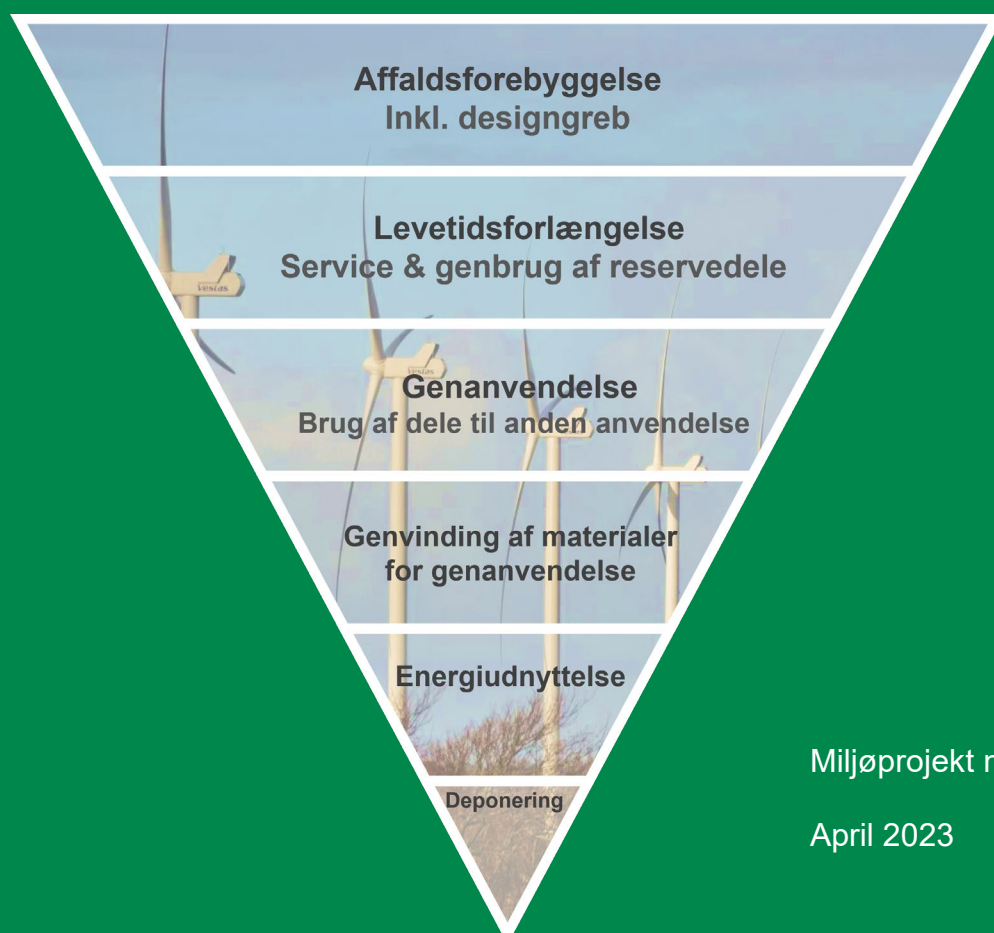




Kortlægning af mængder og behandlingsmuligheder for vindmøllevinger **Initiativ 115**



Miljøprojekt nr. 2241

April 2023

Udgiver: Miljøstyrelsen

Forfatter: Lykke Margot Ricard, Syddansk Universitet

ISBN: 978-87-7038-511-4

Miljøstyrelsen offentliggør rapporter og indlæg vedrørende forsknings- og udviklingsprojekter inden for miljøsektoren, som er finansieret af Miljøstyrelsen. Det skal bemærkes, at en sådan offentliggørelse ikke nødvendigvis betyder, at det pågældende indlæg giver udtryk for Miljøstyrelsens synspunkter. Offentliggørelsen betyder imidlertid, at Miljøstyrelsen finder, at indholdet udgør et væsentligt indlæg i debatten omkring den danske miljøpolitik.

Må citeres med kildeangivelse.

Sammenfatning

Rapporten redegør for, at Danmark over de næste 25-30 år kommer til at stå med mindst 121.000 ton kompositaffald fra udtjente vindmøllervinger og møllehuse fra nuværende vindmølleflåde. Det kan være svært at vide, hvornår vindmøller nedtages, men meget tyder på at den faktiske levetid er længere end designlevetiden på 20-25 år. Der er i rapporten redegjort for, at estimater på 50 procent eller mere af velfungerende, men nedtaget møller genbruges, enten ved videresalg af hele møller, eller som reservedele til levetidsforlængelse. Prognoser for affaldsstrømme er beregnet ud fra levetidsscenerier for henholdsvis landvindmøller på 30 år og havvindmøller på 25 år, som er tilsluttet elnettet. Der er i prognosen ikke medtaget produktions- og serviceaffald. En væsentlig forskel i affaldsstrømmene for landmøller og havmøller er, at landmøller oftest nedtages én ad gangen, mens havmøller kræver leje af specialskibe og det forventes at hele vindmølleparken nedtages på én gang.

Hidtil har affaldsmængderne fra vindmøllevinger over en 34-årig periode løbende fra 1987-2021 været 8400 ton, og primært fra små landvindmøller afmeldt elnettet. Der er derfor udsigt til en gevaldig stigning i mængder af kompositaffald fra vindmøllevinger. Tager man de fremtidige havvindmølleparker med, som er i pipeline, vil prognosen med en levetid på 35 år for de nye havvindmølleparker firdoble de akkumuleret kompositmængder til ca. 500.000 ton om 35-40 år i Danmark.

