, ved alternative behandlingsmetoder?*

Studiens begrensninger

Masteroppgaven ble skrevet over en fem måneders periode, og dette gir sin begrensning på hvor dyptgående den kan favne de forskjellige forskningsspørsmålene. Den tilgjengelige tiden vil alltid ha en påvirkning på resultatenes kvalitet.

Tilgjengeligheten på data var en utfordring da dette temaet til tross for et økende fokus de siste årene, ikke har fått fullt gjennomslag i vindkraftbransjen ennå. I tillegg er den norske vindkraftbransjen forholdsvis ung sammenliknet med andre land, som blant andre USA, Danmark og Tyskland.

3. Kunnskapsgrunnlag

3.1. Omfang av fremtidige avfallsstrømmer

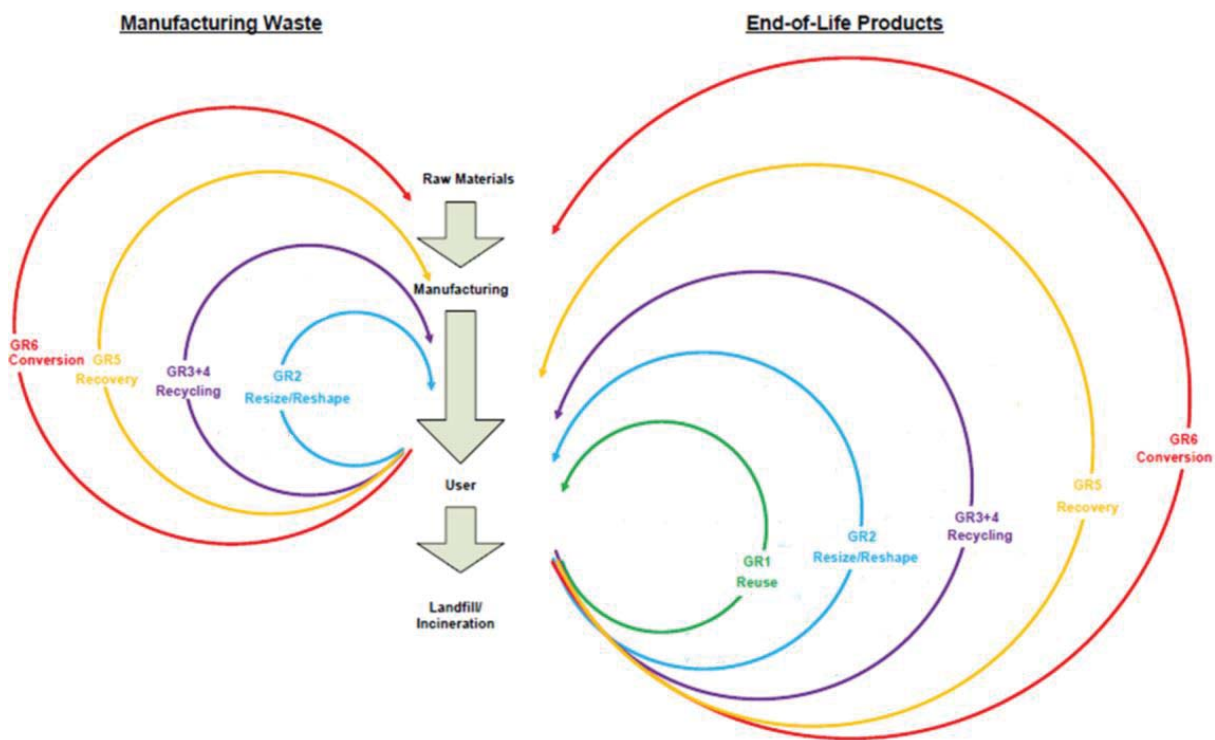
Liu og Barlow (2017) gjennomførte en studie der de estimerte hvor mye vindturbinbladavfall det vil bli generert globalt fram mot 2050. Her ble faktorer som gradvis økning av turbinstørrelse (i tråd med teknologiutvikling), variasjon mellom geografiske regioner og avfallsgenerering over hele livsløpet inkludert, til forskjell fra tidligere studier. En rekke scenarier ble etablert for å få et mer utvidet bilde av omfanget, og resultatet ved en moderat vekstrate og moderat levetid ble totalt 43,4 millioner tonn. Avfallsstrømmen ut fra avviklede vindkraftverk globalt vil trolig ligge på mer enn 2 millioner tonn per år i 2050.

Stadig flere turbinleverandører velger å substituere deler av glassfiberen med karbonfiber i sine kompositter, da karbonfiber har fordelaktige egenskaper og har større verdi som et resirkulert produkt. Lefeuvre et al. (2019) har forsøkt å estimere mengden karbonfiberarmerte plastkompositter (KFK) som befinner seg i omløp fram til og med 2050. En inkludering av karbonfiber i sammensetningen gjelder kun nyere turbinbladmodeller, slik at det tar et blads levetid før disse ender opp som avfall. I Lefeuvre et al. (2019) ble det rapportert at karbonfiber stod for 6 % av den totale materialmassen som tilføres i produksjonen av et vindturbinblad. Med en estimert vekstrate for installert vindkraft lik 11,8 % mellom 2018 og 2025, ble det forventet at det er tilnærmet 483 000 tonn KFK i omløp globalt i 2050.

3.2. Metoder for avfallsbehandling

En rekke forskningsaktiviteter har blitt etablert og gjennomført det siste tiåret for å imøtekomme omfanget av turbinbladavfall i årene som kommer. Et eksempel på dette er GENVIND-konsortiet i Danmark som mellom 2012 og 2016 studerte vindturbinblader og de mulige anvendelsene for ombruk, gjenvinning og andre former for resirkulering ved endt livsløp. Funnene fra de mange studiene utført av konsortiet ble sammenstilt i Jensen og Skelton (2018). Her ble de presentert i en modifisert utgave av Ellen MacArthurs sirkulærøkonomiske diagram, se Figur 1. Underveis i prosjektet ble det oppdaget at også produksjonsavfall kan benyttes til diverse resirkuleringsformål. De alternative resirkuleringsmetodene er gradert etter hvilken grad de leverer i tråd med de sirkulærøkonomiske prinsipper. De indre sirklene er av høyest verdi, men alle behandlingsmetoder er å foretrekke foran metoder som deponi og forbrenning der materialene forspilles. De forskjellige sirklene er gruppert slik fra innerst til ytterst:

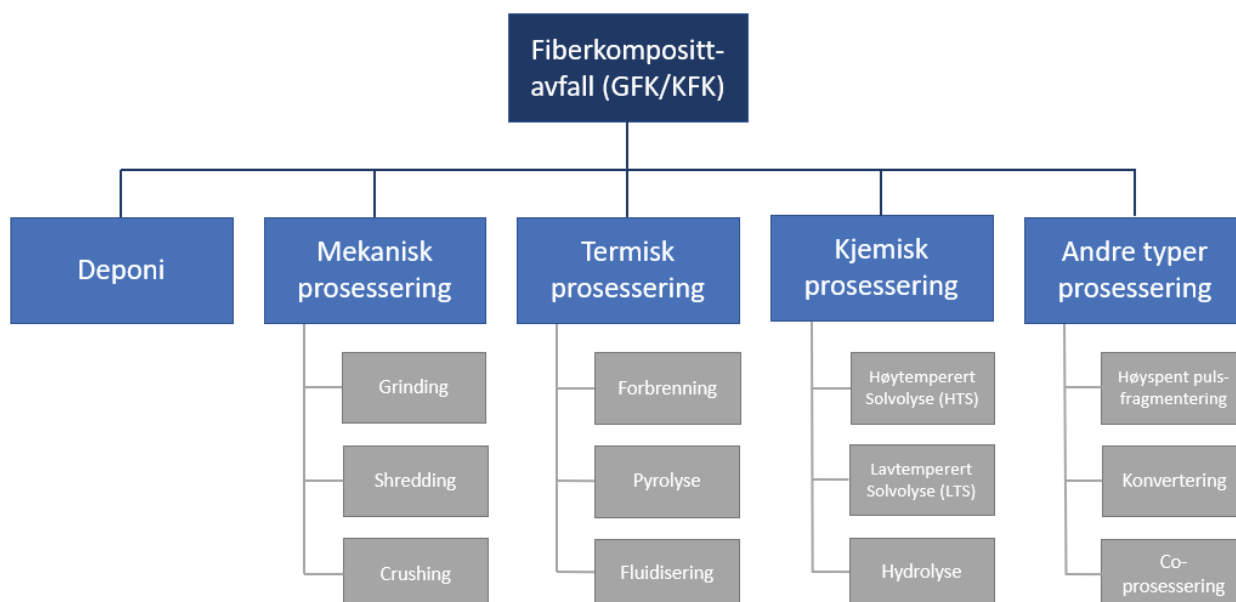
1. Ombruk av komponenter til kraftproduksjon
2. Omforming og deretter ombruk til nye formål
3. Resirkulering
4. Gjenvinning
5. Konvertering



Figur 1: Vindturbinbladets behandlingsmetoder presentert i et sirkulærøkonomisk diagram, der de indre sirkelene har høyest verdi i et sirkulærøkonomisk perspektiv (Jensen & Skelton, 2018).

Det finnes i dag opptil flere metoder for å behandle komposittavfallet fra vindturbinbladene ved endt bruk, identifisert av GENVIND-konsortiet og av en rekke andre studiestudier. De forskjellige metodene varierer når det kommer til energibehov og systemkostnader, så vel som kvaliteten på fibre i materialene ved endt prosessering. Desto høyere kvalitet en klarer å bevare i fibre, jo høyere verdi vil disse ha for videre bruk. Noen prosesser har nådd en industriell skala, mens andre forskes ennå på i laboratorier. Det er kun enkelte prosesser som klarer å gjenvinne harpiksen og bindemiddelet i kompositten. Dette gir en ekstra verdi til prosessen fra et bærekraftig perspektiv, både økonomisk og miljømessig. Enkelte prosesser kan også utvinne andre biprodukter, som øker verdien ytterligere. De termiske anleggene kan installere og benytte varmegjenvinningsteknologi, og i så måte begrense behovet for og kostnader til oppvarming. Avveilingen må tas mellom mengden installert teknologi for flere og mer verdifulle produkter opp mot den tilsvarende økte prosesseringskostnaden.

I Figur 2 er komposittavfallets ulike behandlingsmetoder fremstilt. De mest relevante behandlingsløsningene som vi vet om i dag er listet opp kronologisk i avsnittene som følger. Disse følger en økende sirkulærøkonomisk verdi, jamfør definisjonen i Tabell 1, og slik van Oudheusden (2019) og Jensen og Skelton (2018) fant det i sine studier.



Figur 2: Oversikt over forskjellige behandlingsmetoder og de tilhørende teknologiske eller metodiske varianter for GFK og KFK.

3.2.1. Deponering

Å deponere avfall vil si å gi det en forsvarlig sluttbehandling (LOOP, 2018). Ved deponering blir turbinbladene om nødvendig oppdelt i biter for transport og deretter plassert i et deponianlegg. Grad av forbehandling kommer an på deponiets og transportmiddelets krav, men ofte blir det sendt til en shredder (oppmalingsmaskin) (Miceli, 2019). Ved oppmaling vil turbinbladene ta mindre plass enn om de deponeres hele eller i oppdelte biter. Ramirez-Tejeda et al. (2017) hevder at det tar flere hundre år å bryte ned vindturbinbladet i et deponi, grunnet harpiksens resistente egenskaper. Fra 1. juli 2009 ble det innført et forbud mot å deponere biologisk nedbrytbart avfall i Norge (Miljødirektoratet, 2019). Dette kan ha betydning for vindturbinblader som kan inneholde trevirke, naturlige fibre og annet organisk materiale.

Deponering har lenge vært én av de to foretrukne metodene for behandling av vindturbinblader, gjennom den lave avhendingskostnaden sammenliknet med andre metoder. Denne behandlingsmetoden kan være kostbar i land med skatter og avgifter på deponering, og er uaktuell i

land som har et forbud mot deponering av komposittmaterialer. Deponert materiale bærer også en alternativkostnad i form av bladenes iboende energi og materialer, hvor potensialet for gjenvinning blir liggende uutnyttet (Ramirez-Tejeda et al., 2017). Det forventes at lovgivningen globalt vil bli strengere på deponering av komposittmateriale fremover, noe som vil gjøre deponering en stadig mer uønsket metode for behandling av turbinbladavfall (Miceli, 2019).

3.2.2. Forbrenning med energiutnyttelse

Den andre metoden som lenge har vært foretrukket for å avhende vindturbinblader er å sende dem til et forbrenningsanlegg. I land der deponering er forbudt har man mikset komposittavfall med husholdningsavfall ved innmatingen, med en komposittandel på 10 %. Siden glassfiber er ildfast vil brennverdien til GFK avhenge av mengden polymerer (Pickering, 2006). Forbrenningsprosessen holder gjerne en temperatur på over 800 °C. I likhet med deponering er det nødvendig med forbehandling i form av shredding, da forbrenningsovnene ikke kan motta større komponenter (Miceli, 2019). De organiske substansene konverteres til aske, røykgass og energi. Behandlingen er problematisk fordi den produserer toksiske gasser, og at glassfiberstøv i røykgassen kan skape utfordringer for anleggenes filtreringssystemer. I tillegg vil rundt 60 % av komposittavfallet som forbrennes ende opp som forurenset bunnaske som likevel må deponeres (Larsen, 2009). Disse utfordringene samlet gjør at denne metoden av mange blir sett på som uaktuell.

3.2.3. Kjemisk konvertering

Ved en konverteringsprosess blir kompositten konvertert til verdifulle kjemikaler der gjenværende materialer fremstår som et biprodukt. Gjennom GENVIND-prosjektet klarte man å omdanne GFK til en olje med høy brennverdi, og deretter utvinne fiber uten spor av harpiks fra den gjenværende substansen. Oljens brennverdi lå på 40 MJ/kg, noe som gjør den sammenliknbar med kommersiell bioolje. Fibrene hadde en strekkfasthet på høyde med jomfruelige fibre, der strekkfasthet er et mål på materialets evne til å tåle påkjenningen ved strekning i lengderetning. Testene er foreløpig i laboratorier, og avventer pilottesting. Utfordringene ved konvertering er høye krav til temperatur under prosessering, samt forbehandling der komposittene må være kuttet opp i mindre deler (Jensen & Skelton, 2018).

3.2.4. Mekanisk resirkulering

Mekanisk prosessering av vindturbinblader benyttes som en delprosess for flere behandlingsmetoder for å degradere størrelsen på GFK. Det finnes en rekke type maskiner som kan utøve slike tjenester, og

typene varierer i form av hastighet, teknisk funksjon og hvilke tekniske komponenter maskinen består av. Hammermølle (crusher), shreddere og grindere er blant de mest brukte, der turbinbladet knuses, kuttes, kvernes eller pulveriseres. Valg av maskin avhenger av ønsket egenskap på det behandlede produktet. Det er oppdaget et problem ved behandling av GFK i maskiner som ikke er bygget for dette, da glassinnholdet fører til økt slitasje på maskinene (Jensen & Skelton, 2018).

Mekanisk resirkulering er en metode som utøves gjennom en stegvis prosess, der GFK først rives til mindre biter i en shredder, så kvernes eller knuses i en grinder før den til slutt klassifiseres ved hjelp av en syklon eller en sikt. Hensikten er å grovt adskille fibre og harpiks, og tidlig i prosessen fjernes også metaller fra massen. Selv om syklon og sikt kan klassifisere fibre og pulver etter homogene størrelser vil det nesten alltid dannes en blandet masse av både fiber og harpiks. Produktet fra prosessen kan i hovedsak benyttes som fyllmateriale i byggematerialer som sement, betong og mørtel. De mekaniske egenskapene til fibrene er sterkt redusert ved mekanisk behandling, og de resirkulerte produktene fra prosessen har derfor en lav verdi (Chen et al., 2019; Oliveux et al., 2015; Pickering, 2006).

Støvet som oppstår ved for eksempel grinding er påvist å skade lungene ved inhalering, og kan derfor forårsake effekter på menneskers helse (Ramirez-Tejeda et al., 2017). Støvoppsamlingstiltak er derfor nødvendig for å forebygge uheldige konsekvenser ved bruk av denne behandlingsmetoden.

3.2.5. Co-prosessering

Denne behandlingsmetoden er utviklet av den tyske bedriften Geocycle. Vindturbinbladenes lengde kuttes ned til deler på ti meter ved vindkraftanlegget, forbehandles så mekanisk hvor automatiserte sager kutter størrelsen ned til én meter, før shreddere kutter bladene videre til stykker med en lengde på under 50 mm. Metaller tas ut av materialstrømmen ved hjelp av magneter (Schmidl et al., 2010). Sikkerheten for involverte arbeidere optimaliseres ved bruk av støvabsorbenter som vann i oppkuttingsprosessene både på vindkraftanlegget og i forbehandlingsanlegget. Produksjonslinjen i forbehandlingsanlegget består av innkapslede og helautomatiserte maskiner, og ventileringsiltak i anlegget sørger for at det ikke oppstår eksplosjonsfare. Den oppmalte glassfiberen føres så til et sementproduksjonsanlegg der den tilføres en kalkovn ved hjelp av skruer og transportbånd for å kalkbrenne råmaterialet. Ved en temperatur på 900 °C brenner harpiksen, og transformerer fibrene til aske (Miceli, 2019). Asken innkapsles i klinkermassen, og etter brå kjøling skapes klinkerproduktet. Klinkeren blir tilført gips og miksen kvernes deretter til sement. Sementen har tilnærmet like egenskaper som kommersiell sement.

3.2.6. Fragmentering ved hjelp av stadige elektriske høyspenningspulser (SEH)

Dette er en elektrokjemisk prosess som bruker elektrisitet for å separere polymerstrukturene fra fibre. Dette utføres gjennom repeterende utladninger i en dielektrisk væske, som oftest vann. Metoden har opphav fra gruvedrift hvor den ble benyttet til å fragmentere stein for å lettere utvinne høyverdige mineraler og krystaller, slik som i gullgraving (Mativenga et al., 2016). Når SEH benyttes på GFK blir materialene fragmentert til mindre deler, noe som frigjør fibre fra resten av kompositten. Denne metoden er i likhet med mekanisk resirkulering meget energiintensiv, og det gjelder å operere på en maksimal kapasitet for å utnytte maskinens grunnleggende energibruk. Sluttresultatet er knuste og adskilte massepartikler av hvert enkelt materiale, til forskjell fra mekanisk behandling da alt samles i en blandet pulverisert masse. Fibrene har også en lenger fiberlengde, som gir dem en høyere verdi til anvendelsen i neste ledd.

3.2.7. Pyrolyse

Pyrolyse er en termisk prosess i fravær av oksygen, hvor den behandlende massen dekomponeres. Ved pyrolysing av vindturbinblader føres komposittene inn i et kammer som styres til temperaturer mellom 300 og 800 °C, noe som resulterer i at polymerstrukturen fjernes fra fibre. Med riktig temperering og optimalisert oppholdstid i kammeret vil lange fibre kunne gjenvinnes med bøyelige egenskaper på linje med jomfruelige fibre. Om prosessen styres til en høyere temperatur enn 1000 °C senkes prosesseringstiden, men fiberkvaliteten vil samtidig svekkes betraktelig (Yang et al., 2012). I tillegg til fibre vil kompositten degraderes til oljevæske, gass og et kullholdig restprodukt (Pickering, 2006). Denne behandlingsmetoden er per i dag noe mer økonomisk gjennomførbar for KFK enn for GFK grunnet den høyere verdien for det resirkulerte KFK-produktet (Kalkanis et al., 2019). Prosessen krever en mekanisk forbehandling for å løse avveilingen mellom fjerning av bindemiddel og bruken av lavest mulig temperatur for å hindre fiberslitasje (Jensen & Skelton, 2018).

3.2.8. Fluidisering

En annen form for termisk prosessering er fluidisering. Her benyttes luft som en varmebærende gass gjennom et partikkelsjikt i en fluidiseringsreaktor. I den mekaniske forbehandlingen brytes komposittene ned til små pellets (20-30mm) og tilføres så reaktoren på et lag med fin sand, der sanden fluidiseres ved tilførselen av varm luft. Sandlaget dekomponerer polymerstrukturen, deretter samles fiber og annet fibermateriale opp av luftstrømmen og transporteres videre, før det avslutningsvis separeres ved bruk av en syklon. Reaktoren oppnår temperaturer på mellom 450 og 550 °C under

prosessen, og fluidiseringens hastighet varierer mellom 0,4 og 1 m/s. Studier viser en merkbar degradering av glassfiberens egenskaper som for eksempel slitestyrke, som reduseres med minst 50 % (Pickering, 2006). For å ha et økonomisk levedyktig fluidiseringsanlegg, må anlegget ha en prosesseringskapasitet på mer enn 10 000 tonn per år om det er GFK som behandles. For KFK er kravet noe lavere (Kalkanis et al., 2019).

3.2.9. Mikrobølgeassistert pyrolyse (MAP)

Denne behandlingsformen følger det samme prinsippet som vanlig pyrolyse, men den konvensjonelle oppvarmingskilden er erstattet med mikrobølgestråling. Harpiksen blir varmet opp gjennom absorbering av mikrobølgeenergi fra fibrene (Chen et al., 2019). Harpiksen dekomponeres raskere gjennom denne metoden, noe som reduserer tids- og energiforbruk. Denne prosessen er mer energieffektiv enn andre termiske prosesser, og er lettere å kontrollere (Oliveux et al., 2015). MAP passer særlig godt til behandling av KFK, vist gjennom Obunai et al. (2015) som klarte å fjerne harpiksen fullstendig ved bruk av mikrobølgestråling tilsvarende 700 W, 2.45 GHz i en inert atmosfære av argon.

3.2.10. Solvolyse

Ved kjemisk resirkulering dekomponeres polymerstrukturene ved å dra nytte av de kjemiske egenskapene til et løsemiddel under oppvarmede forhold. Denne form for prosessering kalles ofte for solvolyse. Her benyttes høytemperert solvolyse (HTS), lavtemperert solvolyse (LTS) og hydrolyse. Ved HTS føres løsemiddelet til en såkalt superkritisk fase, hvor reaktoren har en temperatur på over 200 °C og er under høyt trykk. Ved LTS holdes temperaturen under 200 °C og ved et lavt trykk, hvor substansen må røres under prosessen. Ved hydrolyse benyttes kun vann. Metoden har gitt gode resultater på laboriestediet, der både fibre og harpiks kan gjenvinnes fullstendig og fibreens egenskaper er godt ivaretatt. Solvolyse tilbyr en rekke muligheter med bakgrunn i et bredt spekter av løsemidler, temperaturer, trykk og katalysatorer. Solvolyse krever lavere temperatur enn pyrolyse for å degradere harpiksen (Oliveux et al., 2015). Ulempen med denne behandlingsmetoden er at de fleste løsemidler er toksiske, og har en høy pris (Chen et al., 2019). Superkritiske forhold krever robuste anlegg som er kostbare å installere. Sokoli et al. (2017) viste at ombruk av løsemiddelet kunne være behjelpende på den høye kostnaden, og maktet å resirkulere diverse løsemidler åtte ganger med lovende resultater.

3.2.11. Ombruk

Som tidligere vist i Figur 1 vil ombruk av komponentene, og dermed en forlengelse av materialenes livsløp i den opprinnelige strukturen, gi høyest verdi. Det kreves god kunnskap om turbinbladenes

tilstand for å muliggjøre de varierte former for ombruk, og dette krever en implementering av smarte overvåkningsløsninger og innsamling av kvalitetssikret dokumentasjon av de driftsansvarlige. Er turbinbladene av tilstrekkelig kvalitet kan de benyttes til formål som ny kraftproduksjon, broer, lekeplasser og urbant møblement (Jensen & Skelton, 2018).

3.3. Teknologisk modenhet

Ierides et al. (2019) utførte en vurdering av de forskjellige teknologiene som er mest aktuelle for resirkulering av vindturbinblader. En sammenstilling av deres funn kan leses av Tabell 2, der det teknologiske modenhetsnivået (TRL) for hver enkelt resirkuleringsteknologi er skalert fra 1 til 9 slik EUs Horizon 2020-prosjekter har definert dem (EU-kommisjonen, 2019). Ved 1 er grunnleggende prinsipper kun observert og ved 9 er det utviklet et system som har bevist sin funksjonalitet og levedyktighet i operasjonell form. Her ser vi at det kun er pyrolyse som har nådd modenhetsnivå 9 for KFK, mens det finnes flere modne teknologier for GFK. Blant disse tre er co-prosessering i en sementklinker, som kun er aktuelt for glassfibre, og ikke for karbonfibre. Dette begrunnes med at det er kun GFK, og ikke KFK, som har en mineralsammensetning som kan sammenliknes med tilsetningsstoffene i sementen. Stadig mer hybride kompositter med innslag av både karbonfiber og glassfiber kan derfor medføre at denne avhendingsløsningen ikke vil være aktuell i framtiden.

Tabell 2: Oversikt over funn fra en studie om «Tech Readiness Level» for de mest relevante teknologiene tilknyttet behandling av avfall fra vindturbinblader (Ierides et al., 2019).

Behandlingsmetode	TRL for GFK	TRL for KFK	Input						Output					
			GFK	KFK	EL	Gass	Vann	Kull Kalkstein Leire	Fiber	Fiberpulver	Gass	Vann	Kjemikalier	Øvrig
Mekanisk grinding	9	6/7	x	x	x				x	x				Avfall
Pyrolyse	9	9	x	x	x	x			x		x		x	
Mikrobølgepyrolyse	4/5	4/5	x	x	x	x			x		x		x	
Co-prosessering (Sement klinker)	9	-	x		x			x			x			Klinkermasse
Solvolyse	5/6	5/6	x	x	x		x		x		x		x	
SEH-fraktering	6	6	x	x	x		x		x			x		Avfall
Fluidisering	5/6	5/6	x	x	x	x			x		x	x	x	CO ₂ -utslipp

3.4. Oppsummering

Av dagens kunnskapsgrunnlag kommer det fram at det finnes flere løsninger GFK og KFK-avfall som oppstår ved avvikling av vindturbiner i norske anlegg. Det er konsensus om at behandlingsmetodene deponi og forbrenning innebærer utfordringer som gjør dem uønsket som en håndteringsløsning for GFK- og KFK-avfall. Avfallsstrømmene globalt vil øke i takt med økt utbygging, og både GFK og KFK vil kreve et bredt spekter av behandlingsløsninger om vi skal unngå at det havner på deponi eller til forbrenning. Liu og Barlow (2017) fant at for GFK vil avfallsstrømmene fram mot 2050 ligge på 43,4 millioner tonn, mens Lefeuvre et al. (2019) estimerte at det vil være om lag 483 000 tonn KFK i omløp i 2050. Ifølge Jensen og Skelton (2018) er mekanisk resirkulering mer ettertraktet enn gjenvinning fordi det krever færre prosesseringssteg. Per i dag er det kun pyrolyse som har nådd det høyeste teknologiske modenhetsnivået for både GFK og KFK og derfor er klar til å skalere opp til en industriell skala. Ingen andre behandlingsløsninger er ifølge Lerides et al. (2019) modne nok til å prosessere KFK. Når det kommer til GFK er også mekanisk resirkulering og co-prosessering to behandlingsløsninger med en TRL på 9, og som derfor kan oppskaleres.

4. Metodikk, datagrunnlag og studieobjekter

I denne studien ble det benyttet ulike metoder og tilnærminger for å besvare problemstillingen best mulig. Samarbeidsbedriften Zephyr stilte lokaler, ansatte og intern dokumentasjon tilgjengelig for oppgaven. Videre var det vitenskapelige artikler og uformelle intervjuer med forskjellige aktører i verdikjeden, samt eksperter på kompositter, som la fundamentet for oppgaven. Det ble også utført to ulike analyser i løpet av oppgaven, som bidro til studiens resultater. Det ene var en spørreundersøkelse utstedt av prosjektgruppen, og det andre var en kost/nytte-vurdering basert på innsamlende data. Problemstillingen ble oppdelt i tre forskningsspørsmål, med hver sin unike kombinatoriske metode.

4.1. Metodikk

For å besvare det første forskningsspørsmålet ble dokumentgjennomgang, dybdeintervju og spørreundersøkelse kombinert for å innhente nødvendige data. Zephyrs prosjektdokumenter for Guleslettene Vindpark ble først gjennomgått, med blant annet møtereferater og skriftlige avtaler. Dokumentene ble tilgjengeliggjort gjennom Interaxo, selskapets dokumentasjons- og prosjektledelsesverktøy. Gjennomgangen av deres dokumentasjon ga viktige bidrag mot en bedre forståelse av dagens situasjon for, og holdning om, oppgavens tema. De fleste dybdeintervjuene i oppgaven ble gjennomført over Microsoft Teams, gjennom en invitasjon fra undertegnede. Enkelte foretrakk og ta det over telefon. Forberedelser ble gjort i forkant for å lede den uformelle samtalen inn på temaer som var av interesse for oppgaven. For det første forskningsspørsmålet ble NVE intervjuet om dagens premisser for avviklingsfasen og håndteringen av turbinblader i Norge, i tillegg til aktuelt arbeid på temaet. NVEs nettsider og offentlige dokumenter ble så gjennomgått for å identifisere dagens konkrete planer for nedleggelse av anlegg og vindturbiner. Avslutningsvis ble svar på et spørreskjema, utsendt gjennom forskningsprosjektet i samarbeid med Norsk vindkraftforening (NORWEA), benyttet for å innhente empiriske data fra bransjen. Spørreskjemaet ble utformet av Østfoldforskning i dialog med undertegnede og resten av prosjektgruppen, og deretter sendt til nasjonale vindkraftverkeiere og driftsoperatører. Dette spørreskjemaet ble klargjort gjennom NSD, *Norsk senter for forskningsdata*. Gjennom denne kombinasjonen av aktiviteter ble det første forskningsspørsmålet besvart.

For det andre forskningsspørsmålet ble et «state-of-the-art» litteraturstudie utført og benyttet til å besvare de tekniske mulighetene som finnes i dag for GFK og KFK, med et prioritert fokus på førstnevnte. Uformelle dybdeintervju ble utført slik som beskrevet i forrige avsnitt, her med forskjellige aktører og eksperter som har et nært forhold til de prioriterte komposittene. Blant disse var; to

internasjonale produsenter, to aktører som har erfaring med nedleggingsfasen og metoder for avvikling, tre aktører med en forretningsmodell forenlig med håndtering av vindturbinblader, tre eksperter på komposittmateriale, et personlig meddelt notat fra et ekspertmøte om nedleggingsfasen avholdt av det internasjonale energibyrået (IEA). Ekspertene på komposittmaterialer ble samlet til et felles møte initiert av prosjektgruppen, og i etterkant av møtet ble disse kontaktet på e-post av undertegnede. Gjennom dette ble skriftlige bidrag gitt, som siden er benyttet i besvarelsen av oppgaven. Den samlende informasjonen fra vitenskapelige artikler og intervjuer ble så systematisk gjennomgått og vurdert i henhold til kriterier om modenhet og utvikling. Basert på den sammenstilte informasjonen ble det eksemplifisert verdikjeder for ombruk og resirkulering.

I besvarelsen av det tredje forskningsspørsmålet ble det utført en kost/nytte-vurdering av Guleslettene Vindpark, hvor tre behandlingsløsninger for vindturbinblader ble gjennomgått og sammenliknet. De alternative løsningene ble valgt basert på kunnskap undertegnede tilegnet seg i utarbeidelsen av kunnskapsgrunnlaget, samt de øvrige forskningsspørsmålene. I analysen ble det fokusert på substitusjonseffektene ved å bruke turbinbladkomponenter og -avfall i hver enkelt behandlingsmetode, opp mot deponering som basisscenario. Beregningene ble gjennomført i dataprogrammet Microsoft Excel, og i forarbeidene ble de fleste data for klimagassutslipp simulert i modelleringsverktøyet SimaPro, i versjon 8.5.3.0. I dette verktøyet kan man variere simuleringer gjennom valg av database og beregningsmetode. For denne oppgaven ble ecoinvent 3.3 benyttet som database, og metoden for å beregne utslippene var IPCC 2013 GWP 100a. Metoden er utviklet av FNs klimapanel, og inneholder egendefinerte faktorer for globale oppvarmingspotensialer med 100 års tidshorisont. Øvrige data på utslipp og kostnader ble innhentet gjennom intervjuer og personlig meddelelse fra diverse aktører og eksperter for å kunne utføre en så relevant analyse som mulig.

4.2. Datagrunnlag

For å besvare oppgavens problemstilling var datainnsamling helt essensielt. Da det er liten grad av kunnskap i vindkraftbransjen om egne komposittmaterialer, ble resultater fra vitenskapelige artikler benyttet for å legge fundamentet for oppgavens datagrunnlag (13 artikler og to masteroppgaver). Videre ble empiriske data innhentet fra både norske og internasjonale eksperter på feltet. For kost/nytte-vurderingen ble databasen ecoinvent benyttet, viden anerkjent i forskning for bruk i miljø- og livsløpsvurderinger. Andre datakilder var offentlige rapporter, vedtaksdokumenter, informative nettsider og databaser, livsløpsvurderinger og personlig meddelelse over e-post. Dataene kan anses for å ha høy grad av relevans og diversitet.

I Tabell 3 er all personlig meddelelse som har gitt en form for bidrag til oppgavens besvarelse opplistet. Her er majoriteten blitt invitert til et uformelt intervju, men også muntlig meddelelse og tilsendt informasjon via e-post er lagt til i listen. I tabellen er det definert hvilke forskningsspørsmål hver enkelt person har bidratt til å besvare, samt en notetegnmarkør som benyttes i teksten for å markere hvor informasjonen er hentet fra. Blant leverandører ble representanter fra Vestas og Siemens Gamesa kontaktet, og selskapenes perspektiv og innstilling til problemstillingen bidro sterkt til undertegneds forståelse for produktets verdikjede. Blant myndigheter ble Jon Krogvold fra NVE intervjuet og herfra ble det mottatt flere bidragsytende dokumenter, blant annet et notat fra Jørgen Kochbach Kjøllings deltagelse på ekspertmøtet «*IEA Wind research task TEM96*» i regi av IEA og avholdt i november 2019.

Blant eksperter på komposittfeltet ble kunnskap meddelt av representanter fra henholdsvis Compotech, Borg-plast-net og FiReCo. Deres meddelelser ble innsamlet gjennom et samlet ekspertmøte underveis i prosjektet, og senere gjennom kontakt over e-post. Videre ble intervjuer holdt med to norske aktører med erfaring fra nedbygging og demontering av vindturbiner; NTE Energi og AF Decom. Aktører som anvender avfall fra GFK eller KFK i sin produksjon ble også intervjuet. Dette var representanter fra Geocycle, Ecofiber Recycling og Noranergy. Andre data relevant for definere statusen i bransjen og for å sette forutsetninger for analysedelen ble tilegnet gjennom kommunikasjon med Zephyr, Stena Recycling, Norges Rederiforbund, Geminor og Nordic Crane. Refleksjoner fra intervjuer og e-postveksling med RENAS, NORWEA, Miljødirektoratet, Tafjord kraftvarme, Fortum Waste Solutions Oy og konsesjonæren av Valsneset vindkraftverk ble benyttet, om ikke direkte i besvarelsen av forskningsspørsmålene.

Tabell 3: Oversikt over intervjuede personer og deres bidrag, samt personlig meddelelser (P.M.) i form av et ekspertmøtenotat, e-post og muntlig meddelelse.

Navn	Aktør	Tidspunkt for intervju	Støtter følgende forskningsspørsmål	Notetegn i tekst
Allan K. Poulsen	Vestas	09.03.2020	2 og 3	[1]
Jonas Pagh Jensen	Siemens Gamesa	18.03.2020	2 og 3	[2]
Jon Krogvold; Jørgen Kochbach Gjølting	NVE P.M. ekspertmøtenotat ^[3]	27.03.2020	1 2	[3] [4]
Vincent Teillier; Laure Blezat	Geocycle	31.03.2020	2 og 3	[5]
Martin Severin Løklingholm	Ecofiber Recycling	01.04.2020	2 og 3	[6]
André Reitlo	NTE Energi	02.04.2020	2	[7]
Paal Arne Sellæg	AF Decom	15.04.2020	2	[8]
Anja Ronesen Bjørn Arild Thon	RENAS	15.04.2020 22.04.2020	- -	[9] [10]
Paal Fischenich	Compotech	21.04.2020	2	[11]
Jon Hermansen	Borg Plast-Net, Biobe	21.04.2020	2	[12]
Alf Jensen	FiReCo	21.04.2020	2	[13]
Richard Nilsen	Tafjord Kraftvarme	24.04.2020	3	[14]
Gunnar Malm Gamlem	Norges Rederiforbund	24.04.2020	3	[15]
Wilhelm Huus-Hansen	Noranergy	29.04.2020	2	[16]
Mats Tarring	Stena Recycling	E-post	2	[17]
Kjetil Vikingstad	Geminor	E-post	3	[18]
Magnus Gulstad	Nordic Crane Midt-Norge	E-post	3	[19]
Andreas Thon Aasheim	NORWEA	E-post	-	[20]
Ove Pryde Pedersen	Konsesjonær, Valsneset Vindkraftverk	E-post	-	[21]
Christoffer Back Vestli	Miljødirektoratet	E-post	1	[22]
Antti Niemimuukko	Fortum Waste Solutions Oy	E-post	-	[23]
Arild Fjeldahl	Zephyr	E-post	3	[24]
Eivind Fuglum	Zephyr	Pers.medd.	2	[25]
Johnny Hansen	Zephyr	Pers.medd.	1	[26]

4.3. Studieobjekter

Studieobjekt 1: Vindturbinbladet som produkt, beskrevet i Jensen og Skelton (2018)

Vindturbinbladet og dens sammensetning varierer i form av typen turbinblad og designet som er utformet av produsenten. Felles for dem alle er at de har en komposittstruktur, noe som betyr at de er sammensatt av to eller flere forskjellige materialer. Synonymet for denne strukturen er at materialene som sammensettes får bedre mekaniske egenskaper enn om de opptrer hver for seg, og at de er sammenføyd på en slik måte at separasjon på et senere tidspunkt kompliseres. For turbinblader har Jensen og Skelton (2018) funnet at de generelt består av:

- Armert fiber, av materialer som glass, karbon, aramid eller basalt.
- Et polymerbasert matrisemateriale, heretter benevnt som en polymermatrise, som kan opptre som:
 - Herdeplast, slik som umettet polyesterplast, urea-, fenol-, melamin-, uretan- og epoksyplast.
 - Termoplast, slik som polyetylen, polypropylen, polyvinylklorid og polystyren.
- Sandwichkonstruksjon, av materialer som balsatre eller skum som polyetylentereftalat (PET).
- Belegg eller film, som oftest av polyetylen (PE) eller polyuretan(PUR).
- Metaller, ofte i form av kobbertråder og stålbolter.

Denne kombinasjonen av fibre og polymerer, bedre kjent som en glassfiberarmert plastkompositt (GFK), står for mesteparten av materialsammensetningen i et turbinblad. Her er fordelingen gjerne 60-70 % armerte fibre og 30-40 % harpiks basert på vekt. GFK er det vanligste materialet blant produsenter og designere av turbinblader, grunnet de mange fordelene som er tilknyttet materialet. Komposittens egenskaper har et høyt styrke-til-vekt forhold, karakterisert med høy slitestyrke og lav tetthet. Dette gir materialet muligheten til å opptre aerodynamisk, samtidig som det tåler det mekaniske arbeidet. Kompositten har høy resistans mot slitasje, rust, samt elektrisk og termisk konduktivitet. Dette kreves for å kunne garantere en lang levetid. Materialet er kostnadseffektivt å produsere, og kan utstyres med lynavleder og termiske systemer mot ising. Benyttes herdeplast i GFK vil polymerer krysskoble seg i så stor grad at prosessen blir irreversibel og vanskeliggjør fremtidig gjenvinning av materialet.

Blant leverandørene undertegnede har snakket med i denne oppgaven er det en økende trend i å substituere noe av glassfiberen med karbonfiber i komposittstrukturen i vindturbinbladene.^{[1][2]} (Se Tabell

³⁾ Dette er fordi fibrene er både sterkere og lettere enn glassfiber, og har en større strekkfasthet. Moderne modeller har gjerne installert mer enn ett tonn karbonfiber i tillegg til glassfiberen i kompositten.^[1] Kostnaden forbundet med karbonfiber er høy, og bremser implementeringen i nye turbinblader.^[1]

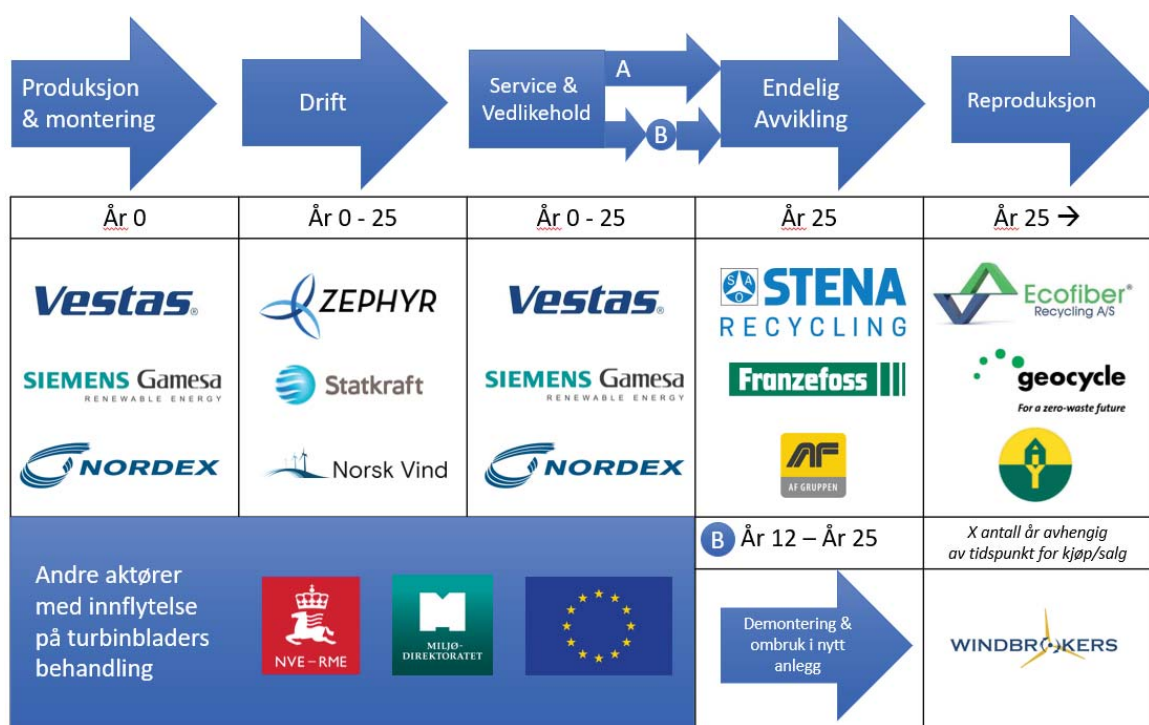
Studieobjekt 2: Vindturbinbladenes verdikjede

Dette underkapittel er i stor grad basert på undertegnedes forståelse gjennom personlige meddelelser underveis i arbeidet, samt etter å ha lest vindkrafthåndboken (NORWEA, 2019).

Vindkraftbransjen er bygget opp om prosjekter med en lang tidslinje. Anleggene har gjerne opp mot 40 års total prosjektperiode, inkludert konsesjonssøknadsprosessen slik den er beskrevet i vindkrafthåndboken og en driftsperiode på 25 år. Dette gir en lang bindingstid for materialene som benyttes, og sirkulære verdikjeder for disse krever grundig planlegging med bindende forpliktelser for alle involverte aktører. I dag er det varierte aktører med helt spesifiserte ansvarsområder gjennom prosjektperioden, noe som skaper utfordringer for etableringen av en sirkulær verdikjede om det ikke er en gjennomsyrende plan for produktet fra produksjon til avfallsbehandling. Kompleksiteten over prosjektenes organisering og hvem som til enhver tid er beslutningstaker i løpet av verdikjeden underbygger dette.

Over vindturbinbladets verdikjede er det i det norske markedet en rekke aktører med forskjellige oppgaver, se Figur 3: En eksemplifisert oversikt over aktører over et turbinblads verdikjede, og et vindkraftverks prosjekteringstid. Beslutningstakere varierer langs verdikjeden.. Her er «år 0» definert som monteringsstidspunkt, slik at produksjon av vindturbinblad og prosjektering av vindkraftverket skjer i forkant av dette. Det er i denne design- og planleggingsfasen at premissene må legges for et høyest mulig grunnlag for resirkulering i den andre enden av verdikjeden, her definert med «år 25» tilsvarende de moderne modellenes designede levetid. Driftsfasen er i denne oversikten splittet opp i aktiviteter relatert til driftsstyringen og aktiviteter relatert til service og vedlikehold. I avviklingsfasen gis anlegget på oppdrag til en rivningsaktør og en aktør som håndterer avfall.

Aktørkartet viser fordelingen av aktører over de nevnte prosjektfasene. Som vi ser av figuren er det få aktører som utøver en oppgave gjennom hele produktets livsløp, og som ofte tar beslutninger på bedriftsøkonomisk grunnlag, fremfor miljø- og ressursvennlige grunnlag. Mange av aktørene som er vist i aktørkartet fremstår som prosjektledere for sin egen prosjektfase, og har igjen en rekke underleverandører av tjenester og produkter i hver fase, som ikke vises i denne figuren. Ofte er det leverandøren som bistår med produksjon og montering som også sørger for service og vedlikehold, men dette er ikke alltid tilfelle.^[1] Tiltak som kan øke resirkuleringsgraden er gjennom materialvalg og design fra produsentene, krav og vilkår for prosjekteringsarbeidet satt av myndighetene (i blå firkant), samt krav til håndtering satt av prosjektutviklere opp- og nedstrøms for hvert enkelt vindkraftverk.

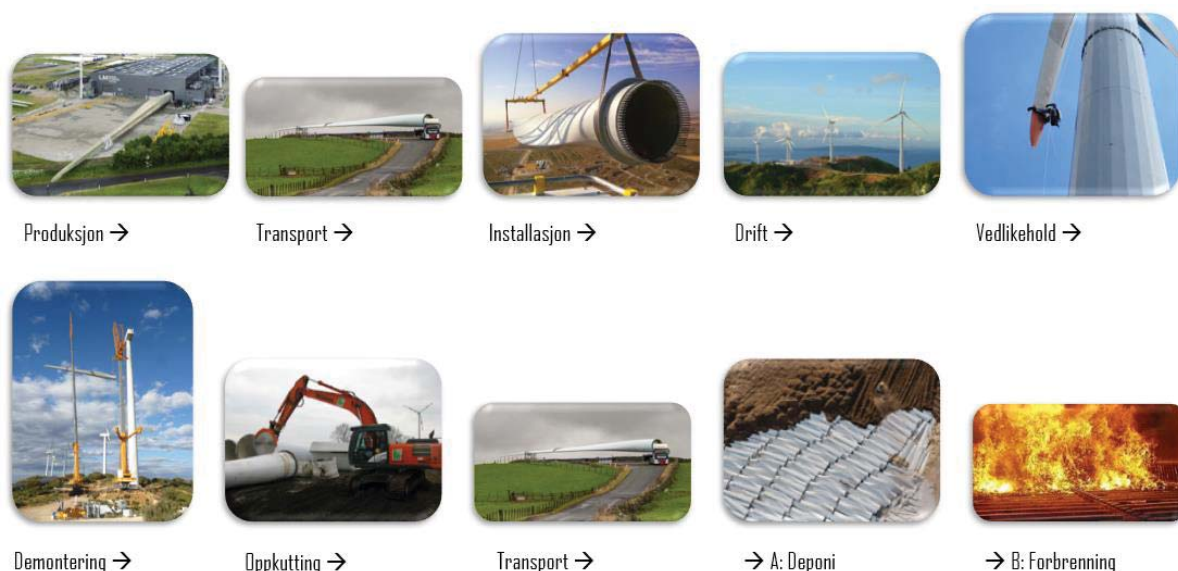


Figur 3: En eksemplifisert oversikt over aktører over et turbinblads verdikjede, og et vindkraftverks prosjekteringstid. Beslutningstakere varierer langs verdikjeden.

Helt til høyre i aktørkartet befinner både norske og internasjonale bedrifter seg. Disse har utarbeidet sine forretningsmodeller rundt håndtering av GFK, og kan være i stand til å ta imot slik avfall fra vindkraftbransjen. Disse aktørene kan enten selv utføre en reproduksjon gjennom tilførsel av GFK-avfall i sin produksjonslinje, eller klargjøre produktet for en slik prosess i neste ledd. Som vi ser av figuren er det to hendelser som kan oppstå underveis i driftsfasen. Enten at den driftsansvarlige velger å la vindturbinene operere fram til de ikke virker lenger (A), eller at anlegget reetableres midtveis i driftsfasen og de eksisterende vindturbinene selges videre til en turbinbladmegler (B). Videresalget kan ses på som en videreføring av produktets levetid, kontra å håndtere det som avfall før produktet faktisk ikke fungerer lenger. Dette tiltaket er altså ikke å regne som resirkulering, siden produktet ikke har nådd sin designede levetid. Forlenging av levetid derimot, fremstår som et tiltak som er i tråd med sirkulærøkonomiske prinsipper og prinsipper om bærekraftig utnyttelse av naturens ressurser (se definisjoner i Tabell 1).

Stikk i strid med de nevnte prinsipper blir de fleste av dagens vindkraftverk avviklet med en holdning om at vindturbinbladens livsløp er lineært og skal avsluttes ved avvikling. I og med at ressursene av avfallsbesitteren blir tillagt lite til ingen verdi vil turbinbladene sendes til sluttbehandling. Livsløpsfasene som gjelder generelt for en vindturbin i dag med en lineær verdikjede er vist i Figur 4. Deponi og forbrenning har lenge vært de vanligste behandlingsløsningene for turbinbladene, der

materialenes egenskaper går tapt gjennom henholdsvis langsom nedbrytning eller produksjon av varme til ulike formål. Ofte må turbinbladene gjennom en mekanisk forbehandling før de tilføres disse behandlingsanleggene, men dette er ikke inkludert i denne figuren. I forskningsspørsmål 2 ble tre aktuelle resirkuleringsspor for vindturbinblader gjennomgått. I forskningsspørsmål 3 ble de lineære behandlingsmetodene analysert i forhold til de mer sirkulærøkonomiske metodene co-prosessering og ombruk i nytt vindkraftverk.



Figur 4: Dagens lineære verdikjede for vindturbinblader. Materialene går til deponering eller forbrenning med energiutnyttelse.

Studieobjekt 3: Guleslettene Vindpark

Guleslettene Vindpark er et vindkraftanlegg som ble satt opp i løpet av vinteren/våren 2019-2020, med planlagt driftsstart i løpet av høsten 2020. Anlegget er lokalisert i Bremanger og Kinn kommune, og består av 47 Vestas-turbiner under modellnavnet V136-4,2MW (Zephyr, u.å.). Disse turbinene har en tårnhøyde på 90 meter, en rotordiameter på 136 meter og turbinbladenes lengde er på 66,66 meter (Vestas, u.å.). Ifølge Vestas' brosjyre av sine 4 MW-turbinmodeller baserer Guleslettens vindturbiner seg på samme teknologi som V112-3,45MW. I en LCA-analyse av denne modellen oppgis det at turbinbladene består av karbonfiber, glassfiber og epoksyharpiks. Lim av polyuretan (PUR) er det primære materialet som benyttes for å koble turbinbladet sammen, og bladene etterbehandles med fleece og diverse plastisk film (Razdan & Garret, 2017).

Zephyr er prosjektutvikler, byggherre og driftsoperatør når anlegget er operativt, mens BlackRock er prosjekteier. Den installerte effekten er målt til å bli 197,4 MW, noe som tilsvarer en årlig kraftproduksjon på 700 GWh. Dette er nok strøm til å forsyne 43 750 husholdninger (Zephyr, u.å.).

Gjennom beregninger av de offisielle dataene for Guleslettene Vindpark ble det funnet at anlegget består av 141 vindturbinblader med en samlet vekt på 2 647 tonn. Materielle data for anlegget er fremstilt i Tabell 4.

Tabell 4: Oversikt over materielle data for Guleslettene Vindpark.

Case: Guleslettene vindpark	Antall	Enhet
Vindturbiner	47	stk
Installert effekt per vindturbin	4,2	MW
Vindturbinblader	141	stk
Oppdelt i deler på 5m x 2,5 m	1833	stk
Vekt av turbinblad per installert effekt	13,41	tonn/MW
Totalvekt GFK-avfall	2 647	tonn

4.4. Beskrivelse av case

I og med at det er vanskelig å se for seg hvilke teknologier og avhendingsmuligheter som er gjeldende og operative om 20-25 år, er det besluttet i denne kost/nytte-vurderingen å ta utgangspunkt i hva som tilgjengelige løsninger for avhending i 2020.

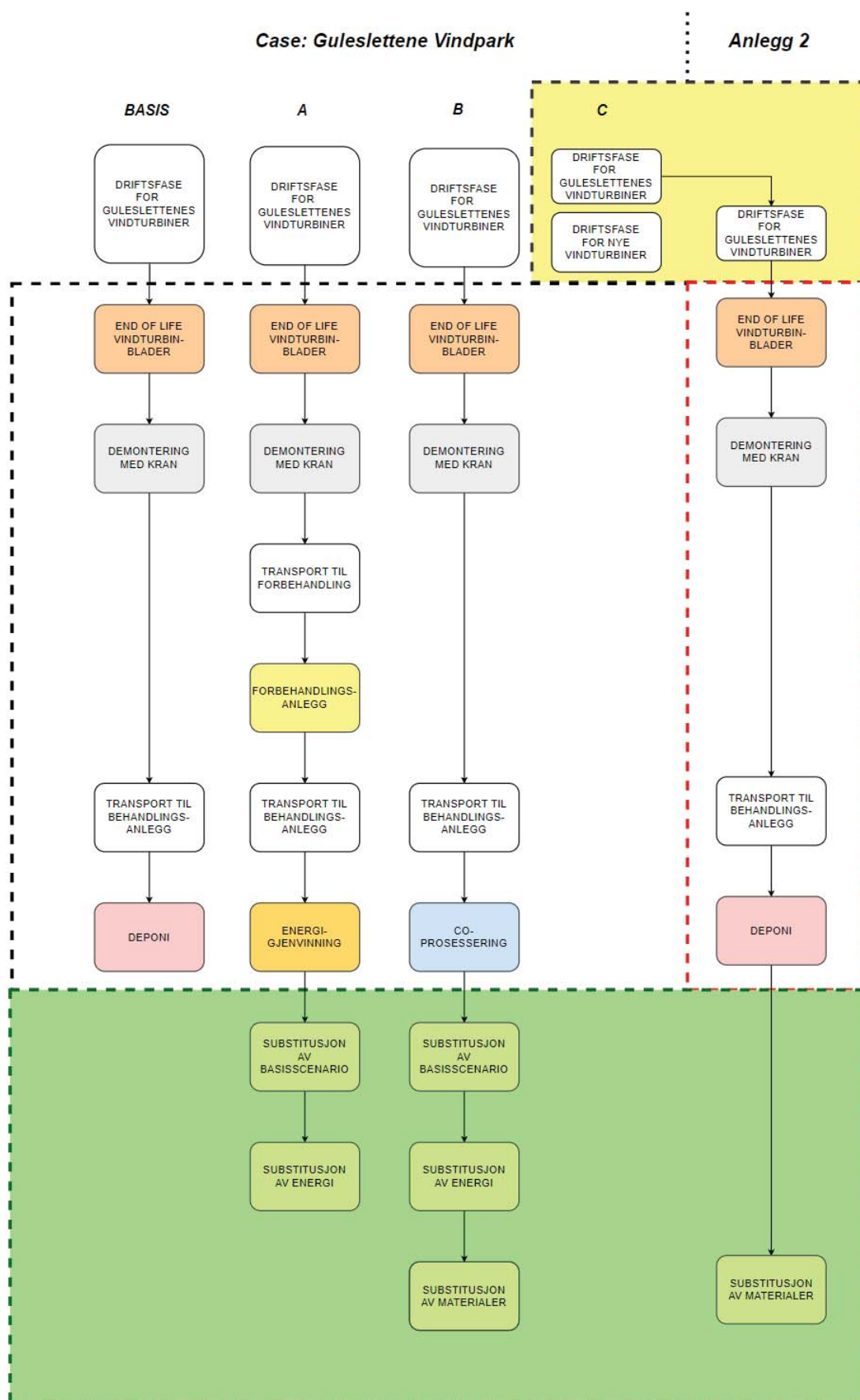
Slik som det fremgår av Ierides et al. (2019) sin vurdering av modenheten til de forskjellige gjenvinningsteknologiene som finnes i dag, er det fire alternativer som kan vurderes i en tenkt situasjon der Guleslettene Vindpark skulle blitt avviklet i 2020. Dette er:

- 0. *Deponering (Basis)*
- 1. *Energigjenvinning i et forbrenningsanlegg (A)*
- 2. *Co-prosessering i et sementproduksjonsanlegg (B)*
- 3. *Ombruk i et annet vindkraftanlegg (C)*

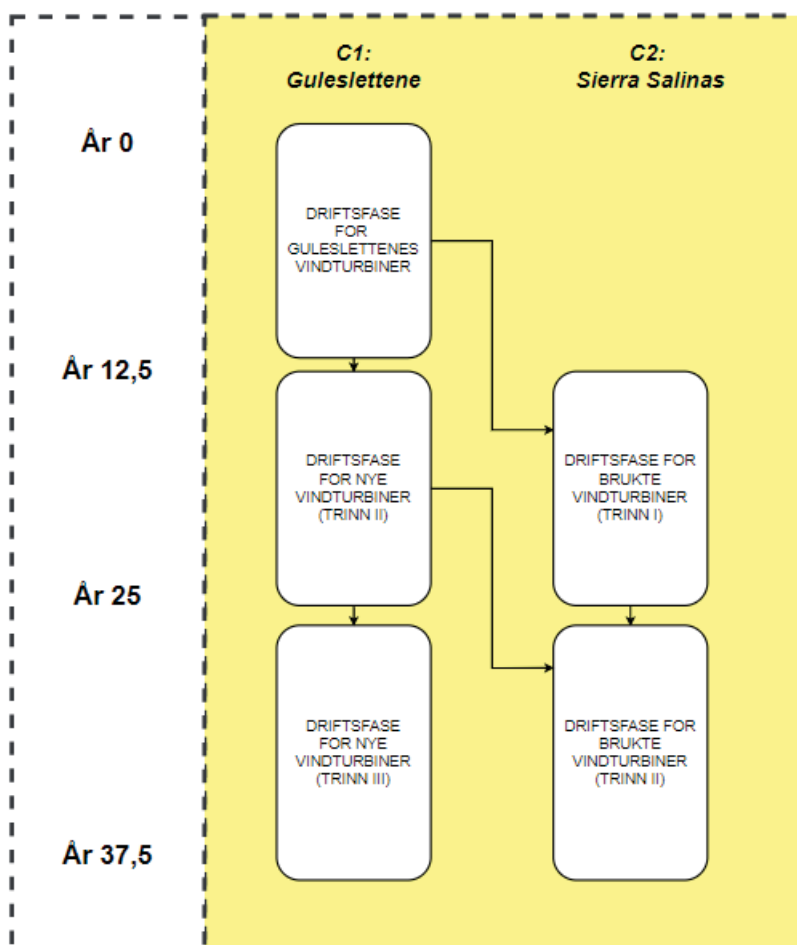
For å kunne utføre kost/nytte-vurderingen har det vært nødvendig å gjøre en rekke forutsetninger. I det norske markedet er erfaringer med avvikling og håndtering av materialer og komponenter fra vindkraftverk nærmest ikke-eksisterende. Det har derfor vært nødvendig å innhente erfaring fra internasjonale aktører for å sikre at forutsetningene har mest mulig legitimitet. Under gjennomgår alle forutsetninger som er satt, og hvilke kilder som er benyttet som grunnlag.

4.4.1. Avhendingsscenarioer

Innledningsvis er det blitt forutsatt at avviklingen skal skje i 2020. Det er også forutsatt at den endelige avhendingen skjer i det samme driftsåret for alle scenarioer, slik at scenarioene har et felles sammenlikningsgrunnlag. Dette er blitt valgt til å være i det siste driftsåret for vindturbinenes designede levetid, som ifølge Vestas (2020) og Razdan og Garret (2017) er 20 år for de aktuelle modellene. For behandlingsmetode C er det gjennomført en systemutvidelse for å dekke samme analyseperiode. Her er to vindkraftverk gjeldende, til forskjell fra de andre alternativene, hvor Guleslettene benevnes som anlegg 1 og et tenkt spansk anlegg benevnes som anlegg 2. Det er valgt å vurdere dette scenarioet med perspektivet fra anlegg 2 for å gi et sammenlikningsgrunnlag med de andre scenarioene. En illustrasjon av de fire scenarioene kan leses av Figur 5. Aktivitetene i den gule firkanten som representerer driftsfasen for behandlingsmetode C er nøyere beskrevet i Figur 6.



Figur 5: Flytskjema for de analyserte avhendingsscenarioene. Det røde området markerer perspektivet for anlegg 2.



Figur 6: Oversikt over aktiviteter i driftsfasen for scenario C, markert i gult i figur 5. Da det er det spanske anlegget (C2) som er inkludert i vurderingen gjennom dette anleggets trinn I og trinn II, er det kun høyresiden som er relevant.

Basisscenarioet «Deponering» er satt til et lokalt industrideponi. Det er sannsynlig at avstanden til nærmeste deponi ikke er lang, og dette alternativet velges derfor av avfallsbesitteren om det er et mål om å minimere den totale avhendingskostnaden. Nærmeste industrideponi er Elkem Avfallsplass, et industrideponi i Bremanger. I dette scenarioet fraktes turbinbladene hele til deponiet med lastebil.