I dag nyttiggøres eller genvindes 85-90 procent af materialerne i vindmøller (målt i vægt). Udfordringen er møllevingerne og møllehuse, som består af kompositter af primært glasfibre (til dels kul fibre) og hærdeplast (resiner), som er vanskeligt at genanvende. Hidtil har det været en løsning at sende udtjente vindmøllevinger til deponeringsanlæg. Deponering er lovlig og billigt i Danmark (cirka 895 DKK inkl. den statslige afgift i mindstepris). Deponering ligger nederst i affaldshierarkiet og er uønsket i henhold til EU-affaldsdirektivet. EU-lande som Tyskland, Øst-rig, Holland og Finland har indført forbud mod deponering af kompositaffald, som bl.a. vindmøllevinger. Rapporten redegør for et overordnet nabotjek af Frankrig, Holland og Tyskland. Det konkluderes i rapporten, at et forbud mod deponering af affaldstypen har haft en fremmende effekt på udviklingen af tilbud for nyttiggørelse og genanvendelse af vindmøllevinger. Der findes en del forskellige genanvendelsesteknologier i Tyskland. De markedsmodne teknologier er de simpleste, hvor kompositaffaldet knuses mekanisk og bruges som fyldstoffer f.eks. i byggematerialer, eller kan medforbrændes i cementproduktion.

Der er i Danmark gennemført en række genanvendelsesprojekter af udtjente vindmøllevinger som f.eks. støjskærme, staldvægge og cykelskure. Men perspektiverne i disse muligheder er ikke store i forhold til de forventede eksponentielt voksende mængder af kompositaffald i fremtiden. Nye lovende genanvendelsesprocesser, som kan adskille fibre fra epoxy-resin, er succesfuldt testet i laboratoriet i Danmark – og genanvendelige vingedesign er på vej. Men et fællesproblem i realisering er etablering af værdikæder og sikring af affaldsvolumener. Hvis der ikke er volumen nok, er der ikke basis for rentable virksomheder, da de er afhængige af en stor og stabil forsyning af råmaterialer. Det er forfatterens anbefaling at begrænse muligheden for deponering af vindmøllevinger i Danmark – og herigennem sikre at lignende affaldstyper indgår i loopet for nyttiggørelse. Både den europæiske brancheforening WindEurope og den danske Green Power Denmark ønsker et fælles EU-forbud mod deponering af vindmøllevinger og lignende kompositter fra 2025. Det er et synspunkt, som de store producenter, udviklere og parkejere i Europa og i Danmark støtter op om. Det anbefales samtidigt af rapportens forfatter at se på om affaldskoder er dækkende for vindmøllevinger, som for nuværende affaldskode er plastikaffald samt mobilitet på testprøver over landegrænser, når det er med henblik på nyttiggørelse og etablering af nye værdikæde.

Rapportens opbygning

Problematikken med genanvendelse af vindmøllevingerne behandles i denne rapport, der rummer en kortlægning baseret på forskellige scenarier for levetid på vindmøllerne, herunder også forlænget levetid af vindmøllerne. Rapporten beskriver desuden behandlingsmulighederne for de potentielt kommende mængder af kasserede vindmøllevinger, og i dialog med branchen diskuterer, hvordan disse fremtidige affaldsstrømme kan blive en del af en cirkulær økonomi. Der er ligeledes foretaget et overordnet nabotjek, der undersøger behandlingsmuligheder i Danmarks nabolande. Nabotjekket tjener alene som inspiration for danske affaldsproducenter i, hvordan vindmøllevingeaffald kan behandles i fremtiden.

Rapporten er bygget op af i alt otte kapitler, som følger:

Kapitel 1 er en indledning med baggrund for undersøgelse og introduktion til materialer.

Kapitel 2 kortlægger strømmen af affald fra vindmøllevinger. Kapitlet bringer desuden en prognose for det tempo, som de eksisterende vindmøller kan blive nedtaget i, og hvor store affaldsmængder af glasfiberkompositter der vil være tale om over de næste 25-30 år. Prognosen er baseret på nuværende vindenergianlæg tilsluttet elnettet i Danmark.

Kapitel 3 giver en status på vindenergibranchens ståsted med hensyn til cirkulær økonomi og deponeringsforbud.

Kapitel 4 giver et overblik over genanvendelsesteknologier i Europa, deres kommercielle modenhed samt deres fordele og formodede ulemper og barrierer.

Kapitel 5 giver et overblik over takster for deponering og praksis for behandlingsmuligheder for vindmøllevinger i nogle af Danmarks nabolande.

Kapitel 6 er en dialog med tekniske eksperter fra branchen, som beskriver vindenergibranchens synspunkter på fremtidige løsninger med hensyn til kompositaffald og genanvendelse.

Kapitel 7 giver et resumé af udvaskningsforsøg på vindmøllevinger fra deponeringsanlæg foretaget af anden rådgiver (Initiativet "Øget sporbarhed på håndtering af affald fra vindmøllevinger", som forankres hos Miljøstyrelsen).

Kapitel 8 er en afsluttende konklusion, som sammenfatter den opsamlede viden, herunder dialogbaserede anbefalinger til det videre arbejde mod en cirkulær økonomi for affaldshåndtering af glasfiberforstærkede kompositter.