Som scenario for behandlingsmetoden «Energigjenvinning i et forbrenningsanlegg» er det antatt at fraksjonen må sendes til et svensk forbrenningsanlegg eid av Fortum som er i stand til å forbrenne på svært høye temperaturer. Lokale anlegg kan ikke håndtere en slik fraksjon fordi de ikke kan forbrenne på tilstrekkelig høye temperaturer.^[14] Det er antatt at det er nødvendig å male opp turbinbladene før det skal tilføres i forbrenningsanlegget, slik at disse sendes til Ecofiber Recycling for forbehandling. Det er også forutsatt at turbinblader må bearbeides på forhånd før det fraktes og kvernes i Ecofiber sitt anlegg i Stavanger.^[6] Derfor kuttes disse opp ved kraftverket i biter på 5 x 2,5m. Når turbinbladene er

ferdig oppmalt hos Ecofiber, sendes de til forbrenningsanlegget til Fortum i Kumla. All frakt gjennomføres med lastebil.

I scenarioet for behandlingsmetoden «*co-prosessering i et sementproduksjonsanlegg*» gjennomføres behandlingen i et eksisterende anlegg i Tyskland der metoden er operativ for vindturbinblader i dag. Bedriften som eier denne løsningen er Geocycle, og deres anlegg er lokalisert i byen Lägerdorf i delstaten Schleswig-Holstein. For denne løsningen kreves det at turbinbladene stykkes opp ved kraftverket før det fraktes. Det forutsettes samme størrelse som for behandlingsmetode A. Stykkene av turbinblader fraktes fra Guleslettene til Florø Hamn, samme havn som turbinene leveres ved i dag.^[24] Deretter fraktes de med små bulkskip til Hamburg, hvor valg av skip ble tatt etter råd fra Norges Rederiforbund.^[15] Fra havnen i Hamburg fraktes turbinbladstykkene til Geocycle sitt anlegg for endelig behandling.

I det siste scenarioet som omhandler «*Ombruk i et annet vindkraftverkanlegg*» blir det opprinnelige vindkraftverket deponert i utlandet i det analyserte driftsåret etter å ha skiftet eier underveis ved reetablering av Guleslettene, se Figur 6. For å lage en hensiktsmessig analyse er det valgt å utføre en systemutvidelse, slik at det er to anlegg som analyseres, og at dette gjøres over like mange år som de tidligere analysene sett fra anlegg 2 sitt perspektiv. Dette gir oss to systemer, og to delscenarioer, C1 og C2, som bidrar til å fullføre behandlingsmetode C. Etter at systemutvidelsen er utført er det C2 sitt perspektiv som vurderes videre mot de andre scenarioene. Reetableringen skjer omtrent midt i produktets levetid, i det tolvte driftsåret. I valget av turbinbladenes nye eier er det antatt at interessenter for å kjøpe brukte vindturbiner i all hovedsak befinner seg i Sør-Europa. Derfor er Murcia-regionen sørøst i Spania valgt ut for dette scenarioet.

Nærmere bestemt lokasjon for det ny-oppsatte vindkraftverket er Sierra Salinas (anlegg 2), et egnet høydedrag rett ved den kommunale grensen til Valencia. For å dekke en hel driftsperiode blir to brukte anlegg kjøpt av anlegg 2, og for å forenkle sier vi at begge kommer fra anlegg 1 etter trinnvis reetablering. I dette scenarioet demonteres og fraktes turbinbladene i hele deler fra anlegg 1 til Florø Hamn, før det transporteres videre til den spanske havnebyen Cartagena med små bulkskip av tilsvarende størrelse som i scenario B. Fra havnen i Cartagena fraktes turbinbladene til anlegg 2 med tilsvarende lastebiler som i Norge. Her står og driftes vindturbinene ut sin designede levetid før de demonteres og deponeres i løpet av det 25. driftsåret. Både deponiets avstand og avstand til leverandør av kranutstyr for anlegg 2 er lik som for anlegg 1 i basisscenarioet.

4.4.2. Forutsetninger

Kostnader for behandling

Det å innhente relevante data på kostnader var utfordrende. Forutsetninger er blitt lagt etter intervju med eksperter^{[1][2][6][15]}, tilsendte pristilbud fra aktører^{[18][19]} og gjennom en kostnadsmodell utarbeidet av TØI (Grønland, 2015). Euro (€) ble valgt som valuta for beregningene, og konvertering av valuta er gjennomført for kurser per 01.01.2020.

Behandlingskostnadene for deponering og co-prosessering ligger på henholdsvis 120 €/tonn og 360 €/tonn.^{[1][2]} For energigjenvinning ligger leveringskostnaden på 1-2 kr/kg, ekskludert forbehandling.^{[6][18]} Her er 2 kr/kg forutsatt, noe som tilsvarer omtrentlig 204 €/tonn. Behandlingskostnaden for vindturbinblader ved ombruk er funnet gjennom å forutsette at behandlingskostnaden og salgsinntekten er den samme. I konsesjonssøknaden til Lindesnes Vindkraftverk er salgsinntekten satt til en million kroner per turbin (Kjellby, 2017). Ved valutakonvertering og en antakelse om at vindturbinbladets bidrag til kostnaden er på 22,2 %, basert på Krohn et al. (2009), blir den samlede kostnaden 7 564 € per turbinblad. Begge byggetrinn for anlegg 2 deponeres, slik at kostnader for dette inkluderes i kostnadsdelen for scenario C.

Totale krankostnader for demontering av vindturbiner er beregnet til 6,44 millioner kroner, som tilsvarer 658 000 €. Dette ble beregnet gjennom forutsetningene om at transport til og fra anlegg koster 562 500 kroner, at leie av kran koster 62 500 kroner per dag, og at hvert turbinblad tar to dager å demontere.^[19] Kostnader for oppdelingsutstyr er ikke inkludert i analysen.

Transport

Avstander og tidsforbruk for transport er innhentet gjennom Google Maps og Sea-Distances.org. Valg av transportmiddel i forskjellige databaser er satt på et imaginært grunnlag. Kostnader relatert til transporten er beregnet gjennom modeller og data for forskjellige transportklasser i Grønland (2015). Modellen er basert på forskjellige kostnadsparametere som tar hensyn til tid, distanse, vekt og antall forsendelser, se de benyttede transportklassene i Tabell 2 i vedlegg. Antall forsendelser er beregnet for hver etappe er basert på den mengden som kan transporteres gjennom hvert transportmiddels antatte kapasitetsbegrensning. For alle transportetapper på vei er returer inkludert i denne beregningen.

I basisscenarioet er transportklassen «*Timber truck with hanger*» valgt, i lag med tilhørende kostnadsfaktorer. Det antas at hver lastebil kan frakte kun ett vindturbinblad av gangen, som tilsvarer 282 turer. Avstanden mellom kraftverk og deponi er 30 km, og det tar drøyt en halvtime per tur.

I scenario A er transportklassen «*Articulated semi, closed*» valgt for første transportetappe. Denne er fra kraftverk til mekanisk forbehandlingsanlegg, og er på 561 km og tar 9,72 timer å kjøre per tur. Det antas at lastebilene frakter seks oppstykkede elementer per tur. Dette tilsvarer 611 turer. For andre transportetappe fraktes turbinbladene oppmalt, og transportklassen «*LGV*» er derfor valgt. Denne går fra forbehandlingsanlegg til energigjenvinningsanlegg. Distansen er på 807 km og tar 11,33 timer å kjøre per tur. Denne lastebilen antas å kunne frakte 20 tonn per tur, noe som krever 265 turer.

I scenario B er samme transportklasse som i den første transportetappen i scenario A valgt. Denne benyttes for både første og siste transportetappe. Samme antall oppstykkede elementer kan fraktes, seks stykker per tur, og dette gjøres over 611 turer. Begge etapper er på omtrent 60 km, og tar derfor omtrent én time per tur. Frakten til havs utføres med skipsklassen «*Dry bulk 5000 dwt*», mellom Florø og Hamburg. Distansen mellom havnene ligger på omtrent 1905 km og tar 68,5 timer per tur. Det er antatt at 54 oppstykkede elementer kan fraktes per tur, og det må derfor gjennomføres tre turer med skip.

I scenario C er samme transportklasse for lastebil valgt som for basisscenarioet, med tilsvarende fraktbegrensning og antall turer. Både første og siste transportetappe utføres med denne lastebiltypen. Etappenens lengde tilsvarer henholdsvis 58 og 130 km, som tar grovt én og to timer å kjøre. Transportetappen til havs mellom Florø og Cartagena utføres med et skip i klassen «*Break bulk lolo, 5000 dwt*». Dette forutsettes da bladene fraktes hele og krever løftearbeid. Distansen mellom havnene ligger på omtrent 4030 km og tar 145 timer å gjennomføre overfarten. Det er antatt at seks turbinblader kan fraktes per tur, og dette tilsvarer 24 turer. For transport til deponi fra anlegg 2 er samme forutsetning satt som for basisscenarioet.

For alle scenarioene benyttes en standard demonteringskran på 500 tonn. Denne leies ut av Nordic Crane Vest lokalisert i Åsane, og den totale distansen for å frakte kranen til og fra anlegget er på 474 km. Både kostnad og utslipp for denne reisen er inkludert i analysen, selv om det ikke har noen innvirkning på resultatet i form av det beste/verste scenarioet. Det er likevel gjort en forutsetning for scenario C som gjør den forskjellig fra de andre, og det er at demontering gjøres fire ganger i analysen. Dette i to trinn, der det i hvert trinn først demonteres for anlegg 1, og så for anlegg 2. Det er antatt at disse operasjonene gjennomføres med de samme forutsetninger for transport.

Transport av oppdelingsutstyr er ikke inkludert i analysen.

Utslippsdata

De fleste utslippsdata har opphav fra ecoinvent og er simulert i SimaPro, unntaksvis er noen data hentet fra andre kilder (EuCIA, 2013; Juhrich, 2016). Alle beregninger utført i Simapro som er benyttet i analysen kan leses av Tabell 1 i vedlegg.

I denne oppgaven ble frakt med EURO5-lastebil med en fraktkapasitet på mer enn 32 tonn valgt for all transport på vei. For all transport til havs er frakt med internasjonale skip, kalt «*transoceanic ship*» valgt. Når det kom til behandling ble utslippsdataene for deponi, energigjenvinning og bruk av elektrisitet beregnet i SimaPro. Utslippene ved energigjenvinning ble beregnet manuelt i SimaPro ved å kombinere data for forbrenning av glass- og plastavfall fra ecoinvent, forutsatt at GFK består av 70 % glassfiber og 30 % herdeplast. Utslippene relatert til co-prosessering ble beregnet via emisjonsfaktoren i EuCIA (2013), samt data på bruk av elektrisitet i forbehandlingen internt i anlegget fra samme kilde. Utslipp til reinstallerings av vindkraftverket i scenario C ble forutsatt med støtte i en forutsetning på en oppføring i ecoinvent. Her var det forutsatt at demontering og reinstallerings av turbiner står for 0,5 kWh/kg turbinmasse. Det antas her at denne faktoren også gjelder for turbinbladmassen, og benytter utslippsdata tilknyttet en global el-miks med middels spenning fra ecoinvent. Utslipp i sammenheng med bruk av utstyr til demontering, samt bruk og transport av oppkutting ble ikke inkludert. Det er heller ikke inkludert utslipp til den mekaniske forbehandlingen av scenario A.

Substitusjon

Det er for analysen ikke antatt at deponi substituerer noe, basisscenarioet blir sett på som siste utvei. Scenario A og B vil substituere deponering, og derfor spare denne alternativkostnaden i form av både kostnader og utslipp. Scenario C unngår deponering på avhendingstidspunktet underveis i driftsfasen, men turbinbladene ender likevel opp til denne behandlingen på slutten av bladenes livsløp. Derfor blir ikke substitusjon av basisscenarioet inkludert i beregningene.

For scenario A er det forutsatt at energien og tilhørende utslipp som kommer ut av forbrenning av husholdningsavfall substitueres, da anlegget erstatter varmeproduksjonen gjennom forbrenning av vindturbinbladene. Her er brennverdien for husholdningsavfall benyttet for å finne hvor mye av denne fraksjonen det må forbrennes for å veie opp for energien turbinbladene avgir. Ifølge Igniss Energy (u.å.) og Marthinsen et al. (2008) ligger denne verdien på mellom 10 og 14 MJ/kg. Vi forutsetter det beste utfallet, 14 MJ/kg. Av dette beregnes det at snaut 1,1 kg husholdningsavfall må forbrennes for å veie opp for 1 kg komposittavfall. Det antas at innsamling av husholdningsavfall i analysens aktuelle anlegg er en pliktig samfunnstjeneste basert på selvkost-prinsippet og er derfor ikke inkludert i den

økonomiske vurderingen. I miljøvurderingen er utslippene ved forbrenning av den beregnede mengden husholdningsavfall inkludert.

For scenario B er antagelsen for substitusjon basert på informasjonen fra EuCIA (2013). Her hevdes det at tilførelsen av vindturbinblader substituerer kull, med en brennverdi på 26,05 MJ/kg. Gjennom beregninger vil det si at ett tonn vindturbinblad tilsvarer 0,59 tonn kull. For å definere den substituerte kostnaden for kull ble det funnet at prisen for kull per 01.01.2020, omregnet fra amerikanske dollar, lå på 61,83 €/tonn (Trading Economics, u.å.). For å forutsette utslippene på forbrenningen ble emisjonsfaktoren for hardt, eggeformet kull fra Juhrich (2016) benyttet. Utslippsdata på fremstillingen av disse ble funnet gjennom beregninger i SimaPro. Den totale verdien for substitusjon ble da funnet ved å legge sammen unngåtte utslipp ved fremstillingen og forbrenningen av det harde kullet, sammen med alternativkostnaden for deponering. Per definisjon vil også tilsetningsstoffer substitueres i sementproduktet, men dette er ikke inkludert hverken i den økonomiske eller miljømessige vurderingen.

For scenario C er det antatt at produksjon av nye vindturbinblader til det spanske anlegget er substituert gjennom valget av å kjøpe og installere brukt over to trinn fra anlegg 1. For å kvantifisere denne substitusjonen er referanseturbinbladet fra IEA Wind Task 37 på 3,4 MW i Bortolotti et al. (2019) benyttet, med tilhørende data på vekt og kostnader for produksjon. Gjennom beregninger ble det funnet at kostnaden for ett tonn vindturbinblad ligger på 55,25 €/tonn. Det ble også funnet at for å veie opp for differansen i installert effekt må det produseres og installeres 58 referanseturbiner. Dette tilsvarer vindturbinblader til 2486 tonn totalt, når referanseturbinbladet er definert til å veie 14,3 tonn.

For den miljømessige vurderingen ble en referanse på utslipp ved unngått produksjon av nye vindturbiner til anlegg 2 funnet gjennom bruk av resultatet i livsløpsanalysen til Razdan og Garret (2017), der fant de at det totale utslippet over levetiden lå på 4,44 g CO₂-ekv/kWh produsert over et forlenget livsløp på 24 år. Her var det anslått at turbinbladet stod for 12 % av det totale utslippet over hele livsløpet til en V112-3.45 MW-turbin fra Vestas, og denne forutsetningen ble inkludert i beregningene. Forskjellen mellom deponering i det tolvte og det 25. driftsåret er ikke hensyntatt, verken økonomisk eller miljømessig.

Alle forutsetninger som er beskrevet i dette kapittelet kan leses av Tabell 5, Tabell 6, og Tabell 7.

Tabell 5: Oversikt over diverse data relatert til beregning av den miljømessige kost/nytte-vurderingen.

Brennverdier, utslippsfaktorer, kraftproduksjon og EL-forbruk	MJ/kg	kWh/kg	kg/GJ	kg/ kWh produsert	kWh produsert
Kull	26,1	-	95,9	-	-
GFK-avfall	15,3	-	87,4	-	-
Husholdningsavfall	14	-	-	-	-
Preparering av vindturbinblader for scenario B	-	0,04	-	-	-
Demontering og reinstallerings for scenario C2	-	0,5	-	-	-
Produksjon av nye vindturbinblader for scenario C1	-	-	-	0,00053	-
Kraftproduksjon for turbinmodell Guleslettene	-	-	-	-	776 028 750
Kraftproduksjon for turbinmodell IEA37	-	-	-	-	775 242 500

Tabell 6: Oversikt over transportrelaterte forutsetninger av betydning for både den økonomiske og miljømessige kost/nytte-vurderingen.

Scenario	Antall km med lastebil	Antall km med skip	Tid per tur med lastebil (i timer)	Tid per tur med skip (i timer)	Total transport-kostnad, lastebil (i €)	Total transport-kostnad, skip (i €)	Total transport-kostnad, kran (per oppdrag)	Total vekt for kranutstyr (i tonn)	Antall km frakt av kran tur/retur
Basis	30	-	0,5	-	6 436	-	57 493	500	474
A	1368	-	9,7 - 11,3	-	9 743	-	57 493	500	474
B	118	1905	0,9	68,5	12 728	40 478	57 493	500	474
C	188	4030	0,9 – 1,7	145	13 057	72 390	57 493	500	474

Tabell 7: Oversikt over kostnadsrelaterte forutsetninger av betydning for den økonomiske kost/nytte-vurderingen, samt total vekt for referanseturbinen. Alle kostnader i €/tonn der ikke annet er oppgitt.

Scenario	Behandlingskostnad / Leveringskostnad				Produksjons-kostnad	Salgsinntekt	Salgsinntekt i € per turbinblad	Leiekostnad av kran (per dag)	Antall dager med kran-arbeid	Kullpris	Total vekt for referanseturbin (i tonn)	Total vekt for referanseturbin (IEA 37)
	Deponi	EG	CP	OINV								
Basis	120	-	-	-	-	-	-	6 388	94	-	-	-
A	-	204	-	-	-	-	-	6 388	94	-	-	-
B	-	-	360	-	-	-	-	6 388	94	61,8	-	-
C	-	-	-	134,3	-	-	-	6 388	94	-	2486	-

Forkortelser benyttet i Tabell 7: EG = energigjenvinning, CP = co-prosesserer, OINV = ombruk i nytt vindkraftverk.

5. Resultater

5.1. Dagens status for vindturbinblader i Norge

Forskningsspørsmål 1: Hvilke kriterier blir lagt til grunn ved design og prosjektering av vindparker i dag med tanke på nedleggingsfasen, og hvilke konkrete planer foreligger for anlegg som skal demonteres innen 2030? Hva er den gjennomsnittlige utskiftningsraten gjennom turbinenes levetid?

Etter en gjennomgang av prosjektdokumenter for Guleslettene Vindpark for å identifisere fokuset på avfall og vindturbinblader ble det kartlagt at det ikke finnes noen kriterier for design knyttet til nedbygging og håndtering av avfall, verken for produsent eller for kjøper av turbinblad. Dette funnet støttes av leverandørene.^[1] Etter dokumentgjennomgang av prosjekteringen av Guleslettene Vindpark som per i dag er i anleggsfasen er det lite til ingen oppmerksomhet rettet mot muligheten for å gjenvinne turbinbladene etter bruk. Hva gjelder fokus på avfall generelt vies det i miljø-, transport- og anleggsplanen (MTA), som er et krav i konsesjonsprosessen, stort fokus på minimering av avfall, samt sikker og miljøvennlig håndtering av fraksjonene som oppstår under byggingen. Denne planen er forbeholdt anleggsfasen, og har derfor ikke tatt for seg avfall relatert til etterbruksfasen. Det ble oppdaget i prosjektet at det kan være vanskelig å sikre gode håndteringsløsninger for enkelte fraksjoner om det ikke finnes gode ordninger og mottaksanlegg lokalt der hvor kraftverket settes opp.

De nasjonale miljø- og energimyndighetene er aktører som gjennom sine konsesjonsvilkår kan legge føringer for design og prosjektering av vindkraftanlegg for diverse formål. Miljødirektoratet har ikke vurdert behandling av kompositter fram til i dag, men vurderer å gå mer aktivt inn i problemstillingen fremover.^[22] NVE har i større grad vært involvert i å sette krav til nedleggingsfasen gjennom sitt konsesjonssystem.

Per i dag blir konsesjoner gitt med vilkår om garantistillelse, og konsesjonæren er pliktet til å levere en plan for nedleggelse til NVE.^[3] Garantistillelsen skal leveres til NVE i det tolvte driftsåret. NVE ser ikke behovet for å sette dette kravet til et tidligere tidspunkt da restverdien for anlegget er stor før den tid, og fordi unødvendige samfunnsøkonomiske byrder skal unngås når konsesjonene blir gitt. Det er ikke definert per i dag hvor detaljert avfallshåndteringen skal beskrives i nedleggingsplanen. I løpet av 2020 skal konsesjonsprosessen revideres, og i dette arbeidet har NVE lagt fram et forslag til en veileder for nedlegging av vindkraftverk (Bjerkestrand et al., 2020). Denne veilederen kan være selvstendig eller som en del av en helhetlig veileder for hele konsesjonsprosessen. En slik veileder kan gjøre

nedleggingsfasen enklere å gjennomføre, samt mer forutsigbar for investorer av ny gjenvinningsteknologi. Dette er et behov som er etterspurt av prosjektledere i bransjen.^[26]

I Bjerkestrand et al. (2020) går NVE igjennom de forskjellige fasene av en konsesjon. Den åttende og avsluttende fasen kalles for «Avviklingsfasen». I vurderingen av dagens praksis konkluderes det med at konsesjonærene må søke om en ny anleggskonsesjon til NVE om en eventuell reetablering av kraftverket, men grunnet få saker til nå har det ikke blitt utarbeidet en veileder for reetablering eller noen retningslinjer for behandling av søknader om reetablering. NVE ser for seg at retningslinjer og veiledning kan gi mer tillit til konsesjonsprosessen.

Stadig flere konsesjonærer søker om å få reetablere sine kraftverk, og får ved godkjent søknad tildelt en ny konsesjon for sitt anleggsområde. Per i dag er det tre godkjente konsesjoner for reetablering og én søknad som ikke er ferdig behandlet. Disse reetableringene inkluderer demontering av gamle turbiner, for å gi plass til nye og mer effektive turbinmodeller. De aktuelle anleggene er Hundhammerfjellet vindkraftverk (Bølling, 2019a), Havøygavlen vindkraftverk (Bølling, 2020), Valsneset vindkraftverk (Bølling, 2019b) og Utsira II (Bølling, 2017). Det er sistnevntes konsesjon som fortsatt er under behandling. Valsneset vindkraftverk fullførte sin reetablering vinteren 2020. Andre utførte reetableringer er Mehuken vindkraftverk og Lindesnes vindkraftverk der videresalg for ombruk ble benyttet for de eksisterende vindturbiner.^{[3][25]}

For samtlige av de nevnte konsesjonssakene der anleggskonsesjoner er vedtatt finnes vilkår om fjerning av eksisterende vindturbiner. Her er det presisert at konsesjonæren må søke om og i neste omgang få tillatelse til å fjerne de vindturbinene som ikke skal inkluderes i det nye kraftverket. Hundhammerfjellet søkte i to omganger om fjerning av ti av sine vindturbiner i 2018.^[3] Her ble fjerningsmetoden «kontrollert velting» tydelig beskrevet, og metoden ble godkjent av NVE. De minste turbinene ble demontert, slik at totalt 15 av 17 vindturbiner er blitt fjernet før byggestart.^[7] Prosjektets miljø-, transport- og anleggsplan (MTA) er av 04.04.2019 godkjent av NVE (Bølling, 2019a).

I prosjektet på Havøygavlen var ikke fjerningsmetode søkt og godkjent i forkant av eller inkludert som en del av deres innleverte MTA. Dette gjorde at NVE tydelig presiserte at vilkåret om fjerning av eksisterende vindturbiner må utredes og godkjennes. NVE beskrev i vedtaket om godkjent MTA hva de forventer at en plan for fjerning av eksisterende vindturbiner skal inneholde: «...en beskrivelse av rivemetode, håndtering av de revne turbinene, hvordan resirkulering av de forskjellige komponentene i turbinene er tenkt gjennomført, kostnader for rivning, fraksjonering og transport av turbinkomponenter til mottak for resirkulering eller spesialavfall og hvordan miljøet hensyntas»

(Schiager, 2020, s. 13). I denne konsesjonssaken var vilkåret i anleggskonsesjonen av 21.09.2018 om fjerning av eksisterende turbiner inkludert i MTA-vilkåret, og stod ikke som et selvstendig vilkår. Den 20.11.2019 ble frist for idriftsettelse utsatt ett år fra 31.12.2020 til 31.12.2021. Dette fordi de eksisterende turbinene kunne benyttes ett år til, noe konsesjonær og NVE så på som miljømessig positivt. Konsesjonen ble også utvidet, da den burde samsvare med nye turbiners antatte levetid på 30 år (Bølling, 2020).

For Valsneset var fjerning av eksisterende turbiner et selvstendig vilkår i anleggskonsesjonen av 12.08.2019. I denne ga NVE tillatelse til å bygge Valsneset Vindkraftverk bestående av tre turbiner på 4,2 MW. Dette var opprinnelig en teststasjon, slik at vindmålingsutstyr og mindre testturbiner fra denne måtte fjernes før nye turbiner kunne installeres. I vedtaket om godkjent MTA og detaljplan av 14.08.2019 ble det påkrevd at konsesjonæren må søke om og få tillatelse til å fjerne eksisterende turbiner som ikke skal inngå i det nye vindkraftverket. I konsesjonærens MTA står det at fjerning av gamle turbiner søkes til NVE i en separat søknad. Dette anlegget er nå i drift med tre nye vindturbiner som ble installert vinteren 2020, etter rivningsarbeidet ble gjennomført høsten året før (Bølling, 2019b).

Spørreskjemaet ble utlevert i april/mai 2020, og fire svar ble mottatt. Det generelle inntrykket fra disse fire svarene er at kunnskapen om turbinblader, gjenvinning og ombruk er lav i bransjen. Det verserer holdninger om at turbinblader er dyrt å avhende, og at de bare kan deponeres. Samtlige har opplevd at det har vært et økt fokus på ombruk og gjenvinning de seneste fem årene. Det oppleves også at leverandører ikke stiller opp med løsninger for ombruk og gjenvinning. De innsendte deltakere har ingen konkrete planer for gjenvinning eller ombruk og det er ikke gjort opp om avtaler om tilbaketaking ved komponenter som får funksjonsfeil. Utskiftningen av komponenter i turbinene er erfart til å skje mellom to og ti ganger gjennom turbinenes levetid. Nye krav om gjenvinning og tilgjengelige løsninger for ombruk og gjenvinning blir sett på som viktig i tiden fremover.

5.2. Demontering, ombruk og resirkulering: verdikjeder og anvendelser

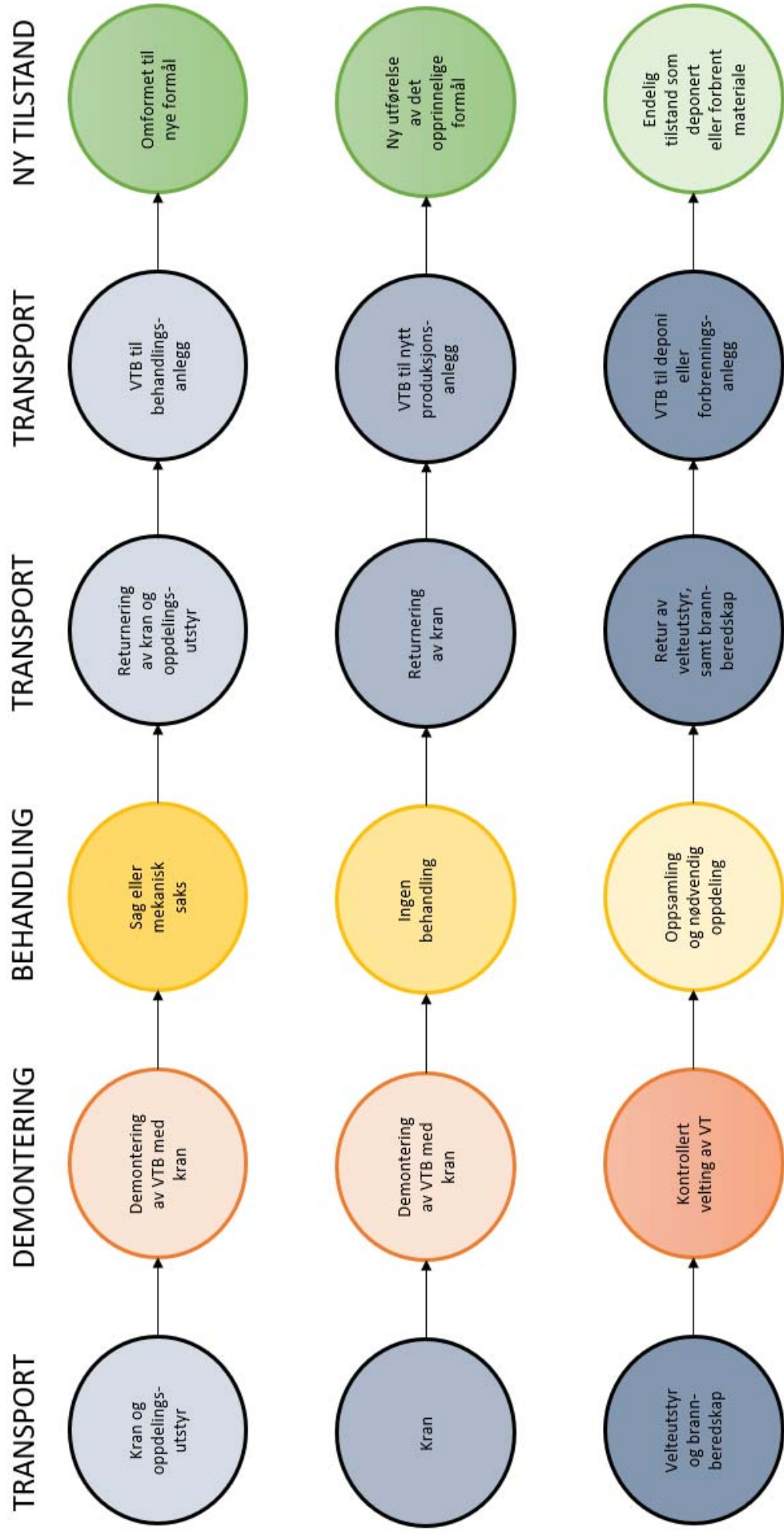
Forskningsspørsmål 2: Hvordan kan turbinblader ombrukes eller resirkuleres med dagens tilgjengelige og nært realiserbare gjenvinningsteknologi, hvordan vil verdikjedene for ombruk og gjenvinning fungere og hvilke anvendelsesmuligheter har de resulterte materialene?

5.2.1. Avviklingsfase og demontering

Det finnes flere mulige strategier for avviklingen av en vindturbin og dens vindturbinblader. Normalt transporteres nødvendig utstyr opp til anlegget for å demontere turbinen med kran, og eventuelt utstyr for behandling. I enkelte tilfeller, særlig ved uforutsett avvikling som ved konkurs eller havari, er det blitt valgt av avviklingsansvarlig å gjennomføre kontrollert velting av vindturbinene (Sundberg, 2012).^{[7][8]} Dette er uheldig da slik avhending kan føre til oljesøl om beholdere ikke er tømt i forkant.^[2] Slik avvikling kan også føre til ødeleggelse av materialer og komponenter som kanskje kunne gjenbrukes eller gjenvinnes, i tillegg støtpåkjenningen på det lokale miljøet. Det varierer hvorvidt det er nødvendig å seksjonere turbinbladene på kraftverket med enten sag eller maskin. Dette avhenger som regel av hva slags løsning man har for transport av komponenter og materialer fra anlegget og hva slags behandlingsmetoder som vil bli benyttet for turbinbladene i neste steg.