Indhold

Sammenfatning	3
Rapportens opbygning	4
1. Indledning	7
1.1 Baggrund for kortlægning af affaldsstrømme	7
1.2 Glasfiberkompositter og affaldshåndtering	8
1.2.1 Kompositter i køretøjer, biler, lastbiler, busser og toge	9
1.2.2 Komposit-kofangere i Danmark	9
1.2.3 Campingvogne i Danmark	9
1.2.4 Bådskroge, joller, kajakker, kanoer og skibe	9
1.3 Vindmøllevinger og møllehuse	9
1.4 Livscyklusanalyser for vindmøller	10
2. Kortlægning af kompositaffald fra vindmøllevinger og møllehuse i Danmark 2022-2052	14
2.1 Affaldsstrømme hænger sammen med faktisk levetid på møllerne	15
2.2 Kortlægning af potentielt kompositaffald fra vindmøllevinger og møllehuse	16
2.2.1 Levetidsforlængende scenario for landmøller	17
2.2.2 Danmark står over for stigende mængder kompositaffald	18
2.2.3 Hvad sker der med de øvrige vinger fra afmeldte anlæg?	19
2.3 Oversigt over globalt gensalgsmarkedet	20
3. Hvor står branchen?	22
3.1 WindEurope's syn på cirkulær økonomi i møllevinger	22
3.1.1 WindEurope om vindenergibranchens bidrag til cirkularitet	22
3.1.2 WindEurope går ind for et fælles EU-forbud mod deponering	23
3.1.3 WindEurope ønsker at genanvendelsesteknologier fremmes	24
3.1.4 WindEurope ønsker EU-plattform for genbrugskompositter	24
4. Kortlægning af potentielle behandlingsmuligheder til genanvendelse	25
4.1 Behandlingsteknologier og deres markedsmodenhed	26
4.2 Deponering og forbrænding uden energiudnyttelse	28
4.3 Mekanisk nedbrydning (genanvendelse)	28
4.4 Termiske processer (forbrænding)	28
4.5 Medforbrænding i cement (energiudnyttelse og substitut)	28
4.6 Pyrolyse (genvinding/omsmeltning for at genanvende)	29
4.7 Fluidiseret leje (adskillelsesproces for at genanvende)	29
4.8 Termokemiske processer (adskillelse for at genanvende)	29
4.8.1 Solvolyse	29
4.8.2 Superkritiske væsker (adskillelse for genvinding)	30
4.9 Diskussion af behandlingsmuligheder	30
4.10 Danske offentligt støttede miljøprojekter om genanvendelse af kompositmaterialer	31
4.10.1 MUDP-projekter	31
4.10.2 Innovationsfondsprojekter	33

4.11	Vindindustriens projekter på genanvendelige rotorvinger	34
4.11.1	Zebra-projektet	34
4.11.2	RecyclableBlade projektet	34
5.	Nabotjek der undersøger behandlingspraksis	35
5.1	Tyskland	37
5.2	Holland	38
5.3	Frankrig	39
5.4	Eksempler på virksomheder der behandler kompositaffald	41
6.	Dialogen med branchen	42
6.1	Hvilke forhold påvirker ændringer i affaldsstrømme?	42
6.2	Hvilke forhold påvirker udbud af genanvendelsestilbud	43
6.2.1	Mangel på volumen er en udfordring	43
6.2.2	Initiativer der kan fremme genanvendelses af materialer	44
6.2.3	Omfordeling af priser på nyt og genanvendt materiale	44
6.3	Branchens praksis på bortskaffelse og nyttiggørelse	44
6.3.1	Kunne det være aktuelt at etablere genvindingsanlæg i Danmark?	45
6.3.2	Hvilke genanvendelsesmetoder arbejder de danske affaldsfirmaer med?	45
6.4	Opsummering på deponeringsforbud	46
6.5	Hvilke miljø-og affaldsregler kan understøtte en cirkulær økonomi på komposit?	46
6.5.1	Er den danske branche klar på et forbud mod deponering?	46
6.5.2	Hvad med udbudskrav: er det et instrument til øget cirkularitet?	47
6.5.3	Deponeringsforbud i EU Landfill Direktivet og nye affaldskoder	47
6.6	Innovationer	48
6.6.1	Er fremtidens vindmøllevingedesign genanvendeligt?	48
6.6.2	Hvorfor vælger man ikke den samme resin?	49
6.7	Affaldskoder og mobilitet	49
7.	Udvaskning fra vindmøllevinger i deponeringsanlæg	50
8.	Konklusion	52
8.1	Affaldsstrømme og prognoser	52
8.2	Design for levetidsbrug og ikke udødelighed	53
8.3	Udvaskning fra vindmøllevinger i deponeringsanlæg	53
8.4	Deponering skubber ikke på innovation	54
8.5	Vejen til at komme højere op i affaldshierarkiet	54
Tak til		56
Bibliografi		57
Bilag 1.Oversigt over interviewpersoner		60
Interview til kapitel 1-6		60
Interview til kapitel 1 og 4:		60
Bilag 2.Havvindmølleparker i pipeline		61
Bilag 3.Vingekomposit fra afmeldte anlæg 1987- 2021		62
Bilag 4.Eksempel på affaldskode for transport til Tyskland		63

1. Indledning

Udfordringen med genanvendelse af vindmøllevinger er omdrejningspunktet i denne rapport. Indtil nu har problemet været minimalt, da vindmøller i gennemsnit har en designlevetid på 20-25 år. I 2020 er debatten om affaldshåndteringen af vindmøllevinger blusset op på grund af forventning om nedtagning af flere udtjente vindmøller i nær fremtid i Danmark.

1.1 Baggrund for kortlægning af affaldsstrømme

Formålet med studiet er at undersøge, hvor store mængder vindmølleveingeffald der forventes at komme i Danmark, samt hvordan det behandles og bortskaffes. Syddansk Universitet er blevet bedt af Miljøstyrelsen om at kortlægge affaldsmængder fra vindmøllevinger i fremtidige prognoser, samt de potentielle behandlingsmuligheder af affaldstypen med henblik på at nedbringe deponeringsfraktionen og øge nyttiggørelse af materialerne fra vindmøllevinger. Heraf er perioden 2022-2052 udvalgt, som primært fokus.

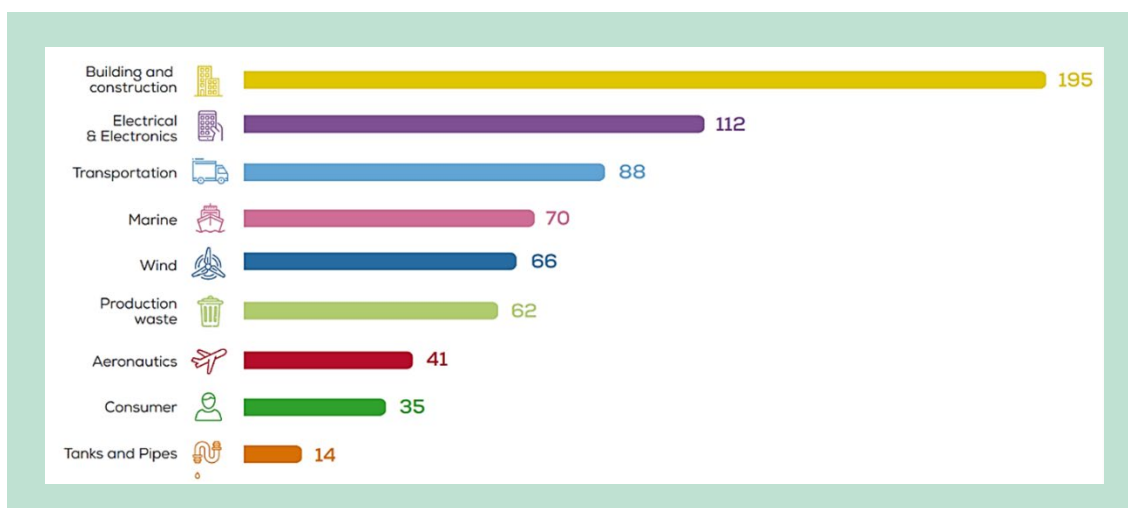
Danmark er et af pionerlandene for installering af vindmøller og vil således også være blandt de første lande til at skulle nedtage nogle af de større affaldsmængder i nær fremtid. Udfordringen er, at vindmøllevinger er svære at genanvende. Hidtil har det været en lovlig praksis og er det stadig, samt en meget billig mulighed, at sende udtjente vindmøllevinger på deponeringsanlæg til en mindste pris på 895 DKK per ton. På de fleste deponeringsanlæg, vil vindmøllevingerne typisk være kørt sammen med det andet affald med en stor gravemaskine, hvorved de vil være nedknust i nogen grad og svært at adskille fra det andet affald. Det er få deponeringsanlæg, hvor de vil være lagt separat og dermed vente på den dag, hvor et kommercielt genanvendelsesteknologi er blevet tilgængelig og de vil kunne affaldsbehandles på anden vis. Hvor meget vingeaffald, som er havnet i danske deponeringsanlæg, er svært tilgængeligt data. I 2012 oplyste Wind Denmark (i dag Green Power Denmark) til Miljøstyrelsen, at et skønnet estimat på 22.000 ton vingeaffald (inkl. produktionsaffald og fratrukket eksport) frem til 2020 i Danmark måtte forventes at gå til deponeringsanlæg (Miljøstyrelsen. Aktindsigt, Vindmøllebranchens estimer, 2012). Fra afmeldte vindmølleeanlæg fra elnettet siden 1987 og frem til 2021, så er det denne rapport vurdering (se bilag 3) at der har været mindst 8800 ton glasfiberkomposit fra vindmøllevinger. Det er kompositaffald over en periode på 34 år, som primært har bestået af mange små landvindmøller (ofte privatejet) og én mindre havvindmøllepark (Vindeby). Det må antages at en stor del af disse har været håndteret som ikke-genanvendeligt affald og er sendt til deponeringsanlæg i Danmark. Ét bud er, at mindst halvdelen er sendt til deponering, mens resten er blevet videresolgt eller udnyttet til reservedele.

I takt med at de store land- og havvindmølleeanlæg begynder at blive udtjente og skal affaldsbehandles, vil Danmark over de næste 30 år se frem til kompositaffaldsmængder af en helt anden størrelsesorden end hidtil set. På verdensplan estimeres der at komme 43 millioner ton vingeaffald frem til 2050, hvor Kina står for de 40 procent af affaldet, Europa for de 25 procent, USA for 16 procent og den øvrige verden for de sidste 19 procent (Liu & Barlow, 2017). Det er rundt regnet 10 millioner ton vingeaffald i Europa frem til 2050, ifølge prognosen fra Cambridge forskerne Lui & Barlow (2017). European Composites Industry Association's (EuCIA) har lavet et skøn fra 2020, hvor de estimerer at vindmøllevinger vil udgøre 10 procent af verdens samlede termohærdende kompositaffald i 2025. EuCIA forventer at vindenergibranchen i

Europa vil bidrage med 66.000 ton termohærdende kompositaffald frem til 2025. Det er et estimat som de forventer udgør 10 procent af den samlede estimeret mængde termohærdende kompositaffald og mindre end 5 procent af den samlede anslået mængde af kompositaffald, der kombinerer hærideplast og termoplast i Europa (Cefic - WindEurope - EuCIA, 2020).

Samme fremskrivningsmetode foretaget af EuCIA over fordelingen af kompositaffald i Europa peger på, at andelen af udtjente vindmøllevinger vil stige til at udgøre en andel på 20 procent i 2040 af den samlede mængde termohærdende kompositaffald (Red: som generelt set også er stigende). Vindmøllevinger (også kaldet rotoren) er et af de volumenmæssigt større industrielle kompositprodukter, hvor det forventes at mængderne af kompositaffald vil være hastig stigende i fremtiden (EuCIA, 2020). Andre sektorer, der producerer kompositaffald, er blandt andet byggeri, el og elektronik, transport, den maritime industri, luftfart, forbrugerprodukter og rør, se Figur 1.

I 2021 udmeldte vindenergibrancheforeningerne WindEurope og Green Power Denmark (tidligere Wind Denmark), at de støtter et fælles EU-forbud mod deponering af vindmøllevinger fra 2025. Det er en fælles erklæring, som de store producenter og parkejere har tilsluttet sig i Europa - og som nærværende rapport uddyber i kapitel 3. Det er således både den europæiske og den danske vindenergibranche, der har meldt ud at de prioriterer nyttiggørelse af vindmøllevinger højt på deres dagsorden. En drivkraft under denne dagsorden er for vindenergibranchen at undersøge om der er en fælles interessesfære og dermed synergier med de øvrige kompositforbrugende industrier med hensyn til affald og genanvendelse (Korsgaard, LM Wind Power, 2022).