I Figur 7 er tre alternative strategier skissert. Her varierer strategiene i form av hva som transporteres i hvert transporttrinn, hvordan vindturbinbladene demonteres, hvordan turbinbladene behandles på anlegget, og hvilken tilstand turbinbladet har etter å ha blitt prosessert i et behandlingsanlegg eller satt opp til videre drift i et alternativt produksjonsanlegg. Strategiene kan kort beskrives slik:

- For den øverste avviklingsstrategien transporteres kran og oppdelingsutstyr til anlegget. Deretter demonteres turbinbladene med kran, før det behandles med sag eller mekanisk saks. Kran og oppdelingsutstyr returneres til den utleiende. Turbinbladene transporteres så til et behandlingsanlegg der det omformes til nye formål.
- For den midterste avviklingsstrategien transporteres kun kran til anlegget. Deretter demonteres turbinbladene, uten videre behandling. Kranen returneres til den utleiende. Turbinbladene transporteres så til et nytt produksjonsanlegg der det driftes videre.
- For den nederste avviklingsstrategien transporteres velteutstyr og brannberedskap til anlegget. Deretter veltes turbinene kontrollert, før det samles opp og eventuelt behandles for transport. Velteutstyr og brannberedskap fraktes fra anlegget. Turbinbladene har reduserte egenskaper og transporteres derfor til et deponi eller til et forbrenningsanlegg.



Figur 7: Tre alternative flytskjema for nedleggingsfasen avhengig av avviklingsstrategi og bruksformål for vindturbinbladet i motsatt ende av avhendingen.
VT = vindturbin, VTB = vindturbinblad.

Tabell 8 viser en oversikt over de alternative metodene som er kjent for demontering av vindturbiner i dag og tilhørende utstyr. Disse metodene kan klassifiseres som tre typer nedlegging av en vindturbin: Demontering med kran, demontering med løftetårn og kontrollert velting. Under tabellen gjennomgås hver enkelt metode.

Tabell 8: Oversikt over alternativt utstyr som kan benyttes ved demontering av vindturbiner.

Demonteringsutstyr /-metode	Formål	Fordeler	Ulemper
Demonteringskran	Skånsom demontering	• Opprettholder turbinbladenes form • Øker mulighetene for ombruk	• Krevende og kostbart å transportere • Krever en viss størrelse på oppstillingsplass
Løftetårn	Skånsom demontering	• Krever mindre oppstillingsplass • Kontrollert demontering av turbiner med tungt maskinhus	• Lite utbredt • Få tårn tilgjengelige • Krevende og kostbart å transportere
Kontrollert velting	Mindre skånsom demontering	• Lav total kostnad • Unngår transport av større demonteringsutstyr som kran/tårn • Rask og effektiv metode	• Hindrer ombruk • Kan skade komposittene • Kan føre til uheldige effekter på lokalt miljø • Krever brannberedskap • Krever en større opprydning

Den vanligste metoden for demontering er å benytte en monteringskran til å skånsomt og kontrollert løfte av og senke komponentene ned til bakken.^[1] Størrelse på kran avgjøres av størrelse på vindturbinen. Et bilde av Siemens, som kan beskues i Figur 8 i vedlegg, viser hvor store disse monteringskranene er i dag. I Norge har vi flere leverandører på store bygg- og anleggskraner. Et eksempel på dette er Nordic Crane. I tilfellet ved Guleslettene Vindpark ble en 500 tonn kran utvalgt for vindturbinbladene, men for demontering av hele turbinen kreves en kran på 750 tonn.^{[8][19]} Slike kraner må spesialbestilles i dag, da behovet for disse er små. Det kan være at dette behovet blir mer frekvent i tiåret som kommer, og at disse kranene er mer tilgjengelig for utlån hos de norske

kranselskapene.^[8] Utfordringen med slike monteringskraner er at de er følsomme for vær og vind, og at avvik i værmelding kan føre til at antall dager det tar å utføre arbeidet øker. Dette vil øke leieprisen, og de totale kostnadene for demonteringsprosjektet.^{[7][8]}

Løftetårn er en sjelden benyttet metode for montering og demontering av vindturbiner. Metodikken ble utviklet av det tidligere norske vindturbinselskapet ScanWind, som var leverandør til prosjektet på Hundhammerfjellet, se Figur 7 i vedlegg. Her benyttes to hydrauliske tårn oppstilt på hver side av turbinen, hvor en plattform forbundet til begge tårn heises i vertikal retning. På denne kan man plassere maskinhuset og løfte denne opp til ønsket høyde. Ved bruk av et slikt tårn vil det ikke være behov for en stor monteringskran. En annen fordel med slike løftetårn er at behovet for fundament er mindre, og at miljøpåvirkningene ved støping av fundament for hver turbin reduseres.^[7] Opphavet til denne metoden var at turbinmodellene hadde svært tunge maskinhus (240 tonn), og at en vanlig monteringskran ikke kunne bære vekten. ScanWind ble kjøpt opp av General Electric (GE) i 2009, og løftetårnmetodikken ble ikke tatt med videre. Leverandøren Enercon skal visstnok ha en liknende metode under utvikling i dag.^[7]

Velting av turbiner er en ofte benyttet løsning internasjonalt.^[2] I Norge har vi erfaringer fra slike nedtakingsmetoder, gjennom vindkraftprosjektet på Hundhammerfjellet. NTE Energi hadde ansvar for denne prosessen, først da de skulle legge ned tre vindturbiner i 2017, og senere da de skulle reetablere vindkraftanlegget og legge ned ytterligere syv vindturbiner i 2019.^[7] De søkte NVE om å få benytte denne løsningen, som de kalte for «kontrollert velting», og fikk den godkjent. I søknaden beskrives metoden og kan oppsummeres slik^[3]: Innledningsvis er det ønskelig å velge et nedslagspunkt i eller nært nærliggende kjørevei. Grusputer benyttes for å minimere skadene i nedslagspunktet. Rotor og maskinhus sikres mot rotasjon i forhold til veltens posisjonering. Alle flytende medier som olje og kjølevæske tappes av og oppbevares midlertidig i egnede beholdere, og turbinen kobles av el-nettet. Hydraulisk utstyr benyttes for å velte, og dette utstyret er fjernbetjent. Beredskap for brannslukking mobiliseres om det er tørt vær eller velten skjer i tørt terreng. Fordelen med en slik prosess er at den ikke trenger å ta hensyn til værforhold. Dette gjør planleggingen mer forutsigbar, og begrenser kostnadene relatert til leie av kran. Det var AF Decom som utførte prosessen som saneringsansvarlig for prosjektleder NTE Energi i 2019, og som er den «ledende ekspert» på metoden i Norge.^[8]

I Tabell 9 er diverse utstyr for oppdeling av turbinblader listet opp. En vurdering av vaier- og sirkelsag ble utført i Jensen og Skelton (2018). Stikksag ble definert i Hall (2016), mens mekanisk saks er en vanlig metode som blir benyttet av avviklingsaktører i dag. Valg av utstyr går gjerne på utstyrets egenskaper, kostnadsomfang, krav til presisjon i seksjoneringen, krav til skadeomfang i kuttområdet og krav til

sikkerhet til utstyrets bruker. For det sistnevnte kan det både være i forhold til fare for arbeidsulykker og i forhold til inhalering av fiberstøv. Under tabellen blir hvert enkelt utstyr og erfaringen med disse beskrevet.

Tabell 9: Oversikt over alternativt utstyr som kan benyttes ved oppdeling av vindturbinblader.

Oppdelingsutstyr/ -metode	Formål	Fordeler	Ulemper
Wiresag	Grov oppdeling	• God sikkerhet • Presis kapping • Relativt lydløs • Lite fiberstøv	• Plasskrevende • Tidkrevende • Dyr i drift
Sirkelsag, håndholdt	Finoppdeling	• Fleksibel kapping • Billig i drift	• Lav sikkerhet • Mye fiberstøv • Upresis kapping
Sirkelsag, apparat	Grov eller finoppdeling	• God sikkerhet • Kan være fleksibel • Oppdeling kan være rask	• Kan være plasskrevende • Kapping kan være upresis • Kappskader på turbinblad kan oppstå
Stikksag, håndholdt	Finoppdeling	• Fleksibel kapping • Billig i drift	• Lav sikkerhet • Mye fiberstøv • Upresis kapping
Mekanisk saks	Grov oppdeling	• God sikkerhet • Kraftig og rask oppdeling	• Kappskader på turbinblad

Wiresager er utstyrt med en vannkjølt stålvaier med diamanttenner, og kan dele opp vindturbinbladet i alle størrelser. Vaieren legges rundt turbinbladet før selve sagingen utføres. Disse sagene kan være plasskrevende, da vaiernes lengde er designet for vanskelige forhold og lange avstander. Seksjoneringen er skånsom og presis, og vannet som benyttes til avkjøling kan resirkuleres. I forhold til håndholdte sager er wiresagene relativt lydløse og kan begrense støvutslipp gjennom bruk av vann til støvoppsamling. Metoden kan også være tidkrevende og at turbinbladene må holdes statisk gjennom prosessen for å unngå klemskader på vaieren (Jensen & Skelton, 2018). Gjennom Hall (2016) ble det konkludert at wiresager er 26,5 % dyrere enn håndholdte sager, som i dette studiet var eksemplifisert ved stikksager.

Sirkelsager finnes i varierende størrelse og teknisk utforming. Denne klassen av sager omfavner alt fra små, håndholdte sager til hydraulisk drevne sager med bladstørrelse på opp mot 2 meter i diameter. Størrelsen på sagbladet definerer mulighetsbildet for størrelsene av de oppkuttete bladdelene. I de fleste situasjoner vil det være nødvendig å utføre en rekke kutt i prosessen for å gjennomføre oppdelingen, noe som resulterer i en økning i mengden støv, kapp og utslipp. Fordelen med sirkelsag er at det er mulig å lage uavhengige kutt i alle retninger, slik at ønskede materialer kan tas ut og resirkuleres mer effektivt. Ulempen ligger i tøffe arbeidsforhold og mulig sikkerhetsrisiko. Akkompagnert med støvoppsamlingssystemer kan sirkelsager være et foretrukket valg av utstyr (Jensen & Skelton, 2018).

Stikksager er små, håndholdte sager med langt, tynt sagblad. De er fleksible å bruke, men når ikke dypt inn i turbinbladene slik at bruksområdet reduseres. I likhet med de håndholdte sirkelsagene har stikksagene utfordringer når det kommer til arbeidsforhold og opphoping av fiberstøv. Det kan være vanskelig å utføre seksjonering av de største vindturbinbladene, men de eldste modellene skal være håndterbare for de håndholdte sagene. Hall (2016) fant ut at stikksager er 36 % billigere enn wiresager, noe som impliserer at slike sager er mer kostnadseffektive.

Mekanisk saks er også en seksjoneringsmetode som kan benyttes på vindturbinblader. Dette er en hydraulisk tang, som produserer grove kutt og oppdelinger av materialet det behandler. Som oftest er disse koblet på en gravemaskin, der graveren er erstattet med den mekaniske saksen, slik som nevnt i Oleinik og Kuzmina (2018). Graveren kan også erstattes med en sirkelsag, se Figur 4. Mekanisk saks gir høy sikkerhet og lite støv. Denne tangen er benyttet bredt hos aktører som driver med rivningsarbeid, hvor behandlingen ikke behøver å være skånsom. Dette er gjerne en nedside for bruk av mekanisk saks, da skadene i kuttsonen blir store. Dette begrenser anvendelsen av turbinbladet i etterkant og kan gi svinn av blant annet fibermateriale.

Fellesnevneren for apparatsager og håndholdte sager er avveilingen mellom sikkerhet og kostnader. Det beste valget varierer med turbinbladmodellen og formålet med avfallet nedstrøms. Det er derfor ikke hensiktsmessig å vurdere disse systematisk på generelt grunnlag. Utstyret som ofte blir valgt i nedleggingsprosesser av vindkraftverk i dag er mekanisk saks og wiresager, ifølge Stena Recycling.^[17]

5.2.2. Ombruk

Analysen av en rekke anvendelsesmetoder ble utført ved en karakterisering basert på hvilket utviklingsstadium hver enkelt anvendelse befinner seg på i dag, se Tabell 10. Dette er gjennomført ved bruk av systematisk gjennomgang og vurdering av innsamlede data som metode.

Tabell 10: Vurderingskriterier og karakterer for løsninger relatert til ombruk.

Karakter	Utviklingsstadium	Forklaring
1	Idéfase	Anvendelsen har foreløpig kun blitt påtenkt og avventer en konseptutforming.
2	Konseptfase	Anvendelsen har utformet et konsept og en skisse av anvendelsen.
3	Planleggingsfase	Anvendelsen har nådd en planleggingsfase, det vil si at en aktør eller myndighet har godkjent prosjektets utførelse.
4	Ikke vellykket gjennomføring	Anvendelsen har blitt utført, men problemer har oppstått slik at gjennomføringen ikke er å anse som vellykket.
5	Vellykket gjennomføring	Anvendelsen har blitt utført, og få problemer har oppstått slik at gjennomføringen er å anse som vellykket.

I Tabell 11 er forskjellige anvendelsesmuligheter for vindturbinblader til ombruk presentert. Medfølgende er en rangering av de forskjellige alternativene på en skala fra 1 til 5, der anvendelsene er rangert stigende for hvilket erfaringsstadium de befinner seg på. I stigende rekkefølge er dette: Idéfase, konseptfase, planleggingsfase, ikke vellykket gjennomføring og vellykket gjennomføring. Under tabellen gjennomgås ombruksformålene og vurderingen av disse i kronologisk rekkefølge.

Tabell 11: Oversikt over både praktiske eksempler og teoretiske konsepter av forskjellige ombruksformål for vindturbinblader

Ombruksformål	Aktører som leverer hver enkelt løsning/konsept	Opphav	Ombruks-skala	Utført i Norge
Salg av operative vindturbiner til ny kraftproduksjon	Windbrokers	Nederland	5	Ja
Bruk av turbinblader til brokonstruksjoner	Superuse Studios Stijn Speksnijder	Nederland (Danmark)	2/3	Nei
Bruk av turbinblader til lekeplasser	Superuse Studios	Nederland	5	Nei
Bruk av turbinblader til urbant møblement	Superuse Studios	Nederland	5	Nei
Bruk av turbinblader til sykkel- og leskur	Superuse Studios Siemens Gamesa	Nederland Danmark	5	Nei
Bruk av turbinblader til unikt skilt	Superuse Studios	Nederland	5	Nei
Bruk av turbinblader til komponenter i etablerte produkter	GENVIND	Danmark	2	Nei
Bruk av turbinblader til hybride materialer	GENVIND	Danmark	2	Nei
Bruk av turbinblader til kunstige rev	Behzad Rahnama	Gotland, Sverige	1	Nei

Salg av operative vindturbiner til ny kraftproduksjon er det eneste ombrukskonseptet som vi per i dag har tilegnet oss erfaring med i Norge. Zephyr har solgt sine vindturbiner i drift for videre bruk i andre kraftverk, såkalt videresalg. Dette skjedde for 5 av turbinene på Mehukken i 2014. Disse hadde stått i anlegget og produsert elektrisitet i tretten år, og hadde derfor minst sju år igjen.^[25] Det samme ble gjort ved Lindesnes Vindkraftverk i 2019.^[3] I Europa er det mange anlegg som reetableres og som selger sine gamle turbiner til ombruk, gjerne til land med en lavere velstand. Nederlandske Windbrokers er et eksempel på et firma som jobber med bruksalg av vindturbiner. De har solgt om lag 400 brukte vindturbiner, og levert til 20 land og samtlige kontinenter (Windbrokers, u.å.).

Når det kommer til ombruk til andre formål er det en rekke praktiske erfaringer fra forskjellige prosjekter i Europa. Til forskjell fra konseptet for videresalg er dette ombruk av komponenter når tilstanden som avfall oppstår, og ikke midt i levetiden. GENVIND-konsortiet listet opp en rekke eksempler på dette, og det finnes også andre gode konsepter som ennå ikke har nådd en praktisk gjennomføring. Det er Nederland som fører an på designfeltet vedrørende ombruk.

Et ombruksformål der vindturbinblader kan benyttes er ved konstruksjon av broer, der turbinbladet som helhet substituerer hele eller deler av fundament og tilsvarende konstruksjonsmasse.

Nederlandske Superuse Studios designet en gangbro for GENVIND-prosjektet, se Figur 1 i vedlegg, og denne broen avventer ennå installering etter at prosjektet fikk støtte av Erhvervstyrelsen allerede i 2015 (Bøgh, 2015). De åpne endene er designet som skifterom med installert lys. Ifølge danske medier har initiativtakerne nå fått byggetillatelse, og får to turbinblader donert av Siemens Gamesa (Christensen, 2019). I Nederland er det flere som har sett på konseptet rundt ombruk i form av en bro, gjennom en masteroppgave av Stijn Speksnijder ved Delft University of Technology, se Figur 2 i vedlegg. Denne broen skal være sterk nok til å bære saktegående trafikk, skissert med sykkelvei og gangvei. Dette konseptet er ennå i designfasen, men Speksnijder har fått bred oppmerksomhet og deltar nå i et internasjonalt konsortium for å realisere brodesignet (Speksnijder, u.å.). Den danske broen har nådd planleggingsfasen og får karakteren 3, mens broen til Speksnijder står foreløpig i konseptfasen og får derfor karakteren 2.

Nevnte Superuse Studios står bak designet av en rekke andre gjennomførte ombruksløsninger i Nederland. Blant annet har de tegnet og bygget en lekeplass i Rotterdam ved hjelp av fem turbinblader, se Figur 3 i vedlegg. Ett av turbinbladene på 30 meter ble brukt som det var, mens de fire andre ble seksjonert. Lekeplassen ble bygget på samme budsjett som sammenliknbare lekeplasser, og hadde ett femti ganger så lavt klimafotavtrykk. Turbinbladenes egenskaper var også gunstig til dette formålet, i.e. robusthet for vær og vind (de Decker, 2015). Arkitektfirmaet skisserte også en liknende lekeplass i byen Terneuzen, sør i Nederland (Groep, 2017). Dette ombrukskonseptet kan konkluderes med å være et vellykket gjennomført prosjekt, og får karakteren 5.

I Rotterdam er det også utformet en skulpturliknende, utendørs sitteplass i bydelen Willemsplein, se Figur 4 i vedlegg. Her ble det brukt ni turbinblader på seks meter, fem til å sitte på, tre som seterygg og ett som stedsmarkør. Sitteløsningens målgruppe var fergeturister som ventet på ombordstigning, men kommunen ønsket en mobil løsning som kunne flyttes på ved offentlige arrangementer. Betongklossene som turbinbladene er festet til er 100 % resirkulert (de Decker, 2015). Denne løsningen for ombruk av vindturbinblader kan benevnes som en vellykket gjennomføring, og får derfor karakteren 5.

Det har vist seg at turbinblader også kan fungere som skilt, buss- og sykkelkur. I byen Almere rett utenfor Amsterdam i Nederland har Superuse Studios tegnet og installert et sykkelkur, se Figur 5 i vedlegg. Tidlige tegninger hintet til leskur for bussreisende (Superuse Studios, 2014), men det endte opp som et sykkelkur der det er mulig for reisende å søke le for regn, se figur i vedlegg. Fire turbinblader på 30 meter ble benyttet i denne ombruksvarianten. Siemens Gamesa har også støttet et prosjekt i Danmark der et turbinblad er benyttet som sykkelkur, se figur 6 i vedlegg. Et siste eksempel

fra Superuse Studios er Kringloop Zuid, et resirkuleringssenter i den nederlandske byen Maastricht som er bygget gjennom ombruk av en rekke vanskelige avfallsfraksjoner som skipscontainere, vindusruter og vindturbinblader (Bergsma, 2008). Ett vindturbinblad ble benyttet som et kombinert vertikalt skilt og lager for regnvann. Begge løsninger er gjennomført og virker å ha vært en suksess. Dermed gis disse løsningene karakteren 5.

Jensen og Skelton (2018) utforsket muligheten for ombruk av vindturbinblader som komponenter i allerede etablerte forbruksvarer eller som nye produkter av hybride materialer. Som en komponent benyttes helt eller delvis den fullstendige strukturen i møbler eller konstruksjonsmateriell. Karakteristikkene i komposittmaterialet nyttiggjøres, slik som slitestyrke, lav vekt og fasthet. Studien viste at flere objekter kan produseres med relativt høy verdi. Turbinbladenes konkave struktur gjør det derimot vanskelig å produsere uniforme komponenter av et større volum. Dette gjør at kostnadseffektiviteten for løsningene er lave. Ved hybride materialer benyttes omformede turbinblader med andre materialer for å skape nye egenskaper, som igjen legger opp til nye muligheter for sekundært bruk. Et eksempel fra et av konsortiets studier var å konstruere et hybrid materiale bestående av vindturbinbladet og et lag av betong. Målet var å forbedre betongens ytelse ved kompresjon og å lage et lettere materiale. En potensiell applikasjon for dette materialet var et langt bord på fire meter med fire bein. Utfordringer ved denne løsningen var å finne et lim som var sterkt nok til å koble materialene sammen, samt å sørge for et turbinbladlag som var kuttet tynt nok og med riktig form. Prosessen er krevende både for utførelse og når det kommer til tidsforbruk. Det er ennå ikke lagt noen planer for å gjennomføre disse konseptene, så det vurderes at løsningene per i dag står i konseptfasen. Dette tilsvarer karakteren 2.

Rahnama (2011) foreslo gjennom sin masteroppgave ved Gotland University å benytte vindturbinblader som kunstige rev, særlig aktuelt for offshore vindturbinblader. Formålet med kunstige rev er å legge til rette for reproduksjon av marint liv og beskyttelse av marine økosystemer, særlig der havbunnen er flat og fattig på naturlige konstruksjoner som mange små marine arter er avhengig av. Japan har for eksempel dekket 10 % av sin kystnære havbunn med kunstige rev. Turbinblader er fullstendig slitesterkt mot vann, og har ingen kjemiske reaksjoner i havvann. Fordelene ligger i at metoden er enkel å utføre, går raskt, og er foreløpig kostnadsfri. Utfordringene ligger i usikkerheten rundt om det faktisk er ufarlig for marint miljø. Det er også ulike regelverk rundt kystforvaltning fra nasjon til nasjon, slik at gjennomførbarheten er avhengig av hvor kraftverket er lokalisert. Denne løsningen har fått internasjonal oppmerksomhet, men det er ikke utarbeidet et konsept rundt hvordan dette kan gjennomføres. Karakteren lander på 1, tilsvarende *idéfasen*.

Barrierene for ombruk av vindturbinblader ligger ofte i kostnader, designfrihet, tilgjengelighet på materialet fra avfallsstrømmene, behovet for testing av vindturbinbladene, at arbeid utenfor standarder krever ekspertise og forsinker prosessen, og utfordringer knyttet til oppkutting, transport og konstruksjon som skal imøtekomme designet som er skissert.

En studie utført underveis i GENVIND-prosjektet viste at om 5 % av Nederlands årlige produksjon av urbant møblement var konstruert ved bruk av vindturbinblader som de er, så ville det årlig estimerte komposittavfallet fra vindkraftverkene bli fjernet helt fra avfallsstrømmene (Jensen & Skelton, 2018). Dette tilsvarer 400 vindturbinblader, som ombrukes i 20 lekeplasser, 11 urbane sitteløsninger og 100 busskur (Superuse Studios, 2014).

5.2.3. Resirkulering

Den sekundære delen av forskningsspørsmålet er hvilke anvendelser de forskjellige metodene har. For resirkulering finnes det tre operative eller nært-realiserede gjenvinningsteknologier, slik lerides et al. (2019) vurderte det i Tabell 2. Disse er mekanisk grinding, pyrolyse og co-prosessering. Analysen av en rekke anvendelsesmetoder som kan utføres i etterkant av disse behandlingene ble utført ved en karakterisering basert på hvilket utviklingsstadium hver enkelt anvendelse befinner seg på i dag, se Tabell 12. Dette er gjennomført ved bruk av systematisk gjennomgang og vurdering av innsamlede data som metode.

Tabell 12: Vurderingskriterier og karakterer for løsninger relatert til resirkulering.

Karakter	Utviklingsstadium	Forklaring
1	Idéfase	Anvendelsen har foreløpig kun blitt påtenkt og avventer konseptutforming og videre testing.
2	Konseptfase med negativ eller mangel på testing	Anvendelsen har utformet et konsept for prosessering av avfallet, men har foreløpig ikke oppnådd gode resultater.
3	Konseptfase med positiv testing	Anvendelsen har utformet et konsept for prosessering av avfallet, og kan vise til gode, dokumenterte resultater.
4	Praktiske industrielle forsøk	Anvendelsen har oppnådd gode resultater, og er derfor forsøksvis implementert i markedet (gjennomført eller under gjennomføring).
5	Kommersiell anvendelse	Anvendelsen benyttes kommersielt som vil si at det kjøpes og selges av aktører i det aktuelle markedet.

I Tabell 13 presenteres forskjellige anvendelser tilknyttet de tre resirkuleringsmetodene. Disse er vurdert og karakterisert etter hvilket utviklingsstadium de befinner seg på, slik det er beskrevet i Tabell 12. Erfaringene som er gjort for hver enkel anvendelse gjennomgås kronologisk under Tabell 13.

Tabell 13: Oversikt over utvalgte resirkuleringsløsninger og tilhørende anvendelsesmuligheter.

Resirkulerings-løsninger	Anvendelsesmuligheter	Aktører og prosjekter	Skala	Kilder
Mekanisk resirkulering (oppmaling) av kompositter	Tilslag i betong	Ecofiber Recycling AS	2	[6]
	Blomsterpotter/hagemøbler	Ecofiber Recycling AS	1	[6]
	- Fritidsbåter - Kjerne i båtskrog	Ecofiber Recycling AS SICOMP	2	[6], [11]
	Bord- og benkeplater, bordsokler og søppelsjakt	Ecofiber Recycling AS	3	[6] Glassfiber Produkter (u.å.)
	Fyllmateriale (filament) til 3D-printing	FiberEUse	2	Rahimizadeh et al. (2019) Colledani (u.å.-b)
	«Nåler» til armering av betong	Ingen	3	Yazdanbakhsh et al. (2018)
	Sponplater	GENVIND	2	Jensen og Skelton (2018)
	Tilslag i maling	GENVIND	3	Jensen og Skelton (2018)
	Fyllmateriale i møbler og interiørdesign-produkter	ECOBULK	1	Vilkki (2018)
	Hybride kompositter i tre/plast med terrassebord, sittebenker, plankestier og skurmoduler som mulige anvendelser	ECOBULK KymiRing Motorsport Center	2	Vilkki (2018) WMW (2018) [4]
		Conenor	4	Vilkki (u.å.)
	Fyllmateriale i produksjon av ski og annet sportsutstyr	FiberEUse	1	Colledani (u.å.-b)
	Badekar og dusjkar	FiberEUse	1	Colledani (u.å.-b)
	Støyskjerm	Miljøskærm G-Fiber	5	[5] [11]
	Tilslag i asfalt	Ingen	3	[11]
	Jernbanesviller	Reprocover	4	[11], [12] Job (2013)
	Oppbevaringsprodukter som kabelkanaler og urbane avfallsdunker og askebegre	Reprocover	5	Reprocover (u.å.)
	Plastfliser i siloer	Borg Plast-Net	2	[12]

	Beskyttelsesstruktur, kapsler og deksler	Biobe AS	1	[12]
	Spesialtanker	BIA Hårdplast AB	5	[11]
	Kretskort	Ingen	1	[1]
Pyrolyse og mikrobølge-assistert pyrolyse (MAP)	Resirkulerte fibre i nye kompositter	Ingen internasjonale aktører	3	Flere studier, se i avsnitt
		Noranergy (MAP)	4	[11], [15]
	Organisk flytende drivstoff til bruk i bensinmotorer.	GENVIND	3	Jensen og Skelton (2018)
	Glasskeramiske materialer til bruk i gulv- og veggfliser.	Ingen	3	Lopez et al. (2012)
	Bilkomponenter som clutchpedaler	FiberEUse	1	Colledani (u.å.-c)
	Takrenne og takplater i plast	FiberEUse	1	Colledani (u.å.-c)
	Jernbanesviller	Reprocover	2	[10], [11]
Co-prosessering	Harpiks som brensel	Geocycle	5	[1] [2] [5] [11] EuCIA (2013) Schmidl et al. (2010)
	Fiberaske som tilslag i sementprodukt	Geocycle	5	
	Sementprodukt som kan benyttes i nye vindkraftprosjekter som fundamentmateriale.	Geocycle	5	

Mekanisk behandling (oppmaling)

Ecofiber Recycling er en norsk aktør som tar hånd om fritidsbåter og GFK disse består av.^[6] Her males komposittene opp, før de enten sendes til energigjenvinning eller materialgjenvinning. Majoriteten av den oppmalte glassfiberen sendes til forbrenning, men det blir gjort en innsats mot at stadig mer av denne fiberen innlemmes i et materielt kretsløp, i tråd med bedriftens mål om materialgjenvinning. De senere årene har en rekke prosjekter blitt gjennomført med ulik grad av suksess. Det er blitt gjort forsøk på å inkludere fraksjonen som tilslag i betong, i produksjon av nye fritidsbåter og bord- og benkeplater. En annen idé er å benytte oppmalt glassfiber, kombinert med andre materialer som plast og tre, i produksjonen av nye kompositter i blomsterpoter og hagemøbler. Ecofiber har bidratt til støping av nytt konstruksjonsmateriale med tilslag av glassfiber, som blant annet er brukt som bord- og benkeplater, bordsokkel og søppelsjakt ved en design-rasteplass (Glassfiber Produkter, u.å.). Tilslag i betong ga et mindre godt resultat der bæreevnen ikke var god nok, samt utfordringer knyttet til kretsløpet, noe som gjorde at bedriften valgte å forkaste videre arbeid med dette.^[6] Det er her blitt erfart at å gjenvinne glassfiber gjennom mekanisk oppmaling kan være utfordrende. I tråd med

erfaringene som er meddelt fra bedriften graderes anvendelsene deretter. Bord- og benkeplater, bordsokler og søppelsjakt får karakteren 3, mens fritidsbåter og tilslag i betong får karakteren 2. Blomsterpotter/hagemøbler får karakteren 1.

Forsøk på fritidsbåter er blitt gjennomført før. I 1996 ble et prosjekt ledet av SICOMP gjennomført der formålet var å benytte resirkulert glassfiber som kjernemateriale i båtskroget.^[11] De praktiske forsøkene ble utført hos den svenske bedriften Ryds Båtar AB. I disse forsøkene ble sprøytbart glassfiber og vannfast finér sammenliknet. Testene ble utført på sandwichlaminater med GFK som yttersjikt og med varierte kjerner. Testene viste signifikant forbedring av bøyestyrke og skruholdfasthet, der begge egenskaper doblet seg under forutsetninger som erstatning med tilsvarende tykkelse (9 mm) og utførelse i fuktig miljø. Den resirkulerte glassfiberen måtte gjennom en sikteprosess fra seks millimeter til en halv millimeter. Det finnes fortsatt utstyr som ble utviklet gjennom denne prosessen i Gøteborg, tilgjengelig hos produsenten Applicator AB. Karakteren settes samlet for fritidsbåter til 3. Dette med grunnlag i at testene er positive, men gamle, og kommersiell anvendelse har uteblitt.

I Rahimizadeh et al. (2019) ble det gjennomført en studie på å benytte oppmalt glassfiber som filamentmateriale i 3D-skrivemaskiner. Her ble grindermaskin med hammermølle og sikt benyttet for å forbehandle turbinbladene, før disse ble pelletert sammen med PLA pellets. Det var nødvendig å inkludere tørking underveis i produksjonen av filamentet for å unngå fuktproblemer i ekstrusjonsprosessen. Siden vanlige filamenter er termoplastiske, og derfor innehar mindre stivhet og styrke enn hva som er ønskelig, er det fordelaktig å inkludere oppmalt glassfiber for å forbedre den mekaniske utfordringen. Det ble påvist at å inkludere for store mengder glassfiber var uheldig for utfallet. Ved å benytte 5 % oppmalt glassfiber viste testene til en økning i elastisitet og styrke på henholdsvis 16 % og 10 % i forhold til typiske filamentprodukter. Denne studien påviser at å benytte oppmalt glassfiber i filamentet til 3D-skrivere er en lovende anvendelse. Derfor vurderes denne anvendelsen til karakteren 3.

Anvendelse av oppmalt glassfiber som tilslag i betong er forsøkt flere ganger både i næringslivet, og i forskningen uten å gi tilfredsstillende resultater (Correia et al., 2011).^{[1][6]} Yazdanbakhsh et al. (2018) har testet ut et konsept der kompositter prosesseres til små avlange elementer som de har valgt å kalle «nåler». Forsøket med disse nålene var en forlengelse av en tidligere studie, der runde, brikkeformede elementer ble benyttet uten å gi oppløftende resultater. I studien med nåler ble disse elementene benyttet til å erstatte 5 % og 10 % per volum av tilsetningsstoffet i diverse betongmikser, og effektene på den ferdige betongen ble undersøkt. I forbehandlingen der GFK ble kuttet opp var det forskjell på

om fibrene var tverrgående eller langsgående i elementet. Dette kom av hvilken skjæreretning forskerne benyttet. Testene ble kategorisert deretter, og flere interessante funn kom fram av testingen. Nålene leverte på alle nødvendige egenskaper sammenliknet med tilsetningsstoffet. De ga også en signifikant økning i kraftigheten i betongen, men denne effekten ble noe dempet av nålene med tverrgående fiber. Hvis man klarer å prosessere fibre med primært langsgående fibre vil de forbedrende effektene på ferdigbetongen øke. Videre studier på skjæreteknikk, samt holdbarhet og langsiktig ytelse er nødvendig før dette kan testes i bygg, og videre kommersialiseres. Å anvende glassfiber i elementform i betongmikser er å anse som en mer aktuell løsning enn oppmalt glassfiber. Denne anvendelsen får karakteren 3.

I Jensen og Skelton (2018) ble det forsøkt å benytte knust glassfiber i sponplater og glassfiberstøv som et tilslag i maling. For sponplatene var ønsket å tilføre de knuste fibrene for å øke styrken i platene og samtidig redusere tykkelsen. Dette kan være fordelaktig ved lagring, transportering og installasjon av platene. Testingen ga ikke ønskede resultater. Problemene var blant annet at materialet ikke var homogent nok, og derfor ikke leverte slik standarden krever. Det ble gjort et forsøk på å løse dette ved sikting av massen, men problemet da var at massen ikke fordelte seg tilstrekkelig utover. Når det kom til støvtilsetningen i malingen fikk UV-stabiliteten en påvist økning, og støvet spredte seg fint i blandingen. Støvet leverte minst like gode egenskaper som de vanlige tilsetningsstoffene. En barriere med denne anvendelsesmetoden er at støvet ikke kan være større enn 50 µm. Dette krever ytterligere prosessering og sortering, noe som øker kostnadene. En annen barriere med anvendelsen i maling er kravet til dokumentasjon av den kjemiske sammensetningen i kompositten som støvet opprinnelig kom fra. Dette er kritisk for å benytte støv til denne anvendelsen i kommersiell skala. Videre studier kreves for begge anvendelser for å overkomme utfordringene som ble identifisert i Jensen og Skelton (2018). Sponplatene karaktersettes til 2, og tilslag i maling til 3.

Det finnes en rekke forskningsprosjekter på anvendelser av behandlet komposittavfall. Det europeiske storskala-initiativet ECOBULK er ett av disse (Vilkki, 2018). Formålet i dette prosjektet er å demonstrere at ombruk, oppgradering, oppussing og resirkulering av komposittprodukter er mulig, profitabelt og bærekraftig. Her benyttes komposittavfallet i tilsvarende produkter i bil-, bygg- og møbelindustrien, og det fokuseres på å utvikle gode løsninger over hele verdikjeden for å sikre en fullstendig sirkulær modell. Modellene skal introdusere lukkede kretsløp, som vil si at industrien der avfallet oppstår også er brukere av det resirkulerte produktet. For bilindustrien skal det utforskes å benytte avfallet fra egen industri til nye, innvendige bildeler som gjerne er av hard plast. For møbelindustrien vil avfall fra brukt møblelement benyttes i nye møbler. For bygg- og rivningsindustri, der vindkraften gjerne er inkludert, vil små strukturer bestående av kompositter av tre og plast benyttes i utendørsbenker og

leskurmoduler for besøkende, samt servicehytter og informerende skilt til de ansatte. Dette er til forskjell fra de opprinnelige planene om bruk i midlertidige skur, terrassebord og gjerder. Tre-komposittplatene inneholder 20 % komposittavfall fra vindturbiner (WMW, 2018). De nevnte anvendelser skal demonstreres ved KymiRing Motorsport Center, et nytt motorsportanlegg i Finland. Da dette er et pågående prosjekt får de nevnte bruksløsningene karakteren 2.

Et annet storskala demonstrasjonsprosjekt er FiberEUse (Colledani, u.å.-a). Her er fokuset rettet på resirkulering av ferdigbrukte fiberkompositter. Formålet er å støtte og oppmuntre komposittbransjen i overgangen til en sirkulærøkonomisk modell for produktenes verdikjeder. Prosjektet er delt inn i tre deler: Mekanisk gjenvinning, termisk gjenvinning og gjenvinning av karbonfiberprodukter med fokus på forebyggende undersøkelses- og reparasjonsprosesser. I studien med mekanisk gjenvinning er ikke vindturbinblader definert som et av de tilførte produktene, men det er tenkelig at dette likevel er aktuelt. Her skal blant annet badekar og dusjkar, personlige produkter ved 3D-skriving og ski og annet sportsutstyr testes med en tilført mengde av oppmalt glassfiber på henholdsvis 40 %, 30 % og 10 % (Colledani, u.å.-b). I likhet med ECOBULK vil alle anvendelsene i dette prosjektet få karakteren 2, da disse ennå er under pågående testing.

I Finland jobber ingeniørbedriften Conenor med å utvikle komposittmaterialer bestående av naturlig fiber som treverk og plastmaterialer som GFK (Vilkki, u.å.). Deres produkt kommer ut av en ekstrusjonsprosess der tre og kompositter sammenføres og skaper lette konstruksjonsmaterialer. Denne prosessen utføres av deres internasjonalt patenterte maskin kalt for «Conex Wood Extruder», som er det eneste ekstruderingsanlegget som er kapabel til å produsere mangesjiktet komposittstruktur med høyt fiberinnhold. Andelen hele eller oppmalte fibre kan ligge på mer enn 70 % basert på vekt. I forkant av denne prosessen males turbinblader og andre plastmaterialer opp til en pulverisert masse. Disse konstruksjonsmaterialene virker å ha mange bruksområder, blant annet i byggeindustrien. Bedriften nevner mulige bruksområder som kledning til bygg, terrassebord, veggpaneler, takpaneler, dør og dørkarmer, gjerder, plankestier, trapper og gelendre. Det er gjennomført demonstrasjonsstudier i et bygg i San Sebastian i Spania og et vedskur i Finland. Per i dag leverer selskapet to anlegg basert på den oppmalte glassfiberen, i form av en røykebu i Oxford og motorsportanlegget i Finland som nevnt i sammenheng med prosjektet ECOBULK.^[4] Både møblement og byggematerialer vil bli demonstrert. Motorsportanlegget skal bygges i Kausala i løpet av 2020. Conenor fremstår som en rådgivende og produktutviklende aktør med flere fullførte demonstrasjonsprosjekter, og deres anvendelser får derfor karakteren 4. Motorsportanlegget forblir med karakteren 2 da dette er et pågående prosjekt.

Det har vist seg at resirkulert glassfiber kan benyttes som isoleringsmateriale i for eksempel støyskjermer. To danske aktører i Miljøskærm og G-Fiber har etablert sine bedrifter rundt denne anvendelsesmetoden. Miljøskærm hevder at deres støyskjermer har akustiske egenskaper på nivå med eksisterende produkter. Deres produkter er blitt testet og dokumentert av det danske teknologiske institutt der fysiske egenskaper som brennbarhet, vindmotstand og hygroskopiske egenskaper etterfølger de kravene som gjelder (Miljøskærm, u.å.-c). Det hevdes at støyskjermene kan resirkuleres på nytt etter bruk, noe som indikerer et lukket kretsløp for materialene. I tillegg vil det resirkulerte glassfibermaterialet erstatte dyrere og mer energikrevende materialer til fremstilling (Miljøskærm, u.å.-b). COWI har på oppdrag fra Miljøskærm analysert klimafotavtrykket av deres produkt over livsløpet i motsetning til standardiserte støyskjermer av aluminium og mineralull. Konklusjonen som kommer av rapporten er at miljøbelastningen i form av utslipp av CO₂-ekvivalenter og energiforbruk i form av MJ reduseres med henholdsvis 60 % og 40 % (Miljøskærm, u.å.-a). G-Fiber tilbyr tilsvarende løsninger, og har blant annet oppstilt en sju meter høy og 105 meter lang stasjonær støyskærm som er blitt målt til å dempe støy med 28 desibel (G-Fiber, u.å.). De tilbyr også mobile støyskjermer og oppmalt glassfiber. G-Fiber hevder at deres stasjonære vegger kan gjenvinnes fullstendig etter bruk. Å benytte glassfiber som et isolerende materiale i støyskjermer er beviselig en gunstig og økonomisk anvendelse, og blir derfor evaluert til karakteren 5.

I en masteroppgave ved institutt for Produktutvikling og Materialer fra 2007 ble det undersøkt om resirkulert GFK kan benyttes som en tilsats i asfalt.^[11] Det kom fram av oppgaven at den oppmalte glassfiberen tilførte asfalten forbedrede egenskaper, og et alternativ til cellulose som benyttes i mange europeiske land. Fibertilsetning i asfalten ligger på ca. 7 % av veinettet, og en økning i slik tilsetning vil sikre bedre veier og reduserte vedlikeholdskostnader. Tilførsel av glassfiber i asfaltproduktet vil bety en reduksjon i miljøbelastning grunnet økende grad av gjenvinning, og en reduksjon i støvproduksjon som følge av slitesterke veier. Markedsprisen for cellulose i 2007 lå på tre kr/kg, mens de samlede kostnadene for oppmalt glassfiber lå den gang på mellom fire og fem kr/kg, avhengig av teknologi og kapasitet. Det ble underveis i oppgaven gjennomført et pilotprosjekt i Fredrikstad, og man lyktes med å heve prisen på sortert og gjenvunnet materiale fra GFK med tre kr/kg. Det ble her funnet at kapasitetsoptimering er nødvendig for å kutte kostnadene. Avslutningsvis konkluderes det at gjenvunnet glassfiber innenfor markedssegmentet asfalt og veibygging innehar et godt potensial.^[11] Denne anvendelsen får karakteren 3, da testene er oppløftende, men ikke testet på industriell skala.

En annen anvendelse som er viet stor oppmerksomhet blant eksperter^{[11][12]}, næringsliv (Reprocover, u.å.; Vilkki, 2017) og forskere (Job, 2013) er jernbanesviller. Dette er komponenter som jernbaneskinnene hviler på, og som ligger i mellom pukkunderlag og skinne (Wisting, 2020). Det har

tradisjonelt vært benyttet sviller av betong eller tre i Europa, men det er nå en trend i å fase disse ut. Tresvillene fordi de er behandlet med kreosot som nå produseres i begrenset omfang etter grep fra EU-kommisjonen (2011), og betongsviller fordi de krever mye energi å fremstille og har totalt sett et stort klimafotavtrykk.^[12] Det har også vist seg at betongsvillene har utfordringer når det kommer til støy og vibrasjon ved bruk, noe komposittsviller innehar en dempende effekt på. I tillegg til trykket fra sporvognene må produktene også tåle UV-stråling og ha en levetid på minst 30 år.^[12] Forbudet mot tresviller har ledet til at den norske t-baneaktøren Sporveien har benyttet komposittsviller i Oslo. I det aktuelle prosjekt estimeres levetiden til 50 år sammenliknet med de kreosotbehandlede tresvillene, og motstandsdyktigheten mot brann og bøying er større (Rustad, 2018).

For skinneganger som er designet for betongsviller ble sviller av betong benyttet, men det anses som mulig å substituere også dette med komposittsviller fremover.^[12]

Komposittsvillene på markedet i dag er i stor grad basert på jomfruelige materialer, men det er antydning at det er mulig å benytte resirkulerte GFK i disse villene.^[11] Dette er også vist gjennom tester av bedriften Reprocover i Belgia og studier utført av Conenor. Reprocover er en bedrift som produserer kabelkanaler og overganger til jernbane av resirkulert komposittmateriale, i tillegg til en rekke andre formål som brannforebygging og urbane avfallsdunker og askebegre (Reprocover, u.å.). I 2013 utviklet de en komposittsville med avfall fra glassfiberprodusenten 3B (Job, 2013). Conenor har vist gjennom studier at komposittsviller med tilføring av oppmalte GFK er kostnadsdyktige og har derfor gode vilkår for å gjøre en inntreden i markedet, men påpeker også at det er nødvendig med videre forskning og utvikling for å forbedre villenes mekaniske egenskaper (Vilkki, 2017). Denne anvendelsen, der oppmalt glassfiber inkluderes i komposittsviller, gis karakteren 4 da det kreves mer forskning før dette kan implementeres kommersielt. Reprocovers øvrige produkter gis karakteren 5 da disse selges kommersielt i dag.

Forskningsgruppen Borg Plast-Net har utformet konseptet om å anvende oppmalt glassfiber i plansiloer som er rotasjonsstøpt med PELD-pulver.^[12] Plansiloer er benyttet i landbruket, til lagring av korn og dyrefôr (Vangen, 2018). Dette er også et konsept som ikke har nådd en kommersiell skala ennå, da betong av standard benyttes som støpmateriale. Innblanding av oppmalt glassfiber i pulvermiksen kan ha en forsterkende effekt på støpet. Dette konseptet krever videre vitenskapelig testing og får derfor karakteren 2.

Biobe AS produserer beskyttelsesstrukturer, kapsler og deksler som benyttes på havbunnen.^[12] Disse produseres med godstykker på flere centimeter, og produktene lamineres lagvis. Støpprosessens hastighet må begrenses da støpet utøver stor varmeutvikling i herdingsfasen. Det er utformet en idé

om å benytte oppmalt GFK som fyllstoff for å redusere harpiksmengden og gjøre denne prosessen raskere.^[12] Ingen prøvestøp er gjennomført til nå, og anvendelsen får derfor karakteren 1.

Svenske BIA Hårdplast AB produserer blant annet spesialtanker til avløp.^[11] Disse tankene produseres gjennom et rotasjonsstøp hvor formen roterer horisontalt og polyester, glass og fyllstoff sprøytes fra en robot sentrert inne i formen. For 10 år siden valgte bedriften å bytte integrerte forsterkningsbånd i herdeplast med forsterkningsbånd der oppmalt glassfiber stod for 25 % av materialet. Dette var mulig gjennom justeringer på produksjonsutstyret, og inkludering av et sandinnmatingsbånd. Denne anvendelsen er benyttet i kommersiell skala over en lenger tidsperiode, og gis derfor karakteren 5.

Det finnes mange materialstrømmer med brukte kompositter, et eksempel på dette er kretskort benyttet i digitale maskiner. Avfallsstrømmene av brukte kompositter er større fra bygningsindustrien, kretskortindustrien og transportindustrien enn hva den er fra vindkraftindustrien i dag. Det kan være aktuelt å samle disse avfallsstrømmene i ett, og benytte disse som et tilskudd i en materialstrøm med mindre kvalitetskrav. Dette gir et grunnlag for en bedre business-case for gjenvinning. Denne anvendelsen står ennå i idéfasen og det gjenstår å utforme konsepter rundt hvordan dette kan utarbeides, samt videre forskning og testing.^[1] Derfor vurderes denne anvendelsen til karakteren 1.

Pyrolyse

Ut av en pyrolyseprosess kan man få tre anvendbare produkter: fiber, olje og gass. Dette er bevist gjennom studiene Giorgini et al. (2015), Giorgini et al. (2016), Lopez et al. (2012), Torres et al. (2000) og Akesson et al. (2012). Raten på produktene varierer som følge av hvilke prosessbetingelser som er valgt i hvert enkelt anlegg, samt de tilførte produktenes kjemiske innhold. Kvaliteten på produktene varierer også av dette, noe som har en påvirkning på de anvendelsesmulighetene som gjelder for hvert enkelt produkt. Da produktene ut av prosessen er bevist, gis konseptet karakteren 3. Vi vet at pyrolyse har en TRL som tilsvarer at den er moden for industriell skala, men det er ennå ingen internasjonale aktører som utmerker seg i bruken av dette for å behandle GFK-avfall.

I Giorgini et al. (2015) og Giorgini et al. (2016) ble samme prosess benyttet på henholdsvis KFK og GFK. De studerte produktene ble kjørt i 70 kg batcher i et pilotanlegg. Fibrene ble etterbehandlet med oksidering på 500 og 600 °C. De tilførte produktene benyttet i analysen om KFK var kapp fra et produksjonsanlegg, mens for GFK var det skrotede ruller av glassfiberark. Produktene ble ikke mekanisk forbehandlet, men pyrolysert på 500, 550 og 600 °C (samt 450 °C for KFK), og for å fjerne oksygen ble nitrogen gass tilført i pyrolysekommeret. I behandlingen av GFK ble hydraulisk beskyttelse

tillagt prosessen av sikkerhetsårsaker. Kondensering av prosessgass ga en flytende fraksjon sammenliknbar med brenseloljer. I studien av GFK ble også prosessvann kondensert, slik at væsken måtte sentrifugeres. Til forskjell fra Torres et al. (2000) fant Giorgini et al. (2016) hydrogengass i gassfraksjonen, noe som ga en høyere brennverdi (31-34 MJ/Nm³). I samme studie ble det konkludert at pyrolyseoljen kan benyttes som brensel uten behov for etterbehandling. Her var raten mellom olje, gass og fiber henholdsvis 20, 40 og 40 % basert på vekt. Det ble vist i begge studier at å tillegge et oksideringssteg i prosesslinjen ga høyere kvalitet på fibre, slik at disse kunne benyttes i nye GFK og KFK. De flytende og gassholdige fraksjonene i Giorgini et al. (2015) kunne forsyne omtrentlig 75 % av prosessens energibehov.

Torres et al. (2000) utførte et pyrolytisk forsøk på herdeplastkompositter av glassfiber, med fokus på anvendelsen av biproduktene gass og olje. Forsøkene ble utført i lab på 300, 400, 500, 600 og 700 °C i 30 minutter per batch. Raten mellom fiber, gass og olje var henholdsvis 72-82, 6-12 og 9-13 % basert på vekt. Mengdene varierte mellom høyeste og laveste prosessstemperatur. Kondensering av gass til væske ble utført ved hjelp av simpel kjøling av kammerveggene og senere i en vannkjølt varmeveksler. Slik fikk man separert de to fraksjonene. Det ble påvist at pyrolyse på 300 °C ikke var av en tilstrekkelig høy temperatur, slik at komposittene var ufullstendig og uregelmessig pyrolysert. Det ble også antatt at vannet i hovedsak kom fra fukt i komposittmaterialet. Funnene i studien viste at oljen hadde høy brennverdi (34-37 MJ/kg) og bestod av utslippsfri væske, mens gassen hadde en lav brennverdi som følge av store andeler karbonoksider (14-16,4 MJ/Nm³). 40 % av oljen kunne blandes inn med bensin, mens 60 % kunne blandes inn med en fyringsolje til varmeproduksjon. Gassen kunne resirkuleres og brukes internt i anlegget.

I Lopez et al. (2012) ble en litt annen variant av pyrolyse benyttet. Forfatterne har valgt å kalle den utformede prosessen termolyse, og har senere i prosessen sintret og krystallisert glassfibre til glasskeramiske materialer. Først ble GFK pyrolysert på 550 °C i 3 timer. Dette ga en rate mellom fiber, olje og gass på 68, 24 og 8 % basert på vekt. Brennverdien på oljen var 34 MJ/kg, likeverdig oljebrenslar, mens gassens brennverdi ble bedømt som lav med en verdi på 26 MJ/Nm³. Fibrene ble konvertert til et glasskeramisk materiale. Dette ble gjort ved å male opp fibret i en grinder, mikse oppmalt fiber med natriumoksid (Na₂O), og så smelte pulveret i 1450 °C. Det smeltede pulveret ble lagt i vann, og her ble det skapt sintret glass som siden ble krystallisert ved 1013 °C. Det sintrede glasset kom ut av prosessen i elleve fraksjoner, separert med sikt. De resirkulerte produktene var glasskeramisk materiale, olje og gass. Det glasskeramiske materialet kan brukes i bygningsprodukter som kompakte vegg- og gulvfliser til bad og kjøkken. Produktet har stor designfrihet, fordi man kan variere mengdene av de forskjellige fraksjonene og få varierte typer fliser. Oljen kan mikses med kommersielle fyringsoljer, mens gassen

var brukbar til å varme reaktoren ved varmegjenvinning. Konseptet gis karakteren 3, da det til nå ikke ser ut til å være testet i industriell skala.

Akesson et al. (2012) forsøkte å mikrobølgepyrolysere avhendede vindturbinblader. Åtte tonn turbinblader ble fragmentert til en fraksjon med fiberlengde på 7-30mm og så pyrolysert ved 300-600 °C i 90 minutter. Batchene var på 3 kg hver, og nitrogengass ble tilført. Fibermatter ble produsert underveis, for så å bli laminert med ulike mengder jomfruelige fibermatter. Det ble testet forskjellige fibermatter med 0, 25, 50, 75 og 100 % jomfruelig fibre representert. Forfatterne fant at laminat med 25 % resirkulert fiber ga best resultater med relativt gode mekaniske egenskaper. Komposittene basert på dette laminatet hadde en nedgang i bøyestyrke og bøyelighet, og kan derfor anvendes til formål med mindre krav til mekaniske egenskaper. Det ble diskutert om en industriell skala kunne gi en økning i kvaliteten på den resirkulerte fiberen. Pyrolyseoljen kunne benyttes som brensel, og forfatterne antyder at fibre best benyttes i termoplastiske harpikser.

I Norge har vi én aktør som anvender mikrobølgeassistert pyrolyse (MAP) kalt for Noranergy.^{[11][16]} Noranergy har utviklet et konsept der GFK kan tilføres et pyrolysekammer utstyrt med en rund skive av silisium, og hvor produktene fra prosessen kommer i form av brennbare gasser. Gassen kan drive en turbin som konverterer energien til elektrisitet. Eksosvarmen kan benyttes til å varme opp vann som siden føres ned i energibrønner i berggrunnen, og lagrer varmen til vinteren når behovet for oppvarming oppstår. I likhet med tidligere nevnte pyrolyseforsøk blir nitrogen benyttet i innmatingsapparatet for å forhindre tilstedeværelse av oksygen i reaktoren. Konseptet med MAP beskrives som en flash-pyrolyse der hydrokarboner utskilles ved hjelp av mikrobølger til kondenserbare og ikke-kondenserbare gasser, hovedsakelig metangass, som i neste steg kan foredles til flytende drivstoff. For å sikre fullstendig pyrolysering av råstoff er det nødvendig å hensynta mikrobølgers penetrasjonsevne. Den ligger på rundt 30mm og medfører at råstoffet bør ha en tilsvarende maksimal tykkelse. Dette medfører at pyrolyserbart råstoff må formales i en forbehandlingsprosess. MAP-prosessen er kontinuerlig og sikrer stabil drift og utbytte over tid. Operatøren utøver stor prosesskontroll, og lange fibre kan derfor uthentes.^[16] Slike fibre kan benyttes i nye kompositter.^[11] Dette konseptet har stor fleksibilitet, og produktene kan anvendes til mange formål. Det hevdes at konseptet har høy kost/nytte-verdi.^[11] MAP-prosessen er anvendt i kommersielle anlegg, bildekk, plast og flere typer biomasse. Kompositter er testet med godt resultat.^[16] Konseptet gis karakteren 4, da det ennå er i startfasen av utviklingen mot en avhendingsmetode på industriell skala for GFK.

FiberEUse skal i sitt prosjekt utføre en casestudie med termisk gjenvinning (Colledani, u.å.-c). Her er avfall fra vindturbiner og biler benyttet som tilførsel til prosessen, og utbyttet kommer i form av bilkomponenter som clutchpedaler, låsepaneler og støttedeksel på motorpansere. Et annet eksempel for anvendelse gjennom pyrolytisk behandling er takrenner og takplater i plast, der sistnevnte krever transparente egenskaper og derfor ikke er et mulig produkt fra mekanisk resirkulert glassfiber. For bilproduktene skal en tilførsel av 20 % glassfiber testes ut. Som med den andre casestudien vil disse anvendelsene få karakteren 2 da prosjektet ikke er gjennomført.

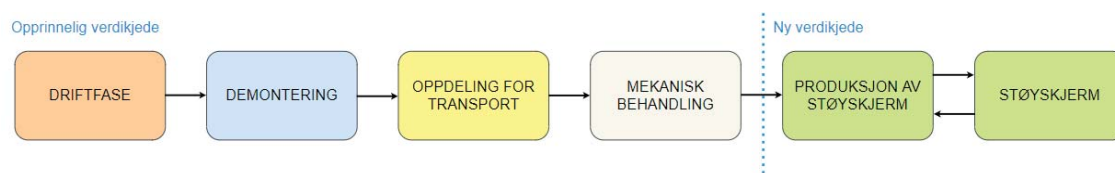
Jernbanesviller ble nevnt som en anvendelse fra mekanisk resirkulering. Det samme er gjeldende for glassfibre som kommer ut av en pyrolysebehandling. En sammenlikning av sviller med korte og lange fibre ble utført av Conenor (Vilkki, 2017). Forskjellene mellom disse produktene er at de kontinuerlige fibre har en større styrke og gir langt bedre mekaniske egenskaper enn svillene hvor oppmalt glassfiber benyttes. Samtidig er det en langt høyere markedspris for komposittsvillene basert på kontinuerlige fibre, noe som kan hindre kjøp fra jernbaneaktørene. Conenor konkluderer derfor med at det er et større potensiale i å forbedre svillene som kan anvendes fra produktet som kommer ut av den mekaniske prosessen. Det japanske selskapet Sekisui beviser at sviller med store mengder kontinuerlige fibre kan være konkurransedyktige i dag.^[12] Selskapet har nylig levert komposittsviller til Bane Nor, og etterspørselen estimeres til 14 tusen sviller årlig. De neste ett-to årene vil det benyttes 25 000 tonn komposittsviller i Europa, som tilsvarer 250 000 sviller. Dette antallet forventes å øke i årene fremover.^[12] Komposittsvillene er i stor grad basert på termoplast i dag, men inkludering av lange flak av glassfibre ses på som lovende da GFK-materialene har en gunstig, høyere egenvekt.^[12] Biobe og Østfoldforskning er inkludert i et prosjekt kalt «Biobane», og målet er å utforme sviller som kan resirkuleres i et lukket kretsløp. Da anvendelsen av resirkulerte fibre fra pyrolyse i jernbanesviller er et utestet konsept velger jeg å gi denne karakteren 2.

Co-prosessering

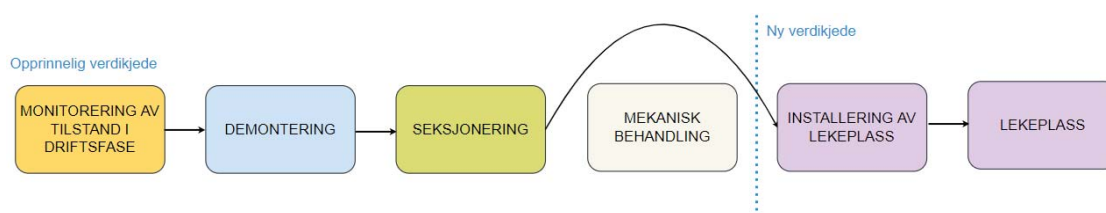
Som produkt ut av co-prosesseringen i Geocycle sitt anlegg får man sement (Schmidl et al., 2010).^[5] Vindturbinbladene kuttet til ti meter ved vindkraftanlegget, forbehandles mekanisk hvor automatiserte sager kutter størrelsen ned til én meter, før shreddere kutter bladene videre til stykker med en lengde på under 50 mm. Turbinbladene substituerer brensler i samforbrenningen, og leverer derfor også varme som et produkt. Varmen benyttes direkte internt i anlegget og substituerer behovet for bruk av fossile brensler. Asken som oppstår i forbrenningsprosessen benyttes fullstendig i klinskermiksen i neste produksjonsledd, og kan substituere annet råmateriale om det innehar riktig kjemisk innhold. Denne løsningen omtales som mest sirkulærøkonomiske alternativet avhendere av

turbinblader og produksjonsavfall har i dag.^{[1][2]} Sementproduktet som kommer ut av denne prosessen kan benyttes både i et åpent og lukket kretsløp. Ved åpent kretsløp benyttes det til generelle anvendelser i bygninger og andre konstruksjoner, og inkorporeres i nye materialstrømmer. I et lukket kretsløp benyttes det utvinnede sementproduktet i fundamenteringen av nye vindkraftverk, og forbedrer vindkraftverkens klimaregnskap ytterligere. Konseptet gir karakteren 5 da det har vært i drift over mange år, og har vist sin levedyktighet på industriell skala.

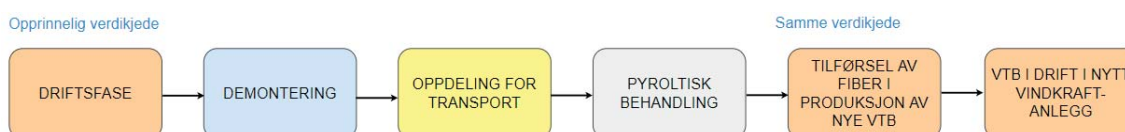
For å oppsummere og illustrere dette underkapittelets funn er det produsert tre verdikjeder, se figurene under. Her står Figur 8 for en verdikjede der vindturbinbladet resirkuleres mekanisk og benyttes som en sekundær råvare i en ny verdikjede, her eksemplifisert ved støyskjermkonseptet. I denne verdikjeden er det allerede et fungerende lukket kretsløp, som gir anvendelsen en høyere nytteverdi. Figur 9 viser hvordan en verdikjede for ombruk kan se ut. Som vist kan behandlingstrinnet unngås i en slik verdikjede, noe som senker kostnadene og gjør prosessen enklere å gjennomføre. Denne verdikjeden krever en økt innsats i driftsfasen, da dokumentasjon er nødvendig for å sikre komponentens kvalitet og egnethet til ombruksformålet. Samtidig må et designteam være tilgjengelige for oppdraget. I Figur 10 vises et eksempel der verdikjeden er i stand til å skape et internt lukket kretsløp, der de resirkulerte fibrene benyttes som sekundær råvare i nye vindturbinblader. Dette er per i dag kun mulig gjennom en pyrolytisk behandling.