FIGUR 1. Estimerede mængder kompositaffald per sektor i 2025, angivet i tusinder ton. Kilde: EuCIA, 2020.

1.2 Glasfiberkompositter og affaldshåndtering

Glasfiberkompositter er stærke og lette materialer, som er utrolige holdbare over for vind og vejr. Generelt er styrke og stivhed i kompositmaterialer styret af, hvor stor en mængde glasfiber, der tilsættes materialematricen. Støbemetoden, vævningsmønsteret, vægten, permeabiliteten, fibrenes retning og justeringen af fibrene har direkte betydning for kompositmaterialets mekaniske egenskaber (Vaughan, 1998). Samtidig er støbemetoden afgørende for, hvor meget fiber-volumen der kan tilsættes. Den procentvise fordeling mellem fibre og hærideplast (resin) har ligeledes indflydelse på egenskaberne. Glasfiberkompositter bruges i mange industrielle produkterne, som eksemplificeret i dette afsnit. Fælles for produkterne er, at de er svære at genanvende. Affald af glasfiber fra private (f.eks. fra kanoer, både, olietanke, tagbokse) sorteres tidligere under "Stort brændbart". Siden 1 januar 2022 hedder den fraktion "Rest til sortering" og sorteres ud i container på genbrugspladser.

1.2.1 Kompositter i køretøjer, biler, lastbiler, busser og toge

Mange komponenter til biler og andre køretøjer fremstilles af glas- og kulfiberkompositter. Det gælder ikke mindst sports- og racerbiler på grund af den høje styrke til vægt ratio i materialet, samt slid- og slagfastheden. Kompositterne anvendes typisk til for- og bagkofangere, døre og kabiner (Aleksiev, 2022). Køretøjer til offentlig transport anvender glasfiberkompositter i endnu større skala, da kompositterne ofte bruges til at støbe næsten hele den ydre skal af busser og toge (Ansys Granta Edupack, 2021).

1.2.2 Komposit-kofangere i Danmark

Ifølge en online vejledning fra AffaldPlus sorteres kasserede kofangere af glasfiber fra biler på samme måde som "polstrede møbler" under "Stort brændbart". Dette gælder alle emner af glasfiber, som ikke kan genanvendes. Indholdet af containeren køres til et energianlæg, hvor delene brydes til mindre stykker for derefter at blive brændt ved ca. 1.000°C. Varmen herfra bruges til energi, mens slaggen ender på deponeringsanlæg (AffaldPlus, 2022).

1.2.3 Campingvogne i Danmark

Der findes i praksis ingen reelle skrotningsmuligheder for campingvogne og dermed ikke en skrotningsgodtgørelse, som der findes for biler. Samtidig har autoophuggere ikke interesse i campingvogne grundet den lave materialeværdi, hvilket ofte medfører, at ejerne selv skal betale for, at ophuggeren modtager den. Der er ingen særregler for ophug af campingvogne, og Miljøstyrelsen ligger derfor ikke inde med et register. I mange tilfælde ender ejerne med selv at stå for at skille campingvognen ad, inden de kan køre delene til genbrugsstationen. Anlægget, der tager imod materialet, skal dog være miljøgodkendt til at håndtere den type materiale, som campingvognen består af.

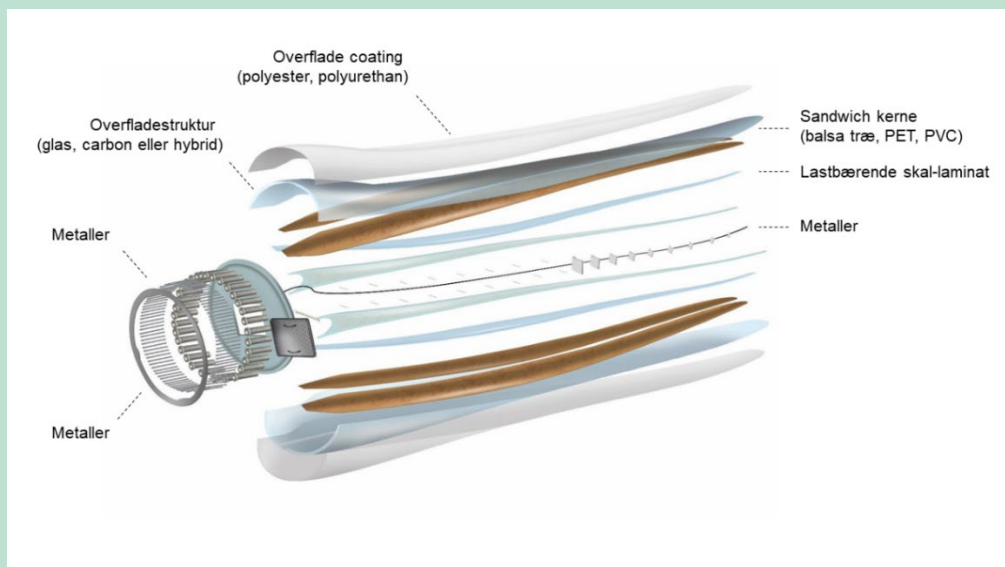
1.2.4 Bådskroge, joller, kajaker, kanoer og skibe

Glasfiberkompositter anvendes også til både, hvor selve bådskroget er af glasfiberkomposit. Affaldsfraktionen minder i materialeforhold om vindmøllevingerne. F.eks. ved brug af håndop-lægningsteknik kan kompositterne fremstilles med en resin-metode kaldet epoxy/E-glass, woven prepreg, biaxial lay-up. Denne metode anvendes typisk ved produktion af bådskrog, såvel lystfartøjer som kommercielle skibe. Materialematrixen er typisk varierende mellem 30-40 procent resin og 60-70 procent glasfiber (Ansys Granta Edupack, 2021).

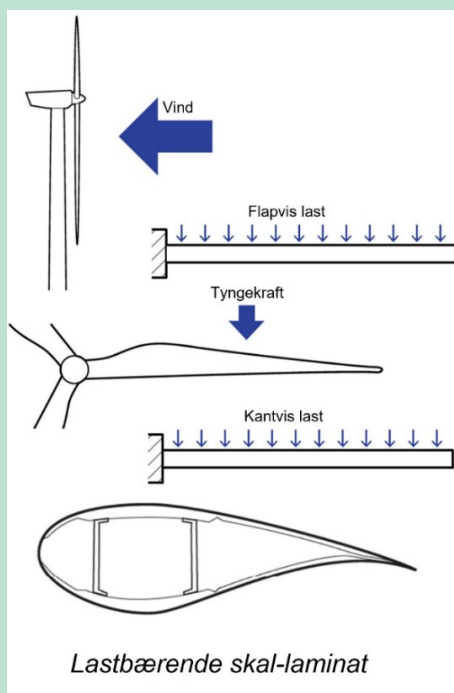
1.3 Vindmøllevinger og møllehuse

Et vindmølle design består af fire store hovedkomponenter: fundament, tårn, møllehus (som kaldes en nacelle) og rotoren, som oftest består af tre vindmøllevinger, som er monteret på en rotoraksel, som er monteret på nacellen. Vindmøllevingers kompositmateriale består primært af glasfibre, som bindes sammen af et matrixmateriale (en hærdeplast som bindemiddel) – hvilket f.eks. kunne være polyester resin eller en epoxy resin. Glasfibre har høj brudstyrke, er varmeresistent, optager ikke fugt, er ikke-elektrisk ledende foruden at det er modstandsdygtigt overfor de fleste kemikalier (Vaughan, 1998). Alle disse egenskaber gør glasfibre fordelagtige at anvende i kompositmaterialer til vindmøllevinger. Kompositmaterialerne i vindmøllevinger og møllehuset består af glasfibre og resin i sandwichlag. Det procentvise forhold mellem glasfibre (ofte kaldet "long glass fiber") varierer mellem 65-70 vægtprocent glasfibre og 30-35 vægtprocent resin (mens forholdet målt i volumen er 55-60 procent glasfiber). Glasfiberen, der anvendes til vingekompositter, er for det meste produceret af E-glas, men kan også være produceret af S- og R-glas. E-glas er baseret på aluminiumborosilikat og har gode egenskaber med hensyn til elektrisk isolering, S-glas er baseret på magnesium-aluminiumsilicat, der har højere fysisk styrke og R-glas anvendes ofte til produktion af alkaliresistente fibre til forstærkning af cement (Eker, Akdogan, & Vardar, 2006). Vingerne er den dyreste komponent på en vindmølle. Et typisk vingedesign, se Figur 2, er superoptimeret gennem tid med aerodynamisk design. Fibrene er typisk placeret biaxialt i materialematrixen (to akser, som i et koordinatsystem) for at opnå et materiale med retningsafhængige egenskaber. I vindmøllevinger er der mere belastning (og dermed også større bøjning) i længderetningen. Se Figur 3 for illustration

af en vindmøllevinges anatomi, og hvor vindbelastningen er illustreret med blå pilemarkører. Der er ofte flere fibre i vingens længderetning, hvor vindbelastningen er størst. Men også det kan variere mellem model og producent. Den højeste styrke opnås med flest fibre og det lavest mulige resin indhold. Mængden af glasfiber må dog ikke blive så høj, at der er områder i kompositten, hvor der ikke er resin imellem fibre (Hinge, 2022).



FIGUR 2. Materialestruktur på en typisk vindmøllevinge. Kilde: LM Wind Power, 2022.



FIGUR 3. Anatomi af en vindmøllevinge. Kilde: Bladerna – KIRTXTHOMSEN (2019).

1.4 Livscyklusanalyser for vindmøller

Ser man på hele møllen, er der over tid lavet flere livscyklusanalyser (LCA'er) på tilbagebetalingstiden for forskellige modeller af vindmøller. For en god ordens skyld skal det nævnes, at

levetiden for vindmøller behandles senere i nuværende rapport. Men for den sammenlignelige analyse, som rapporten refererer til, er LCA'erne oftest lavet ud fra en designlevetid på 20 år. Uafhængige LCA-analyser for to modeller af 2 MW viser, at møllerne har indtjent den energi og det CO₂ aftryk, som de har kostet i materialeforbrug, efter et sted mellem 5 og 6,4 måneder (Haapala and Prempeeda, 2014). For landmøller med 2,3 MW og 3,2 MW og havmøller med 4,0 og 6,0 MW er tallet cirka 7-12 måneder (Bonou Laurent and Olsen, 2016). Resultaterne varierer lidt i forhold til størrelse, model og transportsценarie. Det er primært udvinding af jern og produktion af stålkomponenter, som vægter tungest (f.eks. i tårnet). Stålkomponenter genbruges eller omsmeltes til genanvendelse. Ses der på hele møllen, så er det vigtigt at understrege, at mere end 85 procent af hele møllen genbruges eller materialerne omsmeltes til genanvendelse.

Tabel 1 er oversat til dansk fra Rajaei & Tinjum (2013) og bygger på materialedata i vægt fra en Vestas V90 turbine. Denne model var en meget populær vindmøllemodel opsat i 2000 og tjener som et repræsentativt eksempel - også på materialeforholdene.

TABEL 1. Vestas V90 vindmølle med data fra Ecoinvent V.2 database.

Komponent	Materialetype	Design vægt (kg)	kg CO ₂ -ækvivalent/kg	MJ/kg
Tårn	Stål	155.000	1,71	20,45
Nav	Støbejern	18.000	1,47	8,57
Nacelle	Glasfiberforstærket plast/epoxy	1.300	8,72/6,66	43,16/45,52
	Stål	18.100	1,71	20,45
Rotorvinger	Glasfiberforstærket plast/epoxy	20.250	8,72/6,66	43,16/45,52
Hovedaksel	Højkvalitetsstål (stål)	4.210	1,71	20,45
Fundament	Beton	694.400	0,76	0,033
	Stål	23.000	1,71	20,45
Gearkasse	Stål	14.700	1,71	20,45
	Kobber	150	1,83	5,87
	Aluminium	150	11,43	34,04
Generator	Stål	7.210	1,71	20,45
	Kobber	890	1,834	5,87

Der findes adskillige sammensætninger af kompositter og adskillige typer af resiner (hærdeplast), som kan ses i henholdsvis Tabel 2 og Tabel 3. I Tabel 2 ses blandt andet, at der også anvendes kulfibre i vindmøllevinger (Hill & Norton, 2018), ligesom de findes i køretøjer.