Figur 8: Et eksempel på en verdikjede der et vindturbinblad resirkuleres og tilføres en ny verdikjede med lukket kretsløp.



Figur 9: Et eksempel på en verdikjede der et vindturbinblad omformes til ombruk med nye formål.

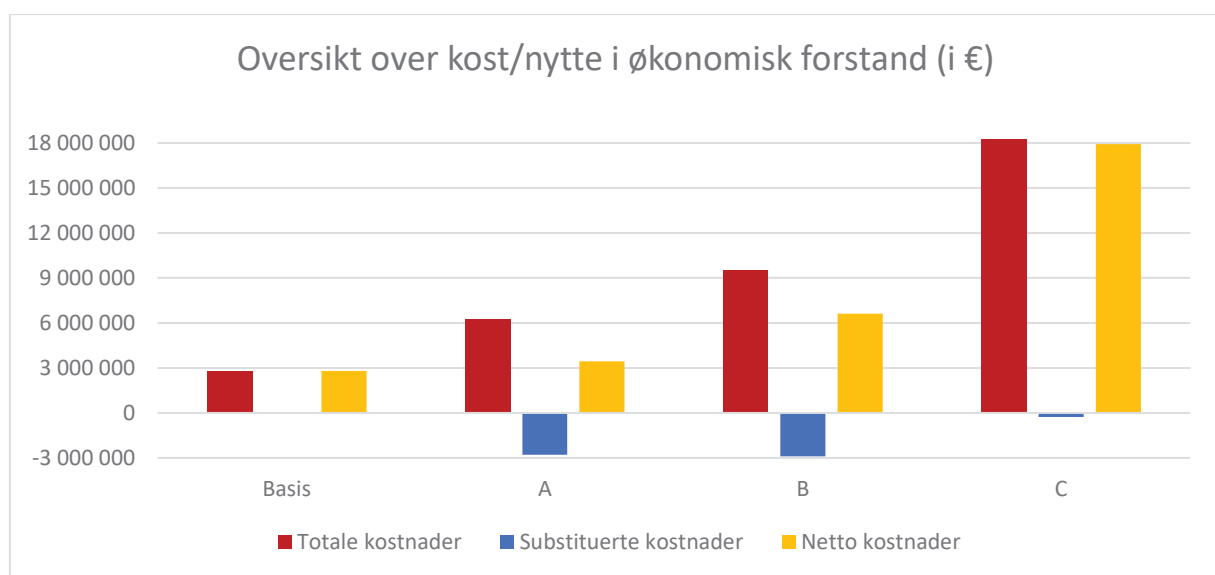


Figur 10: Et eksempel på en verdikjede der et vindturbinblad resirkuleres til ny produksjon, og skaper et lukket kretsløp.

5.3. Casestudie: Guleslettene Vindpark og kost/nytte for utvalgte behandlingsmetoder

Forskningsspørsmål 3: Med Guleslettene Vindpark som case: Hva er kost/nytte-vurderingen av energiutnyttelse, ombruk og materialgjenvinning av komponenter fra anleggets turbinblader, både økonomisk og miljømessig, ved alternative behandlingsmetoder?

Beregninger for kost/nytte ble utført gjennom de forutsetninger som ble presentert i kapittel 5. Dette ble gjort adskilt for de to perspektivene, økonomi og miljø. Resultatene er presentert i Figur 11 og Figur 12. De sammenliknede behandlingsmetodene er basisscenarioet deponi, energigjenvinning i et forbrenningsanlegg (scenario A), co-prosessering i et sementproduksjonsanlegg (scenario B) og ombruk i et annet vindkraftanlegg (scenario C). Basisscenarioet opptre som alternativkostnad for de evaluerte behandlingsmetodene. Forklaringer og funn er beskrevet under hver figur.



Figur 11: Oversikt over resultater fra kost/nytte-vurderingen av utvalgte behandlingsmetoder. Figuren viser de økonomiske funnene.

I Figur 11 vises resultatene for de økonomiske beregningene av basisscenarioet, samt behandlingsmetode A, B og C. Røde søyler er de totale økonomiske kostnadene, de blå søylene er de substituerte økonomiske kostnadene, mens de gule søylene er netto økonomisk kostnad for hver behandlingsmetode.

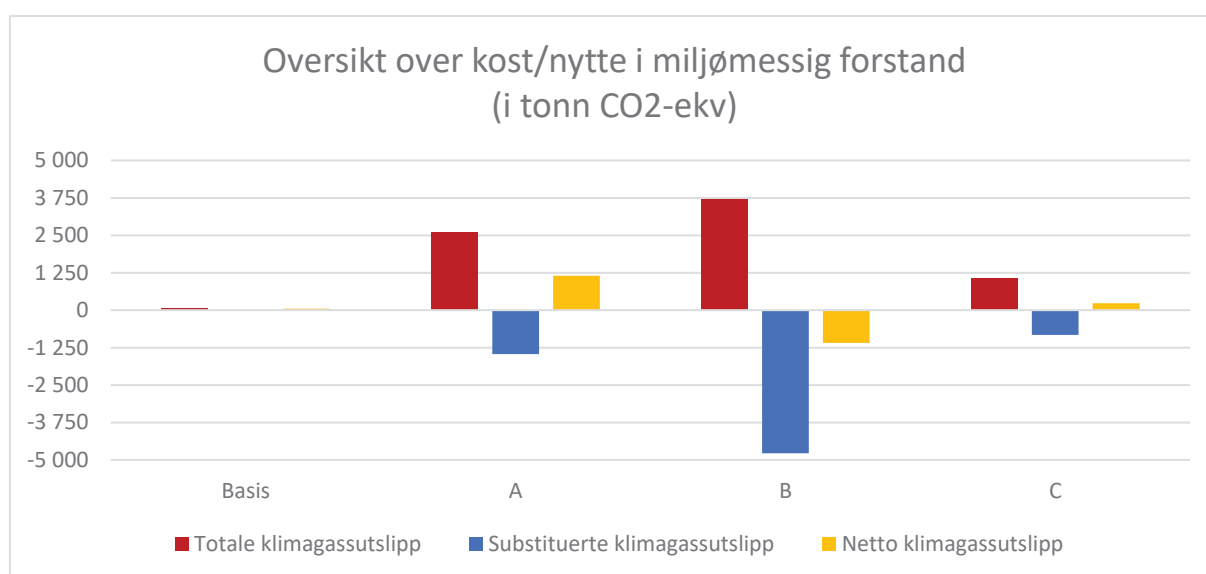
Den totale kostnaden for basisscenarioet ble beregnet til å være om lag 2,79 millioner €. Av disse kostnadene stod transporten for 65 % av bidraget, og det til tross for den korte forutsatte distansen til

deponiet. Demontering av kran kom på om lag 658 000 €, og stod derfor for 67 % av behandlingskostnaden. Denne sluttbehandlingen gir ingen substitusjon, så netto økonomisk kostnad blir det samme som total kostnad.

For behandlingsmetode A ble den totale kostnaden beregnet til 6,23 millioner €. Transporten bidro med 81 %. Av behandlingskostnadene på 1,2 millioner €, stod demontering med kran for 55 % av kostnadene. Her substitueres kun alternativkostnaden, og netto økonomisk kostnad beregnes dermed til 3,44 millioner €.

For behandlingsmetode B beregnes den totale kostnaden til 9,51 millioner €. Av disse kostnadene stod transporten for 83 % av bidraget. Demontering med kran stod for kun 41 % av behandlingskostnadene, selve co-prosesseringen stod for resten. Substituert kostnad havner på 2,89 millioner €, med opphav i substituert fossilt brensel og alternativkostnad. Tilsetningsstoff som sand var ikke inkludert i forutsetningene. Dette gir en netto økonomisk kostnad på 6,62 millioner €.

For behandlingsmetode C ble den totale kostnaden beregnet til 18,21 millioner €. Transporten bidro med 79 %. For behandlingskostnaden stod deponering av to byggetrinn med brukte vindturbinblader for 52 %, oppkjøp og krankostnader delte på resten. Ved denne behandlingen substitueres kun ny turbinproduksjon for anlegg 2. Med dette lander nytteverdien for delscenarioet på 275 000 €, når prisen for ny vindturbin ligger på 55,25 €/tonn og referanseturbinene veier 2486 tonn. Dette gir en netto økonomisk kostnad på 17,94 millioner €.



Figur 12: Oversikt over resultater fra kost/nytte-vurderingen av utvalgte behandlingsmetoder. Figuren viser funnene relatert til miljøpåvirkning.

I Figur 12 vises resultatene for de miljørelaterte beregningene av basisscenarioet, samt behandlingsmetode A, B og C. Røde søyler er totale klimagassutslipp, blå søyler er substituerte klimagassutslipp, mens de gule søylene er netto klimagassutslipp for hver behandlingsmetode.

Det totale klimagassutslippet for basisscenarioet ble beregnet til å være 50 tonn CO₂-ekv. Her stod transporten for 72 % av utslippene. Dette til tross for den korte avstanden. Denne sluttbehandlingen gir ingen substitusjon, så netto klimagassutslipp blir likt som totale klimagassutslipp.

For behandlingsmetode A ble det totale klimagassutslipp beregnet til 2 615 tonn CO₂-ekv. Av utslippene stod transporten for 26 %, til tross for lange avstander på vei. Resten av utslippene kommer fra forbrenningen, som er beregnet manuelt. Her substitueres alternativkostnaden, samt utslipp fra forbrenning av avfall. Netto klimagassutslipp beregnes dermed til 1 147 tonn CO₂-ekv.

For behandlingsmetode B beregnes det totale klimagassutslippet til 3 684 tonn CO₂-ekv. Nærmest alt kommer fra forbrenningen, selv om utslipp fra el-forbruket også er inkludert. Transporten stod for kun 4 %. Substituert kostnad havner på 4 783 tonn CO₂-ekv, med opphav i substituert fossilt brensel. Her stod den unngåtte forbrenningen for 81 % av utslippene, fremstillingen stod for resten. Tilsetningsstoff som sand var ikke inkludert i forutsetningene. Dette gir et netto klimagassutslipp lik -1 099 tonn CO₂-ekv, altså drøyt 1 000 tonn CO₂-ekv i sparte utslipp i sammenheng med alternativet der GFK ville blitt deponert og nye fossile brenslere produsert og deretter brukt i sementfabrikken.

For behandlingsmetode C ble det totale utslippet estimert til 1 057 tonn CO₂-ekv, substituerte utslipp til 826 tonn CO₂-ekv og netto klimagassutslipp til 231 tonn CO₂-ekv. De substituerte utslippene kommer fra unngått produksjon av nye vindturbinblader. Transporten stod her for 56 % av det totale klimagassutslippet.

I Tabell 14 blir det vist hvordan de forskjellige scenarioenes resultater ser ut ved divisjon med installert effekt. Her er det tydelig at B gjør det best miljømessig, og at basis og A er de billigste scenarioene.

Tabell 14: Oversikt over kost/nytte-verdier per installert effekt (MW).

	Behandling	Netto kostnad	Enhet	Netto utslipp	Enhet
Basisscenarioet	Deponi	14 136	€ / MW	0,25	tonn CO ₂ -ekv / MW
Scenario A	Energi-gjenvinning	17 443	€ / MW	5,81	tonn CO ₂ -ekv / MW
Scenario B	Co-prosessering	33 548	€ / MW	-5,57	tonn CO ₂ -ekv / MW
Scenario C	Ombruk i nytt kraftverk	90 857	€ / MW	1,17	tonn CO ₂ -ekv / MW

6. Diskusjon

6.1. Vurdering av studiens funn

I den norske vindkraftbransjen er det stadig flere med fokus på sirkulær økonomi og bærekraft, bevist gjennom samtaler med Zephyr^[26], NORWEA^[20] og NVE^[3]. Samtidig er det enkelte som ikke er helt enige i at det er akkurat vindturbinbladene der behovet for å effektivisere ressursbruken er størst, når det kommer til å inkludere vindkraften som en del av bærekraftig utvikling^{[4][10][21]}. Både FN, EU og miljøforkjempere krever at vi forvalter alle ressurser vi tar ut av naturen på en så effektiv og skånsom måte som mulig. Dette leder fram til at vindturbinbladene må tas med det største alvor.

6.1.1. Dagens status for vindturbinblader i Norge

«Hvilke kriterier blir lagt til grunn ved design og prosjektering av vindparker i dag med tanke på nedleggingsfasen, og hvilke konkrete planer foreligger for anlegg som skal demonteres innen 2030? Hva er den gjennomsnittlige utskiftningsraten gjennom turbinenes levetid?»

Det ble i oppgaven identifisert at flere norske vindkraftverk vil bevege seg inn i en reetablering- eller nedleggingsfase det kommende tiåret. Flere konkrete planer for reetableringer eksisterer allerede, og flere kan komme til å søke om dette fremover. Dette vil øke behovet for kunnskap og nye håndteringssystemer. NVE har en viktig rolle i å legge føringer for håndteringen av den økende avfallsstrømmen av GFK. Dette kan direktoratet gjøre gjennom utarbeidelsen av veiledere for nedleggelse og reetablering, og nye vilkår i sammenheng med reetableringene. Dagens konsesjonsvilkår er ikke forpliktende nok til å fremme skånsom demontering og behandling av vindturbinblader på en måte som er forenlig med prinsippene om bærekraft og sirkulær økonomi.

Det er vanskelig å stadfeste hvor mange vindturbinblader som skal demonteres og fjernes i det kommende tiåret. Grunnen til dette er at reetableringer kan utføres når konsesjonæren ønsker dette, gjennom søknadsprosessen slik den fungerer per i dag. Det er også andre faktorer som kan fremtvinge en beslutning om reetablering, eksempelvis røffe forhold langs norskekysten. Dette er blitt erfart tidligere.^[26] Dette kan medføre at langt flere vindturbiner og turbinblader avvikles i det kommende tiåret enn det som er antatt i denne oppgaven. En veileder for nedlegging kan være en viktig nøkkel i å sikre gode avviklingsstrategier. En annen løsning kan være å innføre en MTA-liknende plan for nedleggingsfasen. Som et tredje forslag kan det å skape et samarbeid mellom norske energi- og miljømyndigheter bidra til å løse problemet.

Det er Miljødirektoratet som er pålagt ansvaret om sirkulær økonomi og forurensning i Norge, og som derfor bør vurderer muligheten for å ta en større rolle i denne fasen av norske vindkraftprosjekter. Produsentansvarsselskaper som RENAS^{[9][10]} kan sørge for at alle aktører over turbinbladets verdikjede bærer sin del av ansvaret om det opprettes bransjeavtaler. En slik innføring vil skape forutsigbare markeder for avfall- og gjenvinningsanlegg nedstrøms og legge premisser for prosjektledere, produsenter, serviceansvarlige og avfallsselskaper. Det som kan tale imot et slikt samarbeid er at det kan oppstå for mange aktører med myndighet over verdikjeden. Dette kan skape forvirrende betingelser for de involverte, og vil kreve en høy grad av kommunikasjon mellom partene. Dagens situasjon rundt nedleggelser og reetableringer skaper et usikkert bilde på den fremtidige avfallsstrømmen av GFK fra vindkraftbransjen i Norge.

Funnene som er gjort i besvarelsen av dette forskningsspørsmålet kan ikke sammenliknes med tidligere studier da det ikke er blitt utført en liknende gjennomgang av den norske vindkraftbransjen tidligere, med fokus på nedleggingsfasen og håndtering av vindturbinbladavfall.

6.1.2. Demontering, ombruk og resirkulering

«Hvordan kan turbinblader ombrukes eller resirkuleres med dagens tilgjengelige og nært realiserbare gjenvinningsteknologi, hvordan vil verdikjedene for ombruk og gjenvinning fungere og hvilke anvendelsesmuligheter har de resulterte materialene?»

For å håndtere avfallsstrømmen fra vindturbinbladene best mulig kreves kunnskap om hvilke håndteringsalternativer som finnes, hva de koster både økonomisk og miljømessig, og hvordan avviklingsplanen må legges for å oppnå den behandlingen som ønskes. Denne oppgaven har langt på vei funnet svar på dette. Det virker tydelig at strategi og sluttprodukt er gjensidig avhengig av hverandre. Sluttproduktet må forsvare dyr og krevende behandling og transport, samtidig som sluttproduktet krever at materialene er behandlet riktig i forkant av produksjonen. Den typiske rekkefølgen av aktiviteter ble identifisert og vist i Figur 7, med diverse utfall. Utstyr til demontering og oppdeling må transporteres til anlegget før demonteringen kan begynne. Demontering og eventuell oppdeling utføres, og deretter sendes utstyret tilbake til utleier. Turbinbladene sendes deretter hele eller i deler til et behandlingsanlegg eller et nytt kraftverk for videre drift.

Avviklingsfasen

For demontering er det som oftest demonteringskran eller kontrollert velting som er alternativene, unntaket er om anlegget installeres med løftetårn. Kontrollert velting kan forsvares fra et økonomisk

ståsted dersom uforutsette hendelser som havari oppstår i driftsfasen eller om demonteringskran ikke kan benyttes. Sistnevnte var tilfelle for Hundhammerfjellet der tunge maskinhus og små oppstillingsplasser gjorde demontering med kran umulig. Det som taler imot kontrollert velting er de uheldige effektene det kan påføre det lokale miljøet i form av støy og avfall som oppstår gjennom rivningen. En annen stor ulempe med denne metoden er at materialene i maskinhus og turbinblader blir skadet og at resirkuleringsverdien derfor senkes betraktelig. Hvis en ønsker å hente ut glass- og karbonfiber og samtidig gjøre en profitabel forretning er ikke denne behandlingen god nok. Da må demontering med kran velges, til tross for den dyre kostnaden den er forbundet med i dag. Når etterspørselen for demonteringskraner etter hvert øker vil kostnadene trolig reduseres tilsvarende.

For oppdelingen er det i stor grad sager og sakser som benyttes. Den hovedsakelige avveilingen her er utøverens sikkerhet kontra kostnaden, og fin oppdeling kontra grov oppdeling. Sikkerheten er også relatert til plasstilgjengeligheten, da de sikreste apparatene tar stor plass. HMS er lovfestet i egen forskrift og høyt på agendaen i det norske arbeidstilsynet, slik at de håndholdte sagene faller nok igjennom for de største turbinbladene (Arbeidstilsynet, u.å.; Internkontrollforskriften, 1996). Et viktig tiltak som må vurderes ved bruk av sager er støvforebyggende tiltak, som oppsamling ved bruk av vann. Dette vil være til fordel for miljø og arbeidernes helse, men vil øke kostnadene for prosessen. For de eldste turbinbladmodellene, som gjerne er av en mindre størrelse, kan det være at håndholdte sager kan levere på de fastsatte HMS-standardene. Det som er mest benyttet i dag er wiresager og mekanisk saks, maskinelt utstyr som er dyrere i drift og krever tungtransport. Krav til presisjon i kapping og forhindring av kappskader er svært ulikt og bunner i stor grad i hva slags ombruk- eller resirkuleringsformål turbinbladet skal ha i motsatt ende av avviklingen.

Ombruk

I den systematiske gjennomgangen av ombruksalternativer ble det funnet at turbinbladet kan brukes til så mangt. Særlig i Nederland er det mange gjennomførte prosjekter som har vist seg å levere gode resultater. Her ble turbinbladets struktur benyttet til å bygge urbant møblement som lekeplasser, mobile sitteløsninger og buskur. Lekeplassene imponerte spesielt da det kunne konkurrere på pris med tradisjonelle materialer. Et argument mot at potensialet i slik ombruk er høyt kan være at prosjektene ikke tar nok av avfallsstrømmene. Dette kan stemme på lang sikt, men i 2018 ble det funnet at om 5 % av Nederlands årlige produksjon av urbant møblement var konstruert med avfall fra egne vindturbinblader ville den årlige estimerte avfallsstrømmen av GFK fra vindkraften fjernes helt.

En annen form for ombruk som fikk gode skussmål var videresalg av brukte vindturbiner for ombruk i nye kraftverk. Dette gjøres i utbredt grad i Europa, og er den eneste formen for ombruk som vi har erfaringer med i Norge. Graden av hvor stor nytte det kommer ut av en slik form for ombruk avhenger av avstanden mellom anleggene, hvor mange år turbinbladene har igjen av den designede levetiden ved videresalgstidspunktet og hvilken behandling de får i det nye anlegget kontra hva de ville fått i det gamle. Alle disse aspektene og deres innflytelse på den totale nytteverdien har gjort at EU skroter egen strategi om å promotere videresalgsaktivitet.^[4] En tredje form for ombruk som analysen ikke har tatt for seg er ombruk i det samme anlegget, det vil si å forlenge levetiden ved hjelp av bearbeidelse av turbinblad eller reparasjon ved skader. Her vil også nytteverdien avgjøres i forhold til når i den designede levetiden behovet oppstår, og hvor mange år med forlenget levetid turbinbladet får. Det er ikke enkelt å avgjøre hvilket av ombruksscenariene som er nevnt som har størst nytteverdi. Det som gjelder generelt er at jo lenger ressurser holdes aktivt til å utføre et formål, jo bedre for natur og miljø.

Resirkulering

Når et turbinblad ikke kan brukes til det opprinnelige formål som en komponent i en vindturbin eller til nye formål der dens opprinnelige struktur benyttes, må den behandles som avfall. Her er det mange mulige varianter for prosessering, som vist i Figur 2. Ulempen for resirkulering fremfor ombruk er at det krever flere prosesser over produksjonslinjen, særlig de mer tekniske typene termisk og kjemisk prosessering. Et eksempel kan være at det kreves en mekanisk forbehandling i forkant av prosessen, som i tillegg medfører økte kostnader. De vanligste formene for behandling av GFK i dag er de ikke-resirkulerende behandlingene deponering og forbrenning. Av behandling innen resirkulering er det mekanisk og termisk gjenvinning som er nærmest en industriell skala. Disse formene ble systematisk utredet og vurdert i oppgaven, i form av oppmaling, pyrolysering og co-prosessering.

Co-prosessering, kan beskyldes for å være en mellomting mellom en lineær og sirkulær løsning. Den kan kalles lineær fordi materialenes opprinnelige egenskaper forsvinner i forbrenningen. Helt lineær er den ikke, fordi ressursene forvaltes og substituerer jomfruelige materialer og at man unngår forurensset askeavfall. Konseptets støttespillere mener at EUs definisjoner på resirkulering ikke avviser at Co-prosessering kan betegnes som en resirkuleringsmetode. Dens positive resultater på industriell skala, og at den erstatter store mengder fossile brensler og sand, gjør at den er sterkt anerkjent av en rekke eksperter.^{[1][2][11]} Sementproduktet som fremstilles gjennom prosessen kan kvalifisere til å resirkulere i et lukket kretsløp gjennom å bruke den i fundamenteringen i nye vindkraftanlegg.

Mekanisk resirkulering

Det gjort rede for en rekke eksempler for gode resirkuleringskonsepter for mekanisk oppmaling. Verdt å nevne er bord og benkeplater, filament til 3D-printing, «nåler» til armering av betong, hybride kompositter i tre og plast, støyskjermer, tilslag i asfalt, jernbanesviller, kabelkanaler, urbane avfallsdunker og asfaltbegre, og spesialtanker. Barrieren for mange av disse konseptene er glassfiberens lave verdi etter behandling, og at økonomien i konseptet derfor ikke kan forsvare investeringen som kreves for å flytte konseptet fra teststadiet til industriell skala. Noen lovende unntak er det: Støyskjermene produseres av to bedrifter i Danmark; urbane avfallsdunker og asfaltbegre, samt kabelkanaler produseres av en bedrift i Belgia; spesialtanker produseres i Sverige. Samtlige ser ut til å hente ut økonomisk profitt fra sine forretningsmodeller.

Usikkerheten med mange av konseptene innen mekanisk resirkulering er hvorvidt GFK i vindturbinene egner seg, og om det stilles krav til sammensetningen til kompositten som avhendes. En annen ulempe med mange av disse konseptene er at produktene den resirkulerte fiberen benyttes i ikke kan resirkuleres videre. Ved et slikt utfall flyttes problemet fra en verdikjede til en annen. Dette kan forsvares ved at det nye produktet har lang levetid, slik som for eksempel jernsvillene med sine 30 års designede levetid.

Av de opplistede konseptene er det enkelte produkter som kan fungere i et lukket kretsløp selv ved tilførsel av resirkulert GFK. Dette er filamentet i 3D-printingen og støyskjermene. For begge hevdes det at produktene kan resirkuleres opptil flere ganger. Når det kommer til støvet som oppstår ved mekanisk behandling og oppdeling i vindkraftanleggene har denne fraksjonen blitt testet i andre studier som tilslag i maling, og testene viste lovende resultater. Mekanisk gjenvinning har mange gode konsepter, men barrieren ligger i lønnsomhet og den miljømessige nytten av å forflytte materialet fra en verdikjede til den andre.

Pyrolyse

Den tredje resirkuleringsmetoden som det i denne studien ble gjort rede for var pyrolytisk behandling. Ut av denne prosessen kommer en rekke produkter. Disse er fastslått til å være rene fibre, olje og gass, og raten mellom produktene avhenger av hvilke prosessbetingelser som gjelder for det enkelte anlegg. En studie beviste muligheten til å krystallisere fibre gjenvunnet fra pyrolyse for å fremstille glasskeramiske materialer. Disse materialene kunne benyttes for å lage gulv- og veggfliser til kjøkken og badrom. Resultatene var lovende, men det behov for ytterligere testing for å validere konseptet. Det mest spennende med glasskeramiske fliser var produktets påviste designfrihet. Potensialet for

implementering i markedet kan i så måte være stort, men det er for usikkert hvorvidt konseptet er økonomisk levedyktig.

En annen teknologisk metode som går innunder pyrolyse er mikrobølgeassistert pyrolyse (MAP). MAP har et større potensiale enn tradisjonell pyrolyse gjennom en stor grad av operativ kontroll. Denne behandlingsmetoden er av Ierides et al. (2019) vurdert til å ha en lav teknologisk modenhet, men i Norge har vi en aktør kalt Noranergy som har kommet lenger enn dette med sitt konsept. Barrieren for denne bedriften er markedets evne til å nyttiggjøre seg av deres produkter, og et behov for et eksternt komposittmottak for å drive fram en profitabel avfallsstrøm til anlegget. Det er ennå en del usikkerhet rundt hvilke eksakte anvendelser pyrolyseanlegg kan levere til.

Studier har bevist at fibrene kan gjenvinnes med høy kvalitet, så høy at de kan inkluderes i nye kompositter. Dette kan benyttes i vindturbinblader og på denne måten skape lukkede kretsløp i verdikjeden. Oljen kan benyttes til drivstoff, og dermed substituere jomfruelige brensler. Gassen kan drive en turbin og konvertere energi til elektrisitet. Eksosvarmen som oppstår i prosessen kan gjenvinnes i en varmegjenvinner og substituere diverse brensler internt i anlegget, eller den kan varme opp vann til energilagring i brønner. Graden av nytteverdi for anleggene går i stor grad på hvordan anlegget er bygget. For å øke nytteverdien gjennom å fremstille størst mulig mengde med produkter og biprodukter kreves høy investering i teknisk utstyr. Dette er en barriere så lenge markedet er uforutsigbart, og kan dempe investeringsviljen. Noranergy som er den ledende aktøren i Norge på pyrolyse ønsker at myndighetene legger ned krav om andel resirkulert materiale i ny produksjon slik at et marked kan skapes gjennom ny etterspørsel.

Sammenlikning med tidligere studier

Funnene fra dette forskningsspørsmålet kan til en viss grad sammenliknes med studier som Jensen og Skelton (2018), Chen et al. (2019) og van Oudheusden (2019). Mange av de samme studiene som er nevnt i denne oppgaven er også nevnt eller gjort rede for i disse arbeidene, men den systematiske gjennomgangen og vurderingen er noe annerledes fra disse.

Jensen og Skelton (2018) baserte seg, i likhet med denne oppgaven, på erfaringsmessig kunnskap, og gikk også igjennom hele verdikjeden for å illustrere hvordan sirkulære verdikjeder kan se ut. Som en del av helheten ble seksjonering av vindturbinbladene i nedleggingsfasen, sekundære applikasjoner og diverse resirkuleringsmetoder analysert. Avvikene mellom studiene går på hvordan arbeidet ble utført. Jensen og Skelton (2018) kom ut av et fireårig konsortium, mens masteroppgaven ble skrevet på fem måneder og tok del i et forarbeid relatert til et initiert forskningsprosjekt. I tillegg er de to analysene

forskjellig i form av hvilke markeder de studerer nærmere, der den artikkelen ser på det danske markedet, mens masteroppgaven tar for seg det norske. Det ble også i artikkelen viet mer plass til diskusjonen rundt produsentansvar og bransjeavtaler, enn det det er blitt gjort i denne oppgaven. Når det kom til presentasjonen av funnene er det fremstilt som en systematisk gjennomgang i Jensen og Skelton (2018), mens det i masteroppgaven er gjennomført en systematisk vurdering av anvendelsesmetodene.

De to andre studiene har ikke like mange likheter med masteroppgaven. Chen et al. (2019) gikk grundigere til verks i defineringen av teknologiene for resirkulering og gjenvinning, og de tilhørende mulighetene for sekundære applikasjoner. Studien er i stor grad basert sin studie på et «state-of-the-art» litteraturstudie, til forskjell fra denne oppgaven som også har inkludert erfaringer fra næringslivet. Chen et al. (2019) har også til forskjell inkludert en egen del om materialvalg i komposittene, og diskutert studiers funn på dette temaet. van Oudheusden (2019) derimot har gjennomført en grundig avhandling om alle teknologier, og har i likhet med masteroppgaven nevnt et par flere teknologiske metoder enn de to førstnevnte har gjort. Studien er mer sammenliknbar når det kommer til den helhetlige metoden der både en systematisk gjennomgang og vurdering av teknologiene er utført, så vel som en økonomisk og miljømessig kost/nytte-vurdering av disse.

6.1.3. Casestudie: Guleslettene Vindpark

«Med Guleslettene Vindpark som case: Hva er kost/nytte-vurderingen av energiutnyttelse, ombruk og materialgjenvinning av komponenter fra anleggets turbinblader, både økonomisk og miljømessig, ved alternative behandlingsmetoder?»

I oppgavens kost/nytte-vurdering ble dagens lineære avhendingsvalg studert nærmere. For denne vurderingen ble Guleslettene Vindpark benyttet som case, som i en tenkt situasjon skulle legge ned kraftverket i 2020. De mulige valgene de ville hatt som et anlegg i Norge er å deponere, sende til energigjenvinning eller sende til co-prosessering. I tillegg ble et scenario inkludert hvor anlegget ble reetablert midt i driftsfasen, og de studerte turbinene gjennomgikk videresalg og til slutt deponering når de var ferdig driftet. Deponering i Norge ble i analysen sett på som siste utvei, og ble derfor valgt som basisscenario. Et solid arbeid ble lagt ned for å hente informasjon slik at forutsetningene ble satt på en måte som gjorde scenariene så representative som mulig.