TABEL 2. Livscyklusanalyseedata for glas- og kulfiberkompositter

Kilde: Tabel er oversat fra LCA database DACOMAT af Hill & Norton (2018).

Komposit	Energi (MJ/kg)	Klimaaftryk (kg CO ₂ -ækvivalent/kg)	Referencer
Kulfiber – Epoxy	200	11,2	Rydh and Sun (2005)
Kulfiber – Epoxy		26,7-34,5	(Bachmann, Hidalgo, & Bricout, 2017)
Kulfiber – Epoxy	315,0	10,10	(Kara & Manmek, 2009)
Glasfiber – Polyethylen	169,69		Song et al. (2009)
Glasfiber – Umættet polyester	11,0	1,11	(Kara & Manmek, 2009)
Glasfiber – Polyethylen	12,0	0,60	(Kara & Manmek, 2009)
Glasfiber – Polyethylen + Vinylester	26,1	0,79	(Kara & Manmek, 2009)
Glasfiber – Vinylester	26,0	1,23	(Kara & Manmek, 2009)
Glasfiber – Vinylester	14,0	0,57	(Kara & Manmek, 2009)
Glasfiber – Polyethylen – SMC (køretøjer)		1,99	(Witik, Payet, Michaud, Ludwig, & Månson, 2011)
Kulfiber – SRIM (køretøjer)		48,06	(Witik, Payet, Michaud, Ludwig, & Månson, 2011)

NB: CO₂-ækvivalenter for kompositten vil afhænge af fiberprocent og hærde type. De er vejledende og giver et indtryk af, at en resin – en hærdeplast kommer i mange forskellige variationer og kombinationer.

TABEL 3. Livscyklusanalyseedata for polyester og epoxy resiner (hærdeplast-typer).

Kilde: Tabel er oversat fra LCA database DACOMAT af Hill & Norton (2018).

Materiale	Energi (MJ/kg)	Klimaaftryk (kg CO ₂ -ækvivalent/kg)	Referencer
Umættet polyester	62,8		(Suzuki & Takahashi, 2005)
Umættet polyester	63-78		(Song, Youn, & Gutowski, 2009)
Umættet polyester	87,8	3,79	EuCIA (2014)*
Bisphenol-A	120-140	5,3-6,2	Ecoinvent
Epoxy	140,71	5,9	Joshi et al. (2004)*
Epoxy	76,0		(Suzuki & Takahashi, 2005)
Epoxy	77,4		(US DoE, 2016))
Epoxy	76-80		(Song, Youn, & Gutowski, 2009)
Epoxy	137,1	5,7	(Rankine, Chick, & Harrison, 2006)
EP Curling Agent-Ethylenediamine	124,6	6,3	EuCIA (2014)*
EP Curling Agent-Ethylenediamine	78,2	2,7	EuCIA (2014)*

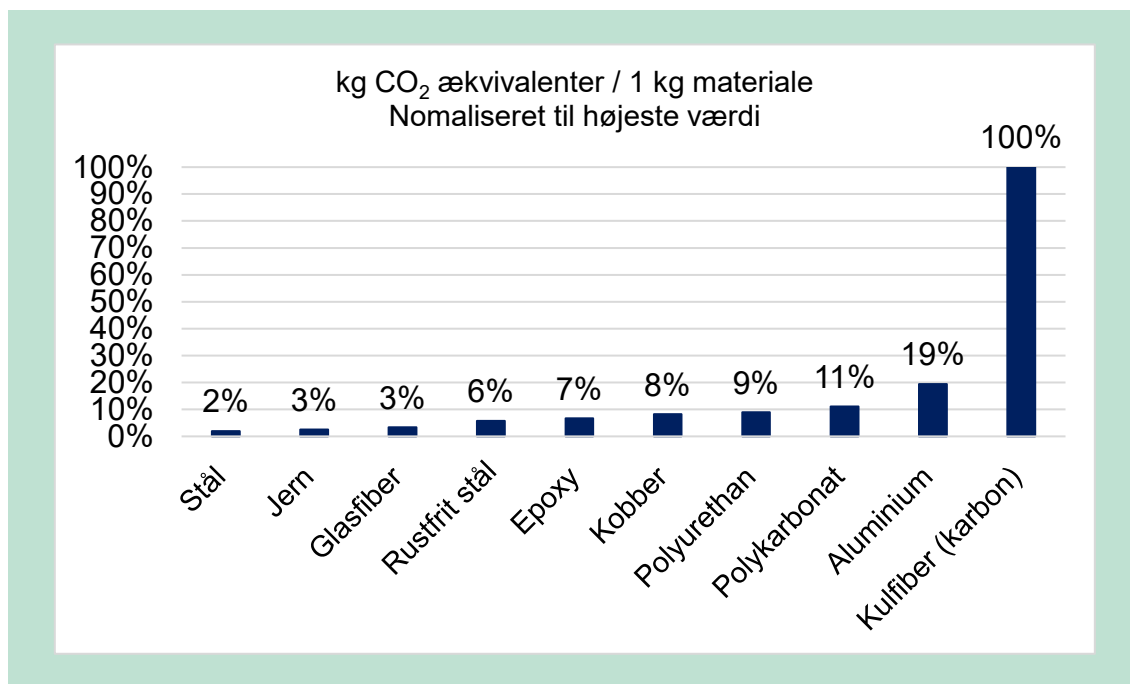
*Joshi et. al (2004) og EuCIA (2014) referencer, som Hill & Norton (2018) har med, synes ikke at være tilgængelig længere.