Resultatene viste at det økonomisk sett ikke lønte seg å selge til ombruk fordi utfallet ble det samme som i basisscenarioet, og fordi transporten var betydelig lenger og medførte at kostnadene ble

markant større enn for de andre scenarioene. For co-prosessering ble netto kostnader omtrent dobbelt så høye som for energigjenvinning. Scenarioet med energigjenvinning lå på omtrent det samme som basisscenarioet. Disse resultatene kan diskuteres da basisscenarioet antagelig var tillagt en for lav transportavstand til behandlingsanlegg, samt at energigjenvinningen manglet flere momenter i de mottatte kostnadstallene. I tillegg ble co-prosesseringens substitusjonseffekt underestimert gjennom manglende forutsetning om substitusjon av tilsetningsstoffer som sand. Når det kom til klimagassutslipp ble det vist at ombruk i nytt vindkraftverk gir tilnærmet balanse i regnskapet, men dette scenarioet kom likevel noe dårligere ut enn basisscenarioet. Energigjenvinning ga dårligst resultater, og de substituerte utslippene var ikke store nok til å dekke de totale utslippene. For co-prosessering derimot var de substituerte utslippene så store at netto klimagassutslipp gikk stort i minus. Det ble altså spart en betydelig andel utslipp gjennom å sende turbinene til denne behandlingsmetoden, og det til tross for at noen forutsetninger manglet.

Funnene i kost/nyttevurderingen er langt på vei sammenliknbare med tidligere studier av Dong et al. (2015) og Dong et al. (2018). I Dong et al. (2015) ble kost/nytte-faktoren for de teoretiske systemsporene sammenliknet i et økonomisk og miljømessig perspektiv. For miljø ble indikatoren Climate Change Index (CCI) i kg CO₂-ekv benyttet, og for økonomi ble kostnadene beregnet i €, begge for henholdsvis GFK og KFK. Her er både deponering, forbrenning med energigjenvinning og co-prosessering inkludert. Masteroppgaven tar det derfor et skritt lenger ved å inkludere et scenario med ombruk under driftsfasen.

I Dong et al. (2015) kom det fram at deponering har en positiv kost/nytte-verdi for det økonomiske perspektivet og en svakt negativ kost/nytte-verdi for begge komposittene. Det økonomiske funnet er til forskjell fra denne oppgavens resultat, og kan forklares med at andre antagelser eller metoder for beregning er benyttet i form av basisscenarioet. Det miljømessige resultatet underbygger denne oppgavens funn. For forbrenning ble det funnet at den økonomiske kost/nytte-verdien er svakt negativ for begge kompositter, og at miljøindikatoren for begge er markant negativ. Også her samsvarer miljøindikatoren med denne oppgavens funn, mens for økonomi fikk forbrenning en mer positiv verdi sammenliknet med oppgaven. For co-prosessering ble det funnet at dette systemsporet er markant positiv for miljøindikatoren, og med en svakt negativ økonomisk kost/nytte-verdi. Dette stemmer helt overens med oppgavens funn, og kan ses på som en god underbyggelse for dette resultatet. Årsaken kan være at datakildene her var mer robuste enn for de andre scenarioene.

I Dong et al. (2018) ble en tilsvarende analyse utført for KFK alene. Her kom deponering og forbrenning godt ut økonomisk, til forskjell fra co-prosessering. For den miljømessige faktoren fikk deponering et

svært negativt utslag, forbrenning fikk et noe negativt utslag, mens co-prosessering fikk et noe positivt utslag. Dette kan sammenliknes med utslagene for kost/nytte-vurderingen i denne oppgaven, selv om det er utført på KFK og ikke GFK. Deponering fikk antagelig et annet utslag basert på en annen metodisk tilnærming i beregningene. I både Dong et al. (2015) og Dong et al. (2018) er det blitt inkludert en beregning på co-prosessering på KFK, selv om dette anses som et utilgjengelig systemspor for denne kompositten. Resultatet var uansett negativt økonomisk i begge studier, samt miljømessig negativt i Dong et al. (2015) til forskjell fra GFK.

6.2. Resultatenes robusthet

6.2.1. Metodikk og datagrunnlag

Som nevnt i studiens begrensninger så har tid hatt mye å si for studiens resultater. For det første forskningsspørsmålet skulle et spørreskjema benyttes for å få svar på erfaringer i den norske vindkraftbransjen, og for å besvare hvor stor utskiftningsrate norske prosjektledere har erfart i sine kraftverk. Dessverre dro utsendelsen av spørreskjemaet ut i tid, da det oppstod flere utfordringer underveis. Dette førte blant annet til at få svar ble mottatt, og det kan derfor diskuteres hvorvidt de presenterte funnene fra dette skjemaet er representativt for bransjen som helhet. Utsendelsen ble utført av de andre partene i forskningsprosjektet, da skjemaets spørsmål ble stilt til nytte for prosjektet som helhet. Prosessen vil fortsette videre om prosjektet forlenges, og data på denne studiens forskningsspørsmål kan hentes ut på et senere tidspunkt.

Når det kommer til all personlig meddelelse fra Zephyr, de intervjuede ekspertene og diverse mailveksling vil undertegnede påstå at dette er de mest robuste dataene som finnes på feltet og som derfor kan identifisere dagens situasjon i bransjen, samt erfaringer som er blitt gjort. Dette er blitt tatt med som et viktig bidrag i besvarelsen av samtlige forskningsspørsmål. Noe meddelelse var muntlig, mens annen meddelelse var på dokumentform. Selv om intervjuene var uformelle var de effektive, objektive og saklige. Alle intervjuende har fått muligheten til å lese over alt som henvises til den enkeltes utsagn. På den måten er all fakta fra deres side kvalitetssikret. Den systematiske kontakten med bransjen og næringslivet rundt vindturbinbladene er også med på å gjøre studien relevant for nettopp disse.

Videre er resultatene i forskningsspørsmål 2 basert på vitenskapelige artikler, og offentlig informasjon om bedrifters løsninger og konsepter. Avviklingsfasen og demontering ble kun beskrevet, da undertegnede ikke følte dette var et behov i henhold til forskningsspørsmål og også fordi en systematisk vurdering av alternativene ville legges på et for tynt grunnlag. Her var det nemlig få studier

som kunne underbygge faktaene. Når det kom til delkapitlene ombruk og resirkulering ble en systematisk gjennomgang utført, og vurderingene ble utført på en skala fra 1 til 5. Kriteriene var enkle og skulle være målbare for undertegnede. I hvor stor grad disse resultatene er robuste kan diskuteres, da undertegnede ikke har vært å regne som en ekspert gjennom hele arbeidet. Likevel er vurderingene gjort på en enkel og presentabel måte, antagelig til stor nytte for interessentene.

For forskningsspørsmål 3 er resultatene avhengig av forutsetningene som er tatt. Derfor må resultatenes robusthet evalueres gjennom forutsetningene. Det viste seg gjennom arbeidet at det var krevende å samle data om og fra bransjen da den var forholdsvis ung på tidspunktet sett opp mot de store vindkraftnasjonene. I tillegg var det ikke mange vindkraftverk globalt som hadde vært gjennom en nedleggelsesprosess, slik at å finne representative tall for Guleslettene var vanskelig. Forutsetningene er nøye beskrevet i metodekapittelet.

6.2.2. Casestudiets forutsetninger

Transport var kanskje den delen av scenarioene som var vanskeligst å sette forutsetninger for. Dette er blant annet fordi tradisjonelle transportklasser ikke er bygget for å frakte så store og uhåndterlige komponenter. Vindturbinblader er kategorisert som volumlast, noe som betyr at det tar mye plass og veier lite.^[15] De fleste kostnadsestimater for frakt på vei og sjø er basert på vekt. TØI sin kostnadsmodell var det nærmeste undertegnede kunne komme et kostnadsestimat, og må i så måte kunne omtales som robust nok. Underestimeringen kan forsvares med at alle scenarioene behandles likt. Antagelsene om hvor mange enheter som kan fraktes per lastebil eller skip er antagelig for optimistiske. Ifølge oppføringene i ecoinvent er utslippsfaktorene basert på tur-retur, og at retur kjøres med tom lastebil eller tomt skip. Dette er ikke tatt hensyn til i antagelsene om fraktmengde per transportklasse. Transportklassene er også tvilsomme i seg selv, særlig «timbertruck with hanger» som neppe er lang nok til å ta et helt vindturbinblad. En annen forutsetning som kan være mindre robust er tidsestimatene hentet fra Google Maps. Her er farten antatt til å ligge på rundt 60 km/t i snitt, men dette er ikke sannsynlig for lastebilene som frakter hele turbinblader.

Når det kom til behandlingskostnadene var det heller ikke her enkelt å sette sannsynlige priser. Kostnader for deponering og co-prosessering ble funnet gjennom intervjuene med internasjonale aktører. Disse prisene er derfor gjeldene for EU, og er kanskje i underkant av hva prisen er i Norge. For energigjenvinning er leveringskostnaden benyttet, så her er ikke kostnaden til forbehandling inkludert. Kostnad på forbrenning i anlegget er heller ikke forutsatt, med bakgrunn i at behandlingen er like dyr som om det var husholdningsavfall som ble tilført prosessen. Dette er ikke så sannsynlig, og de faktiske

kostnadstallene er nok en del større for forbrenning av GFK. For co-prosessering ble ikke substitusjon av sand inkludert, og dette kunne gitt adskillig bedre resultater. Når det kom til ombruk ble det bestemt at salgsinntekten skulle være lik behandlingskostnaden, dette er en ren forenkling av virkeligheten. Sannsynligvis er behandlingskostnaden noe lavere, slik at megleren kan uthente profit på handelen.

Når det kom til utslipp er alle data som er simulert eller hentet ut med SimaPro tilknyttet en viss grad av usikkerhet. Ecoinvent 3.3-databasen er fra 2016, noe som gjør at dataene kan være utdaterte. Utslippsdata for skip og lastebil er generelle data for det globale markedet, og er antagelig estimert til et noe høyere utslipp enn hva som er tilfelle. Utslippet til energigjenvinning ble simulert manuelt i SimaPro, gjennom bruken av definisjonen i studieobjekt 1. Denne faktoren innehar en stor grad av usikkerhet, da det ikke er gitt at glassavfall og plastavfall representert i ecoinvent tilsvarer de samme materialene i GFK. Energibruk og eventuelle utslipp til den mekaniske forbehandling i det samme scenarioet er utelatt, og inkludering av dette ville nok gitt scenarioet et enda dårligere miljømessig resultat. Antagelsen om at produksjonsutslipp tilsvarer utslippene som er beregnet for hele vindturbinens livsløp er neppe representativt med virkeligheten. Denne forutsetningen er benyttet for å estimere utslipp til substituert produksjon i scenario C.

Generelt for forutsetningene er det usikkert om dataene som er benyttet er representative for det norske markedet. Data på oppdelingsutstyr ville gitt utslag på resultatene da dette varierer mellom scenarioene. Virkningsgrad på forbrenningsanlegget kan variere i forhold til hva som forbrennes, og dette er ikke hensyntatt. Forutsetninger som deponering i ulike land og ved forskjellige tidspunkter i driftsfasen er ikke tatt med i beregningene, og det kan diskuteres hvorvidt dette ville gitt utslag. Sannsynligvis er det forskjeller både i kostnader og utslipp, så mer kunnskap om dette ville trolig gitt utslag. Scenarioet om å sende materialene til det svenske forbrenningsanlegget var på et tips fra Tafjord Kraftvarme. Et senere svar fra et tilsvarende anlegg i Finland viste at de ikke ønsker å ta imot GFK grunnet kostnaden ved å forbrenne det, og vedlikeholdsbehovet fiberstøvet forårsaker anlegget som fører til ytterligere kostnader.^[23] Det er usikkert hvor mange anlegg i Norden som kan forbrenne GFK, og om de er villige til å gjøre det. En annen ting som gjør analysen vanskelig er valget av case. Guleslettene installeres med moderne vindturbiner, og disse havner ikke i avfallsstrømmen før om minst 20 år. Da vil situasjonen for avfallshåndtering trolig være en helt annen.

Til tross for alle de nevnte usikkerhetene fra analysens forutsetninger er det gjort en stor innsats på å sette nettopp disse. Mengden data som er innhentet skal være tilstrekkelig nok til at oppgavens interessenter kan finne relevans i resultatene. Resultatene kan også underbygges gjennom de tidligere studiene som fant liknende resultater. Selv om Guleslettens vindturbiner ikke representerer dagens

avfallsstrøm, så vil den være representativ for det kommende tiårets avfallsstrøm. Funnene som er gjort i dette studiet kan dermed være til veiledning for videre arbeid med verdikjeden og premissene rundt den.

6.3. Studiens interessenter

Det er mange aktører som opptrer som interessenter for oppgaven, illustrert i aktørkartet i metodekapittelet (se Figur 3). Studien går både grundig til verks i redegjørelsen av alle delfasene i et nedleggingsprosjekt, og makter å levere et oversiktlig bilde av verdikjeden. Av den grunn vil studiens funn være av interesse for aktører med vidt forskjellige oppgaver.

6.3.1. Myndigheter

De overordnede aktørene, energi- og miljømyndighetene, vil kunne hente en større gevinst i å lese dette studiet. NVE er allerede «på ballen» hva gjelder fremtidige premisser for nedleggingsfasen, samt vilkår for godkjenning av reetableringssaker. Begge aktivitetene vil generere store og uforutsigbare avfallsstrømmer med tanke på når de oppstår. Da vil det være viktig å oppdatere kunnskapen på feltet, og for GFK generelt. Når det kommer til Miljødirektoratet er de per dags dato ikke særlig involvert i verdikjeden, men et større fokus på fraksjonen GFK vil de kanskje få etter å ha lest denne oppgaven. Hva slags rolle de vil ta er usikkert, men det er ikke utenkelig at de ser denne fraksjonen som et viktig felt i det pågående arbeidet med å gjøre Norge til et lavutslippssamfunn. Her er de allerede godt engasjert i avfallstemaet rundt fritidsbåter, som har mange overførbare aspekter med vindturbinbladene.

6.3.2. Prosjektledere og konsesjonærer av vindkraftverk

Etter myndigheter er vindkraftbransjens driftsansvarlige de viktigste interessentene. Det er disse som besitter avfallet når driften i anleggene avsluttes eller når anleggene får konsesjon til reetablering. Det er altså i stor grad de driftsansvarlige som er den endelige beslutningstakeren for hvor avfallet sendes og hvordan det behandles. Per i dag får kostnadsbesparing for stor tyngde i avgjørelsen av hvilken avviklingsstrategi som velges. I tråd med nåtidens fokus på bærekraftig utvikling og sirkulær økonomi bør også vindkraftens prosjektledere sette de miljømessige aspektene høyere på agendaen. Gjennom å lese denne studien vil prosjektlederne få et større innblikk i hva som skjer etter vindturbinbladet forlater deres hender, hvilke resirkuleringsmetoder som finnes i dag og hvordan de kan utøve sin rolle som beslutningstaker til å påvirke hvordan avfallet kan omformes til nye ressurser.

6.3.3. Rivningsaktører

I mange tilfeller kan det tenkes at ansvaret lempes videre på leverandøren av rivningsarbeidet. Det er AF Decom som har posisjonert seg som den klare eneren på rivningsarbeid av vindturbiner i Norge i dag. Som et stort selskap med et stort nettverk i næringslivet burde selskapet innhente mer kunnskap om GFK-avfallet de må håndtere i ethvert riveprosjekt for vindkraftbransjen. Gjennom å lese denne studien kan de involverte få mer kunnskap om hvilke muligheter de har i dag, og hvordan både kostnadsbildet og de miljømessige nyttegevinstene ser ut ved fremtidige valg. Stadig flere selskaper er bevisste på sitt samfunnsansvar, og når de synliggjør dette gjennom gode driftsmessige beslutninger i et miljøperspektiv vil både markedsverdien og renommeet øke.

6.3.4. Aktører innen avfallshåndtering og -prosessering

Til slutt vil avfallsbedrifter og andre aktører som leter etter nye forretningsideer, eller ønsker å investere i avfallshåndtering av GFK, hente mye informasjon fra denne oppgaven. Gjennom en bredere forståelse av hvilke muligheter som finnes, og kanskje en indikasjon på fremtidige beslutningsvalg gjennom NVEs eventuelle veileder på nedleggelse, vil aktørene lettere kunne gjøre investeringsbeslutninger. Gjennom å lese studien ser man hvilket omfang GFK vil kunne få på sikt, noe som vil danne en etterspørsel etter bærekraftige løsninger. Avfallsbedrifter som allerede er konkurransedyktige på mottak og behandling av andre typer GFK kan benytte oppgaven til å se hvilke anvendelser og tilhørende markeder som er mest lovende for sin relevante teknologi. Avfallsbedrifter som ønsker å investere i nye teknologier kan lese hvilke av disse som er eller nærmer seg kommersielle i dag. Materialstrømmen ut av vindkraftverkene vil øke gradvis de neste tiårene, og aktører som er tidlig på ballen vil kunne hente store økonomiske gevinster med riktig tilpassede forretningsmodeller.

7. Konklusjon

Gjennom studiens undersøkelser ble det observert at fokuset på vindturbinblader og sirkulær økonomi ikke gjenspeiles i prosjekteringsarbeidet av nye anlegg. Det er ikke beskrevet hvordan vindturbinbladene skal avhendes i konsesjonene som blir gitt av NVE. Arbeidet mot en veileder om nedlegging kan være et skritt i riktig retning for å motivere til bedre planlegging og beslutningsvalg omkring GFK-avfallet fra turbinbladene i tiden fremover. Det er identifisert en stadig økning av reetableringer i den norske vindkraftbransjen, noe som kan forårsake at den første bølgen av GFK-avfall både er større og oppstår tidligere enn først antatt. Dette krever mobilisering av utstyr og løsninger nedstrøms, og mye tyder på at den norske bransjen er i stand til å få dette klart i tide.

For å treffe på de sirkulærøkonomiske prinsipper slår avviklingsmetoden «kontrollert velting» dårlig ut. Det gjør til dels også håndteringsløsningen ombruk i nye kraftverk, om ikke ressursene forvaltes bedre når turbinbladene når avfallsstadiet i det nye anlegget. Ombruk av komponenter til nye formål, slik som lekeplasser og skur, kan behandle deler av avfallsstrømmen, men krever grundig overvåkning- og dokumentasjonsarbeid underveis i prosjektene for å sikre at turbinbladene innehar nødvendig kvalitet. Co-prosessering er det beste alternativet vi har i dag for å behandle GFK-avfallet som oppstår fra vindkraftanleggene, men kapasiteten er per i dag ikke stor nok til å ta unna for en økende avfallsstrøm fra norske vindkraftanlegg. Deponering er ennå det billigste alternativet, og bør håndteres politisk av myndighetene for å sikre at dette valget unngås og at det kan etableres nye markeder for resirkulert GFK. Mekanisk og pyrolytisk resirkulering har begge nådd sin teknologiske modenhet, og det finnes allerede økonomisk levedyktige forretningsmodeller for mekanisk resirkulering i Belgia, Finland, Danmark og Sverige.

Det kreves et samarbeid mellom aktører og tiltak fra myndighetene for å legge opp til at norske aktører skal kunne levere håndteringsløsninger for vindturbinblader. Norske løsninger vil være gunstig for beslutningstakere i vindkraftbransjen i form av at transportkostnadene tilknyttet håndteringen reduseres. I likhet med mange andre bransjer, slik som elektronikkbransjen, må det inngås avtaler eller legges krav for myndighetene for at marked skal kunne oppstå. Krav til resirkulerte råvarer i nye produkter kan være et eksempel på dette. Kun gjennom samarbeid og vilje etter å finne løsninger kan vindkraftbransjen nå sitt mål om 100 % resirkuleringsgrad, og samtidig styrke Norges bidrag til den globale innsatsen mot et bærekraftig verdenssamfunn ledet an av EU og FN.

8. Videre arbeid

Denne oppgaven har lagt grunnlaget for videre studier i flere retninger relatert til den norske vindkraftbransjen. Det kan være interessant å se de kommersielle og nært-kommersielle resirkuleringsteknologiene, mekanisk og pyrolytisk gjenvinning, sammenliknet i en kost/nytte-vurdering. Gjerne i et systemperspektiv, slik at også et eksempel på anvendelse inkluderes i studien. Eventuelt kan en også føre et livsløpsregnskap på produktene i neste ledd, som benytter resirkulert GFK i produktsammensetningen. For kost/nytte-vurderingen som ble fullført i denne studien, er det mulig å forbedre denne gjennom å undersøke og finne bedre forutsetninger for forskjellige scenarioene. Energigjenvinning kan ha blitt undervurdert på kostnadssiden, og co-prosessering kunne fått bedre resultater om substitusjoner av tilsetningsstoffer som sand var lag til. Det kunne også vært spennende å beregnet utslipp og kostnader relatert til energibruken blant scenarioene.

Videre kan man se på de delene av oppgaven som ikke ble fullført. Spørreskjemaet og kartleggingen av de praktiske erfaringene blant norske vindkraftverk kan avdekke flere sider av saken. Her kan man innhente informasjon for å skape et bredere bilde på dagens holdninger til avfallet hos bransjens prosjektledere. Man kan også kartlegge hvor stor utskiftningsrate det faktisk er i gjennomsnitt for de norske anleggene. Det er også mulig gjennom denne undersøkelsen å estimere hvor mange kraftverk som planlegger å gjennomgå reetablering det kommende tiåret. Spørreskjemaet håndteres videre i sammenheng med forskningsprosjektet. Forskningsprosjektets videre arbeid har som mål å fremstille livsløpsregnskapet for vindkraftverk generelt, og kan med dette belyse hvor stort avfallsproblem GFK faktisk står for sett i lys av kraftverkenes andre komponenter.

Denne studien har ikke tatt for seg sammensetningen av komposittene i vindturbinbladet, og alternative materialvalg i design og produksjon av nye vindturbinblader. Det er mange studier på diverse materialer som kan substituere de tradisjonelle variantene. Eksempelvis naturlige fibre som kokosplanter og lin, nye herdeplaster som vitrimer, termoplastiske harpikser og bioharpiks. Det er uklart hvor relevant dette er for den norske vindkraftbransjen, men studier på forskjellige materialvalg vil likevel være interessant. Karbonfiber er i stadig økende grad benyttet i vindturbinblader, men ikke helt uten ulemper. Det hevdes for eksempel at karbonfiber leder elektrisitet, slik at turbinbladene blir mer sensitive ovenfor lynnedslag.^[11]

Vindkraftbransjen er i rask utvikling, og mye kan skje på få år. Det anbefales at en liknende sammenstilling settes sammen om fem år for å oppdatere situasjonen, og for å verifisere funnene som er blitt gjort i denne oppgaven.

9. Kildeliste

- Akesson, D., Foltynowicz, Z., Christeen, J. & Skrifvars, M. (2012). Microwave pyrolysis as a method of recycling glass fibre from used blades of wind turbines. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 31 (17): 1136-1142. doi: 10.1177/0731684412453512.
- Arbeidstilsynet. (u.å.). *HMS i bygg og anlegg*. Tilgjengelig fra: <https://www.arbeidstilsynet.no/hms/hms-i-bygg-og-anlegg/> (lest 22.05.2020).
- Avfallsforskriften. (2004). *Forskrift om gjenvinning og behandling av avfall av 1. juni 2004 nr. 930*. Tilgjengelig fra: <https://lovdata.no/dokument/SF/forskrift/2004-06-01-930> (lest 29.05.2020).
- Bergsma, J. (2008). *Kringloop Zuid*. Tilgjengelig fra: <https://www.superuse-studios.com/projects/kringloop-zuid/> (lest 30.03.2020).
- Bjerkestrand, E., Lundsbakken, M., Midtsian, T., Rogstad, A., Østenby, A. M. & Ramtvedt, A. N. (2020). *Konsesjonsprosessen for vindkraft på land*. Oslo: NVE. Tilgjengelig fra: <https://www.nve.no/nytt-fra-nve/nyheter-konsesjon/nve-gir-innspill-til-oed-om-forbedringer-av-konsesjonsbehandling-av-vindkraft/> (lest 30.03.2020).
- Bortolotti, P., Berry, D., Murray, R., Gaertner, E., Jenne, D., Damiani, R., Barter, G. & Dykes, K. (2019). *A Detailed Wind Turbine Blade Cost Model*. Tilgjengelig fra: <https://www.nrel.gov/docs/fy19osti/73585.pdf> (lest 25.04.2020).
- Bøgh, M. (2015). *Etablering af bro bygget af genbrugte vindmøllevinger*. Tilgjengelig fra: <https://groenomstilling.erhvervsstyrelsen.dk/etablering-af-bro-bygget-af-genbrugte-vindmoellevinger> (lest 30.03.2020).
- Bølling, J. K. (2017). *Utsira II*. Konsesjonssak. Tilgjengelig fra: <https://www.nve.no/konsesjonssaker/konsesjonssak?id=257&type=A-6> (lest 12.05.2020).
- Bølling, J. K. (2019a). *Reetablering av Hundhammerfjellet vindkraftverk*. Konsesjonssak: NVE. Tilgjengelig fra: <https://www.nve.no/konsesjonssaker/konsesjonssak?id=4535&type=A-6> (lest 30.03.2020).
- Bølling, J. K. (2019b). *Valsneset vindkraftverk, tidligere teststasjon - Vimle AS*. Konsesjonssak. Tilgjengelig fra: <https://www.nve.no/konsesjonssaker/konsesjonssak?type=A-6&id=96> (lest 12.05.2020).
- Bølling, J. K. (2020). *Havøygavlen vindkraftverk - reetablering*. Konsesjonssak. Tilgjengelig fra: <https://www.nve.no/konsesjonssaker/konsesjonssak?type=A-6&id=4959> (lest 12.05.2020).
- Chen, J., Wang, J. & Ni, A. (2019). Recycling and reuse of composite materials for wind turbine blades: An overview. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 38 (12): 567-577. doi: 10.1177/0731684419833470.
- Cherrington, R., Goodship, V., Meredith, J., Wood, B. M., Coles, S. R., Vuillaume, A., Feito-Boirac, A., Spee, F. & Kirwan, K. (2012). Producer responsibility: Defining the incentive for recycling composite wind turbine blades in Europe. *Energy Policy*, 47: 13-21. doi: 10.1016/j.enpol.2012.03.076.
- Christensen, L. (2019). *Vildt projekt: Skrottede møllevinger bliver til ny bro i Lindholm*: TV2 Danmark. Tilgjengelig fra: <https://www.tv2nord.dk/aalborg/vildt-projekt-skrottede-mollevinger-bliver-til-ny-bro-i-lindholm> (lest 30.03.2020).
- Colledani, M. (u.å.-a). *FiberEUse*. Tilgjengelig fra: <http://fibereuse.eu/index.php/detail> (lest 18.04.2020).
- Colledani, M. (u.å.-b). *Mechanical recycling (Use-Case 1) of short GFRP and re-use in added-value customized applications*. Tilgjengelig fra: <http://fibereuse.eu/index.php/detail/mechanical-recycling> (lest 18.04.2020).
- Colledani, M. (u.å.-c). *Thermal recycling (Use-case 2) of long fibers (glass and carbon) and re-use in high-tech, high-resistance applications*. Tilgjengelig fra: <http://fibereuse.eu/index.php/detail/for-thermal-recycling> (lest 18.04.2020).

- Correia, J. R., Almeida, N. M. & Figueira, J. R. (2011). Recycling of FRP composites: reusing fine GFRP waste in concrete mixtures. *Journal of Cleaner Production*, 19 (15): 1745-1753. doi: 10.1016/j.jclepro.2011.05.018.
- de Decker, K. (2015). *A world made of rotor blades*. Tilgjengelig fra: <https://www.notechmagazine.com/2015/02/a-world-made-of-rotor-blades.html> (lest 30.03.2020).
- Dong, P. A. V., Azzaro-Pantel, C., Boix, M., Jacquemin, L. & Domenech, S. (2015). Modelling of Environmental Impacts and Economic Benefits of Fibre Reinforced Polymers Composite Recycling Pathways. *Computer Aided Chemical Engineering*, 37: 2009-2014.
- Dong, P. A. V., Azzaro-Pantel, C. & Cadene, A. L. (2018). Economic and environmental assessment of recovery and disposal pathways for CFRP waste management. *Resources Conservation and Recycling*, 133: 63-75. doi: 10.1016/j.resconrec.2018.01.024.
- Edgren, J. (2019, 06. oktober). Utbrukte vindkraftverk kommer til å bli «verdiløse» søppelberg. *Teknisk Ukeblad*. Tilgjengelig fra: <https://www.tu.no/artikler/utbrukte-vindkraftverk-kommer-til-a-bli-verdilose-soppelberg/475044> (lest 24.04.2020).
- EU-kommisjonen. (2008). Directive 2008/98/EC of the European Parliament and of the Council of 19 november 2008 on waste and repealing certain directives. *Official Journal of the European Union*, L 312/3.
- EU-kommisjonen. (2011). *Environment: Tighter restrictions on industrial creosote use*. Tilgjengelig fra: https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/IP_11_925 (lest 07.05.2020).
- EU-kommisjonen. (2015). *Closing the loop - An EU action plan for the Circular Economy*. Tilgjengelig fra: https://ec.europa.eu/commission/publications/communications-circular-economy_en (lest 29.05.2020).
- EU-kommisjonen. (2018). Directive (EU) 2018/851 of the European Parliament and of the Council of 30 may 2018 amending directive 2008/98/EC on waste. *Official Journal of the European Union*, L 150/109.
- EU-kommisjonen. (2019). 19. *General Annexes*. Horizon 2020 work programme 2018-2020. Tilgjengelig fra: https://ec.europa.eu/research/participants/data/ref/h2020/other/wp/2018-2020/annexes/h2020-wp1820-annex-ga_en.pdf (lest 28.05.2020).
- EU-kommisjonen. (2020). *A European Green Deal*. Tilgjengelig fra: https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal_en (lest 16.02.2020).
- EuCIA. (2013). *Composites Recycling Made Easy*. Tilgjengelig fra: <https://eucia.eu/about-composites/sustainability> (lest 01.04.2020).
- FN-sambandet. (2019). *Bærekraftig utvikling*. Tilgjengelig fra: <https://www.fn.no/tema/fattigdom/Baerekraftig-utvikling> (lest 22.05.2020).
- G-Fiber. (u.å.). *Stationære Støjløsninger*. Tilgjengelig fra: <https://g-fiber.dk/stoejloesninger/> (lest 04.05.2020).
- Giorgini, L., Benelli, T., Mazzocchetti, L., Leonardi, C., Zattini, G., Minak, G., Dolcini, E., Cavazzoni, M., Montanari, I. & Tosi, C. (2015). Recovery of carbon fibers from cured and uncured carbon fiber reinforced composites wastes and their use as feedstock for a new composite production. *Polymer Composites*, 36 (6): 1084-1095. doi: 10.1002/pc.23440.
- Giorgini, L., Leonardi, C., Mazzocchetti, L., Zattini, G., Cavazzoni, M., Montanari, I., Tosi, C. & Benelli, T. (2016). Pyrolysis of Fiberglass/Polyester Composites: Recovery and Characterization of Obtained Products. *Fme Transactions*, 44 (4): 405-414. doi: 10.5937/fmet1604405G.
- Glassfiber Produkter. (u.å.). *Ostasteidn rasteplass – spesialløsninger i glassfiber*. Tilgjengelig fra: <https://www.glassfiber.no/ostasteidn-rasteplass-spesiallosninger/> (lest 24.05.2020).
- Groep, G. (2017). *Speelwerktuig van windmolenwieken*. Tilgjengelig fra: <https://www.gkbgroep.nl/projecten/speelwerktuig-van-windmolenwieken/> (lest 30.03.2020).
- Grønland, S. E. (2015). *Kostnadsmodeller for transport og logistikk – basisår 2012*. TØI rapport 1435/2015. Tilgjengelig fra: <https://www.toi.no/publikasjoner/> (lest 28.04.2020).

- Guezuraga, B., Zauner, R. & Polz, W. (2012). Life cycle assessment of two different 2 MW class wind turbines. *Renewable Energy*, 37 (1): 37-44. doi: 10.1016/j.renene.2011.05.008.
- Hall, S. (2016). End-of-life recycling options for glass fibre reinforced polymers. *The Plymouth Student Scientist*, 9 (2): 68-94.
- Henze, V. (2020). *Vestas Still Rules Turbine Market, But Challengers Are Closing In*: BloombergNEF. Tilgjengelig fra: <https://about.bnef.com/blog/vestas-still-rules-turbine-market-but-challengers-are-closing-in/> (lest 22.03.2020).
- Holstad, G. (2019, 16. desember). Her ligger det trønderske vindkrafteventyret begravd. *Adresseavisen*. Tilgjengelig fra: <https://www.adressa.no/pluss/2019/12/16/Her-ligger-det-trønderske-vindkrafteventyret-begravd-20504282.ece> (lest 15.02.2020).
- Ierides, M., Mccready, A. & Reiland, J. (2019). *Wind turbine blade circularity: Technologies and practices around the value chain*. Tilgjengelig fra: <https://baxcompany.com/insights/wind-energy-challenging-clean-energy-solution/> (lest 18.03.2020).
- Igniss Energy. (u.å.). *Calorific value of waste*. Tilgjengelig fra: <http://www.igniss.com/calorific-value-waste> (lest 08.05.2020).
- Internkontrollforskriften. (1996). *Forskrift om systematisk helse-, miljø- og sikkerhetsarbeid i virksomheter av 6. desember 1996 nr. 1127*. Tilgjengelig fra: <https://lovdata.no/dokument/SF/forskrift/1996-12-06-1127> (lest 22.05.2020).
- IRENA. (2019). *Renewable power generation costs in 2018: Key findings and executive summary*. Abu Dabhi: International Renewable Energy Agency. Tilgjengelig fra: <https://www.irena.org/publications/2019/May/Renewable-power-generation-costs-in-2018> (lest 14.02.2020).
- IRP. (2019). *Global Resources Outlook 2019: Natural Resources for the Future We Want*. Report of the International Resource Panel. . Nairobi, Kenya: United Nations Environment Programme. Tilgjengelig fra: <https://wedocs.unep.org/handle/20.500.11822/27517> (lest 26.05.2020).
- Jensen, J. P. & Skelton, K. (2018). Wind turbine blade recycling: Experiences, challenges and possibilities in a circular economy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 97: 165-176. doi: 10.1016/j.rser.2018.08.041.
- Job, S. (2013). Recycling glass fibre reinforced composites – history and progress. *Reinforced Plastics*, 57 (5): 19-23. doi: [https://doi.org/10.1016/S0034-3617\(13\)70151-6](https://doi.org/10.1016/S0034-3617(13)70151-6).
- Juhrich, K. (2016). *CO2 Emission Factors for Fossil Fuels*. CLIMATE CHANGE 28/2016. Tilgjengelig fra: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1968/publikationen/co2_emission_factors_for_fossil_fuels_correction.pdf (lest 08.05.2020).
- Kalkanis, K., Psomopoulos, C. S., Kaminaris, S., Ioannidis, G. & Pachos, P. (2019). *Wind turbine blade composite materials - End of life treatment methods*. Energy Procedia.
- Kjellby, T. H. (2017). *Konsesjonssøknad: Lindesnes vindkraftverk – utskifting av turbiner*. Tilgjengelig fra: <https://www.nve.no/konsesjonssaker/konsesjonssak?type=A&id=4790> (lest 14.05.2020).
- Krohn, S., Morthorst, P. & Awerbuch, S. (2009). *The Economics of Wind Energy: A report by the European Wind Energy Association*. Tilgjengelig fra: http://www.ewea.org/fileadmin/files/library/publications/reports/Economics_of_Wind_Energy.pdf.
- Larsen, K. (2009). Recycling wind. *Reinforced Plastics*, 53 (1): 20-23,25. doi: 10.1016/S0034-3617(09)70043-8.
- Lefevre, A., Garnier, S., Jacquemin, L., Pillain, B. & Sonnemann, G. (2019). Anticipating in-use stocks of carbon fibre reinforced polymers and related waste generated by the wind power sector until 2050. *Resources, Conservation & Recycling*, 141: 30-39. doi: 10.1016/j.resconrec.2018.10.008.
- Liu, P. & Barlow, C. Y. (2017). Wind turbine blade waste in 2050. *Waste Management*, 62: 229-240. doi: 10.1016/j.wasman.2017.02.007.
- LOOP. (2018). Avfallsdeponi. I: *Store norske leksikon*. Tilgjengelig fra: <https://snl.no/avfallsdeponi> (lest 23.05.2020).

- Lopez, F. A., Martin, M. I., Alguacil, F. J., Rincon, J. M., Centeno, T. A. & Romero, M. (2012). Thermolysis of fibreglass polyester composite and reutilisation of the glass fibre residue to obtain a glass-ceramic material. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 93: 104-112. doi: 10.1016/j.jaap.2011.10.003.
- Marthinsen, J., Skogesal, O., Thobek, J. & Briseid, T. (2008). *Energipotensial i nedbrytbart avfall i Norge*. Alternative behandlingsformer for nedbrytbart avfall (2475/2011). Tilgjengelig fra: <https://evalueringsportalen.no/evaluering/energipotensial-i-nedbrytbart-avfall-i-norge> (lest 08.05.2020).
- Mativenga, P. T., Shuaib, N. A., Howarth, J., Pestalozzi, F. & Woidasky, J. (2016). High voltage fragmentation and mechanical recycling of glass fibre thermoset composite. *Cirp Annals-Manufacturing Technology*, 65 (1): 45-48. doi: 10.1016/j.cirp.2016.04.107.
- Miceli, F. (2019). *Circular economy: use of wind turbines blades as combustible and mix material for cement production*. Tilgjengelig fra: <http://www.windfarmbop.com/circular-economy-use-of-wind-turbines-blades-as-combustible-and-mix-material-for-cement-production/> (lest 21.03.2020).
- Miljødirektoratet. (2019). *Deponering av avfall*. Tilgjengelig fra: <https://miljostatus.miljodirektoratet.no/tema/avfall/avfallshandtering/deponering-av-avfall/> (lest 23.05.2020).
- Miljøskærm. (u.å.-a). *Bæredygtighet og livscyklusanalyse (LCA)*. Tilgjengelig fra: <https://miljoskarm.dk/tekniske-spesifikationer/baeredygtighed-og-livscyklusanalyse-lca/> (lest 04.05.2020).
- Miljøskærm. (u.å.-b). *Genbrug og bortskaffelse; Cirkulær økonomi*. Tilgjengelig fra: <https://miljoskarm.dk/tekniske-spesifikationer/genbrug-og-bortskaffelse/> (lest 04.05.2020).
- Miljøskærm. (u.å.-c). *Tekniske egenskaber*. Tilgjengelig fra: <https://miljoskarm.dk/tekniske-spesifikationer/akustiske-egenskaber/> (lest 04.05.2020).
- NORWEA. (2019). *Vindkraft: Hvem, hva, hvordan*. Vindkraft håndboka. Tilgjengelig fra: <https://norwea.org/fakta> (lest 19.01.2020).
- NVE. (2019). *Utbygde vindkraftverk*. Tilgjengelig fra: <https://www.nve.no/energiforsyning/vindkraft/utbygde-vindkraftverk/> (lest 08.02.2020).
- NVE. (2020). *Vindkraft*. Tilgjengelig fra: <https://www.nve.no/energiforsyning/kraftproduksjon/vindkraft/> (lest 15.03.2020).
- NVE. (u.å.). *Vindkraftdata*. Tilgjengelig fra: <https://www.nve.no/energiforsyning/kraftproduksjon/vindkraft/vindkraftdata/> (lest 20.05.2020).
- Obunai, K., Fukuta, T. & Ozaki, K. (2015). Carbon fiber extraction from waste CFRP by microwave irradiation. *Composites Part a-Applied Science and Manufacturing*, 78: 160-165. doi: 10.1016/j.compositesa.2015.08.012.
- Oleinik, P. & Kuzmina, T. (2018). The stages of demolition of buildings of the first industrial generation. I: Askadskiy, A., Pustovgar, A., Matseevich, T. & Adamtsevich, A. (red.) *IOP Conference Series-Materials Science and Engineering*, b. 365 *Xxi International Scientific Conference on Advanced in Civil Engineering Construction - the Formation of Living Environment*. Bristol: Iop Publishing Ltd.
- Oliveux, G., Dandy, L. O. & Leeke, G. A. (2015). Current status of recycling of fibre reinforced polymers: Review of technologies, reuse and resulting properties. *Progress in Materials Science*, 72: 61-99. doi: 10.1016/j.pmatsci.2015.01.004.
- Paulillo, A., Striolo, A. & Lettieri, P. (2019). The environmental impacts and the carbon intensity of geothermal energy: A case study on the Hellisheiði plant. *Environment International*, 133. doi: 10.1016/j.envint.2019.105226.
- Pickering, S. J. (2006). Recycling technologies for thermoset composite materials - current status. *Composites Part a-Applied Science and Manufacturing*, 37 (8): 1206-1215. doi: 10.1016/j.compositesa.2005.05.030.

- Raadal, H. L., Gagnon, L., Modahl, I. S. & Hanssen, O. J. (2011). Life cycle greenhouse gas (GHG) emissions from the generation of wind and hydro power. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 15 (7): 3417-3422. doi: 10.1016/j.rser.2011.05.001.
- Rahimizadeh, A., Kalman, J., Fayazbakhsh, K. & Lessard, L. (2019). Recycling of fiberglass wind turbine blades into reinforced filaments for use in Additive Manufacturing. *Composites Part B: Engineering*, 175. doi: 10.1016/j.compositesb.2019.107101.
- Rahnama, B. (2011). *Reduction of environmental impact effect of disposing wind turbine blades*. Gotland: Gotland University. Tilgjengelig fra: <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:691565/FULLTEXT01.pdf>.
- Ramirez-Tejeda, K., Turcotte, D. A. & Pike, S. (2017). Unsustainable Wind Turbine Blade Disposal Practices in the United States: A Case for Policy Intervention and Technological Innovation. *NEW SOLUTIONS: A Journal of Environmental and Occupational Health Policy*, 26 (4): 581-598. doi: 10.1177/1048291116676098.
- Razdan, P. & Garret, P. (2017). *Life Cycle Assessment of Electricity Production from an onshore V112-3.45 MW Wind Plant*. Tilgjengelig fra: https://www.vestas.com/~media/vestas/about/sustainability/pdfs/v1123%2045mw_mk3a_iso_lca_final_31072017.pdf (lest 18.04.2020).
- Reprocover. (u.å.). *Company*. Tilgjengelig fra: https://en.reprocover.eu/?page_id=1526 (lest 04.05.2020).
- Rustad, J. (2018). *Sporveien tar i bruk komposittviller*. Tilgjengelig fra: https://sporveien.com/inter/nyheter?p_edit=false#/pressreleases/sporveien-tar-i-bruk-komposittviller-2466819 (lest 04.05.2020).
- Schiager, V. (2020). *Arctic Wind AS - godkjenning av detaljplan og miljø-, transport- og anleggsplan for Havøygavlen vindkraftverk*. Tilgjengelig fra: <http://webfileservice.nve.no/API/PublishedFiles/Download/201913827/2991290> (lest 13.05.2020).
- Schmidl, E., Hinrichs, S. & Holcim (Deutschland) AG. (2010). *Geocycle Provides Sustainable Recycling of Rotor Blades in Cement Plant*. Tilgjengelig fra: Motatt fra Geocycle (lest 01.04.2020).
- SFTool. (u.å.). *Materials & Resources*. Tilgjengelig fra: <https://sftool.gov/learn/about/43/materials-resources> (lest 26.05.2020).
- Sokoli, H. U., Simonsen, M. E. & Søggaard, E. G. (2017). Investigation of degradation products produced by recycling the solvent during chemical degradation of fiber-reinforced composites. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 36 (17): 1286-1296. doi: 10.1177/0731684417707060.
- Speksnijder, S. (u.å.). *Bridge of blades*. Tilgjengelig fra: <http://www.stijnspeksnijder.com/gallery/bridge-of-blades/> (lest 30.03.2020).
- SSB. (2018). *Tilgang og anvendelse av elektrisitet i perioden 1993-2017*. Tilgjengelig fra: <https://www.ssb.no/energi-og-industri/artikler-og-publikasjoner/tilgang-og-anvendelse-av-elektrisitet-i-perioden-1993-2017> (lest 19.05.2020).
- Steffen, W., Richardson, K., Rockström, J., Cornell, S. E., Fetzer, I., Bennett, E. M., Biggs, R., Carpenter, S. R., de Vries, W., de Wit, C. A., et al. (2015). Planetary boundaries: Guiding human development on a changing planet. *Science*, 347 (6223): 1259855. doi: 10.1126/science.1259855.
- Sundberg, C. (2012, 23. august). Her faller den 450 tonn tunge vindmøllen. *Adresseavisen*. Tilgjengelig fra: <https://www.adressa.no/nyheter/nordtrondelag/article3292435.ece> (lest 22.03.2020).
- Superuse Studios. (2014). *Blade Made*. Tilgjengelig fra: <https://issuu.com/2012architecten/docs/blademade> (lest 30.03.2020).
- Torres, A., de Marco, I., Caballero, B. M., Laresgoiti, M. F., Legarreta, J. A., Cabrero, M. A., Gonzalez, A., Chomon, M. J. & Gondra, K. (2000). Recycling by pyrolysis of thermoset composites: characteristics of the liquid and gaseous fuels obtained. *Fuel*, 79 (8): 897-902. doi: 10.1016/S0016-2361(99)00220-3.

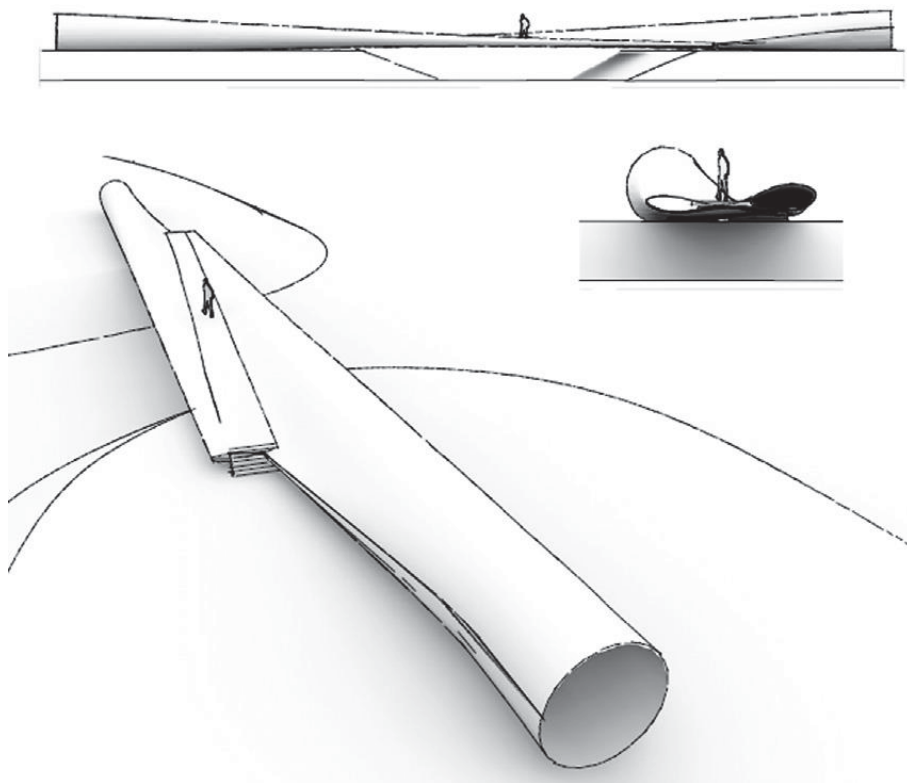
- Trading Economics. (u.å.). *Coal*. Tilgjengelig fra: <https://tradingeconomics.com/commodity/coal>.
- Turconi, R., Boldrin, A. & Astrup, T. (2013). Life cycle assessment (LCA) of electricity generation technologies: Overview, comparability and limitations. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 28: 555-565. doi: 10.1016/j.rser.2013.08.013.
- UNEP. (2016). *Global Material Flows and Resource Productivity*. An Assessment Study of the UNEP International Resource Panel. Paris, France: United Nations Environment Programme. Tilgjengelig fra: <https://wedocs.unep.org/handle/20.500.11822/21557> (lest 26.05.2020).
- Utenriksdepartementet. (2018). *Norges samarbeid med EU*. Tilgjengelig fra: <https://www.regjeringen.no/no/tema/europapolitikk/tema-norge-eu/norge-eu/id684934/> (lest 26.05.2020).
- van Oudheusden, A. (2019). *Recycling of composite materials*. Masteroppgave. Delft: Delft University of Technology. Tilgjengelig fra: <https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid%3A0749ed5c-7aeb-4275-abee-0f904a08ea4d>.
- Vangen, O. (2018). Silofôr. I: *Store norske leksikon*. Tilgjengelig fra: <https://snl.no/silofôr> (lest 04.05.2020).
- Vestas. (2020). *The Vestas Sustainability Report 2019*. Tilgjengelig fra: <https://www.vestas.com/en/about/sustainability> (lest 08.02.2020).
- Vestas. (u.å.). *V136-4.2 MW™ at a glance*. Tilgjengelig fra: <https://www.vestas.com/en/products/4-mw-platform/v136-4-2-mw#!> (lest 20.05.2020).
- Vilkki, M. (2017). *Composite Railway Crossties Status & Developments*. Tilgjengelig fra: http://www.conenor.com/s/Conenor_Composite-Railway-Crossties-j4ej.pptx (lest 04.05.2020).
- Vilkki, M. (2018). *Demonstration plans for activities at DEMO SITES: User involvement*. Circular Approach for Eco-Composite Bulky Product. Tilgjengelig fra: <https://www.ecobulk.eu/wp-content/uploads/2018/12/D4.4-Demonstration-plans.pdf> (lest 05.05.2020).
- Vilkki, M. (u.å.). *Company Profile*. Tilgjengelig fra: <http://www.conenor.com/company-profile> (lest 05.05.2020).
- Vujic, J., Antic, D. P. & Vukmirovic, Z. (2012). Environmental impact and cost analysis of coal versus nuclear power: The U.S. case. *Energy*, 45 (1): 31-42. doi: 10.1016/j.energy.2012.02.011.
- Walsh, C. & Pineda, J. (2019). *Wind energy in Europe in 2018: Trends and statistics*. Brussels: Wind Europe. Tilgjengelig fra: <https://windeurope.org/about-wind/reports/> (lest 16.02.2020).
- Walsh, C. (2020). *Wind energy in Europe in 2019: Trends and statistics*. Brussels: Wind Europe. Tilgjengelig fra: <https://windeurope.org/about-wind/reports/> (lest 24.04.2020).
- Windbrokers. (u.å.). *Independent wind turbine supplier*. Tilgjengelig fra: <http://www.windbrokers.com/pages/en/about-us/company.php> (lest 30.03.2020).
- WindEurope. (2020). *Circular Economy: Blade recycling is a top priority for the wind industry*. Tilgjengelig fra: <https://windeurope.org/newsroom/news/blade-recycling-a-top-priority-for-the-wind-industry/> (lest 24.05.2020).
- Wisting, T. (2020). Jernbane. I: Tilgjengelig fra: <https://snl.no/jernbane> (lest 04.05.2020).
- WMW. (2018). *European Circular Economy Project Researches Wind Turbine Blade Recycling*. Tilgjengelig fra: <https://waste-management-world.com/a/european-circular-economy-project-researches-wind-turbine-blade-recycling> (lest 04.05.2020).
- Yang, Y. X., Boom, R., Irion, B., van Heerden, D. J., Kuiper, P. & de Wit, H. (2012). Recycling of composite materials. *Chemical Engineering and Processing-Process Intensification*, 51: 53-68. doi: 10.1016/j.cep.2011.09.007.
- Yazdanbakhsh, A., Bank, L. C., Rieder, K. A., Tian, Y. & Chen, C. (2018). Concrete with discrete slender elements from mechanically recycled wind turbine blades. *Resources Conservation and Recycling*, 128: 11-21. doi: 10.1016/j.resconrec.2017.08.005.
- Zephyr. (u.å.). *Guleslettene*. Tilgjengelig fra: <https://www.zephyr.no/prosjekter/gulslettene-sogn-og-fjordane/> (lest 06.02.2020).

ZWIA. (2018). *Zero Waste Definition*. Tilgjengelig fra: <http://zwia.org/zero-waste-definition/> (lest 26.05.2020).

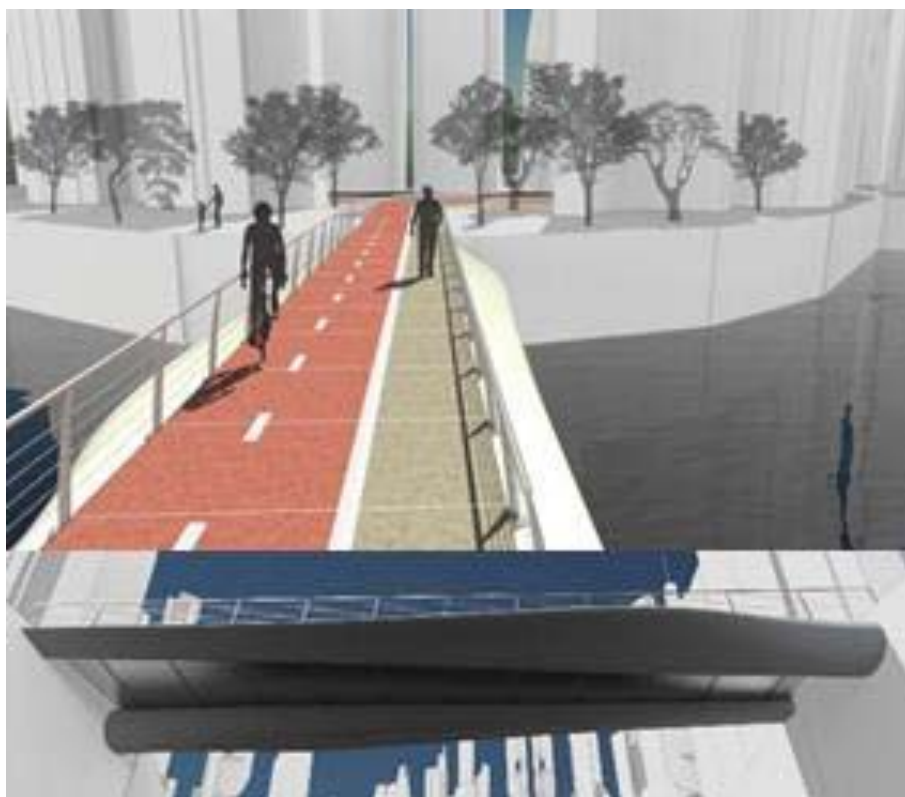
10. Vedlegg

Vedleggets figurer og tabeller

Figur 1: Bro designet av Superuse studios I sammenheng med prosjektet i Aalborg, Danmark (Jensen & Skelton, 2018).....	91
Figur 2: Bro for saktegående trafikk designet av Stijn Speksnijder i sammenheng med hans masteroppgave ved Delft University of Technology (Speksnijder, u.å.).....	91
Figur 3: Vindturbinblader med nytt liv som lekeplass i bydelen Oude Noorden i Rotterdam, Nederland. Bygget i 2009 (Superuse Studios, 2014).....	92
Figur 4: Vindturbinblader fungerer også som urbant møblement, her ved Erasmus Bridge i Rotterdam, Nederland. Bygget i 2012 (Superuse Studios, 2014).....	92
Figur 5: I Almere, Nederland har fire vindturbinblader blitt brukt ved bussholdeplass til blant annet sykkelkur. Dette ble bygget i 2014 (Van Dijk, 2018).....	93
Figur 6: Siemens Gamesa har støttet et prosjekt ved Aalborg havn der deler av et turbinblad fungerer som sykkelkur. Bilde: Petter Risager. ^[2]	93
Figur 7: Montering av turbiner på Hundhammerfjellet ved hjelp av løftetårn. ^[7]	94
Figur 8: Monter og demontering av vindturbiner krever stadig større og kompliserte kraner (Moser, 2016).....	94
Tabell 1: Oversikt over benyttede oppføringer i ecoinvent 3.3, beregnet i SimaPro, for oppgavens kost/nytte-vurdering.....	95
Tabell 2: Oversikt over kostnadsvariabler for forskjellige transportklasser, hentet fra Grønland (2015).....	96



Figur 1: Bro designet av Superuse Studios i sammenheng med prosjektet i Aalborg, Danmark (Jensen & Skelton, 2018)



Figur 2: Bro for saktegående trafikk designet av Stijn Speksnijder i sammenheng med hans masteroppgave ved Delft University of Technology (Speksnijder, u.å.).



Figur 3: Vindturbinblader med nytt liv som lekeplass i bydelen Oude Noorden i Rotterdam, Nederland. Bygget i 2009 (Superuse Studios, 2014)



Figur 4: Vindturbinblader fungerer også som urbant møblement, her ved Erasmus Bridge i Rotterdam, Nederland. Bygget i 2012 (Superuse Studios, 2014)



Figur 5: I Almere, Nederland har fire vindturbinblader blitt brukt ved en bussholdeplass til blant annet et sykkelkur. Dette ble bygget i 2014 (Van Dijk, 2018).



Figur 6: Siemens Gamesa har støttet et prosjekt ved Aalborg havn der deler av et turbinblad fungerer som sykkelkur. Bilde: Peter Risager.^[2]



Figur 7: Montering av turbiner på Hundhammerfjellet ved hjelp av løftetårn.^[7]



Figur 8: Montering og demontering av vindturbiner krever stadig større og kompliserte kraner (Moser, 2016).

Kommentar til tabell 1. Utslippsfaktor på GFK-avfall ble konstruert ved hjelp av faktorer for glass- og plastavfall, stilt i kursiv. Den nederste oppføringen er grunnlag for forutsetningen om energibruk ved demontering og reinstallering av vindturbiner. I denne oppføringen var el-input satt til å være 0,5 kWh/kg turbinmateriale.

Tabell 1: Oversikt over benyttede oppføringer i ecoinvent 3.3, beregnet i SimaPro, for oppgavens kost/nytte-vurdering.

Prosess	Utslippsfaktor	Enhet
Transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO5 {GLO} market for Alloc Def, U	0,0905	kg CO ₂ eq / tkm
Transport, freight, sea, transoceanic ship {GLO} market for Alloc Def, U	0,0115	kg CO ₂ eq / tkm
Municipal solid waste {NO} treatment of, incineration Alloc Def, U	0,4900	kg CO ₂ eq / kg
Hard coal {RoW} market for Alloc Def, U	0,5460	kg CO ₂ eq / kg
Inert waste, for final disposal {RoW} treatment of inert waste, inert material landfill Alloc Def, U	0,00536	kg CO ₂ eq / kg
Created process: Waste GFRP {Europe without Switzerland} treatment of waste GFRP, municipal incineration Alloc Def, U	0,732	kg CO ₂ eq / kg
<i>Waste glass {Europe without Switzerland} treatment of waste glass, municipal incineration Alloc Def, U</i>	<i>0,0289</i>	<i>kg CO₂ eq / kg</i>
<i>Waste plastic, mixture {Europe without Switzerland} treatment of waste plastic, mixture, municipal incineration Alloc Def, U</i>	<i>2,37</i>	<i>kg CO₂ eq / kg</i>
Electricity, medium voltage {GLO} market group for Alloc Def, U	0,213	kg CO ₂ eq / kWh
Iron scrap, unsorted {GLO} wind turbine construction, 4.5MW, onshore Alloc Def, U	N/A	kg CO ₂ eq / kg

I tabell 2 vises kostnadsvariablene som ble benyttet for estimere transportkostnadene for scenarioene i studiens kost/nytte-vurdering. Tre transportklasser ble benyttet for veitransport, og to transportklasser ble benyttet for sjøtransport (bulkship).

Tabell 2: Oversikt over kostnadsvariabler for forskjellige transportklasser, hentet fra Grønland (2015)

Transportmiddel	Articulated semi, closed	LGV	Timber truck with hanger	Dry bulk 5000 dwt	Break bulk lolo, 5000 dwt
Modellvariabel					
Benyttet i scenario	A og B	A	Basis og C	B	C
Tidskostnad (kr/time)	441	404	526	1562	1918
Avstandskostnad (kr/km)	6,4	2,9	7,76	97	97
Terminalkostnad (kr/tonn)	114	330	7	6	104
Kostnad per forsendelse (kr/tur)	99	47	221	29 311	94
Servicehastighet (km/t)	-	-	-	27,8	27,8
Gjennomsnittlig ruteavgift, sjøtransport (kr/tonn)	-	-	-		
Antall turbinblader per last	6	-	1	54	6
Antall tonn turbinblader per last	8,66	20	8,66	1014	113
Antall turer	611	265	282	3	24

Kildeliste, vedlegg

- Grønland, S. E. (2015). *Kostnadsmodeller for transport og logistikk – basisår 2012*. TØI rapport 1435/2015. Tilgjengelig fra: <https://www.toi.no/publikasjoner/> (lest 28.04.2020).
- Jensen, J. P. & Skelton, K. (2018). Wind turbine blade recycling: Experiences, challenges and possibilities in a circular economy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 97: 165-176. doi: 10.1016/j.rser.2018.08.041.
- Moser, S. (2016). *Der neue Trend im Onshore-Bereich: Schwachwindanlagen*. Tilgjengelig fra: <https://www.produktion.de/trends-innovationen/der-neue-trend-im-onshore-bereich-schwachwindanlagen-248.html> (lest 04.04.2020).
- Speksnijder, S. (u.å.). *Bridge of blades*. Tilgjengelig fra: <http://www.stijnspeksnijder.com/gallery/bridge-of-blades/> (lest 30.03.2020).
- Superuse Studios. (2014). *Blade Made*. Tilgjengelig fra: <https://issuu.com/2012architecten/docs/blademade> (lest 30.03.2020).
- Van Dijk, L. (2018, 4. mai). Wat te doen met een afgeschreven windmolen. *de Volkskrant*. Tilgjengelig fra: <https://www.volkskrant.nl/economie/wat-te-doen-met-een-afgeschreven-windmolen~b8033518/> (lest 30.03.2020).



Norges miljø- og biovitenskapelige universitet
Noregs miljø- og biovitskapelege universitet
Norwegian University of Life Sciences

Postboks 5003
NO-1432 Ås
Norway