Når man ser på nogle af de mere avanceret genanvendelsesprocesser, som f.eks. pyrolyse og solvolyse, der er mere afprøvet og lovende på genvinding af kulfiber end glasfiberkompositter (Bax & Company, 2019) (behandlingsprocesserne gennemgås i kapitel 4), så åbner der sig naturligt en diskussion om kulfibre er at foretrække frem for glasfibre i vindmøllevinger. Både

på grund af en højere kilopris, højere genanvendelsesværdi (dvs. som recyklat, genvunden fra affald) end glasfiber, og at de er stærkere og lettere. Der er også mindre mængder (målt i kilogram) af stål, jern og polyurethan. Glasfiber er den komponent, der indgår mest af i en vinge med en relativ lav CO₂-ækvivalent. Tallene er taget med for at give baggrundsinformation for valg af materialer i de industrielle produkter og variationen i de kompositmaterialer, som en affaldsstrøm vil bestå af.

Figur 4 sammenligner kg CO₂ ækvivalenter per 1 kg materiale, som normaliseret til højeste værdi (kulfiber), og viser en indikator for materialers klimaaftryk. Figur 4 viser, at kulfiber har den højeste CO₂-ækvivalent (og dermed højest klimaaftryk, målt i CO₂ ækvivalent), og er i nuværende den komponent, der indgår mindst af i en møllevinge.

Tabel 4 viser CO₂-ækvivalenterne, som indgår i Figur 4, hvor de ikke er normaliseret.



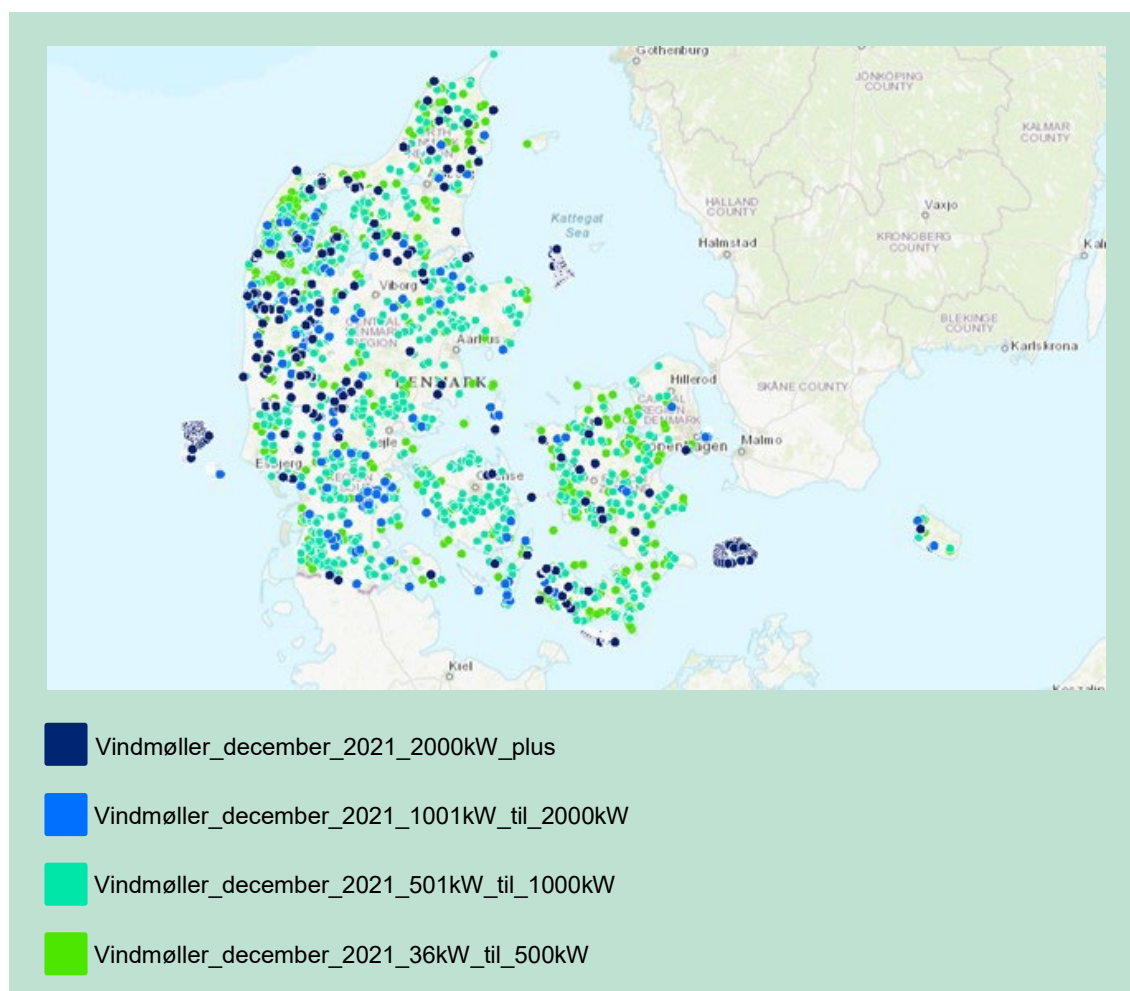
FIGUR 4. Materialer for sammenligning af CO₂-aftryk, Normaliseret til højeste værdi, Kilde: Ecoinvent database (2022).

TABEL 4. CO₂-ækvivalent per 1 kg materiale for at indikere materialernes klimaaftryk. Kilde: Ecoinvent database (2022).

Materiale	Kg CO ₂ -ækvivalent / Kg materiale	Reference: Ecoinvent database 2022
Stål	1,4	Ecoinvent v2.2 & v.3.8
Jern	1,8	Ecoinvent v2.2 & v.3.8
Glasfiber	2,4	Ecoinvent v2.2 & v.3.8
Rustfrit stål	4,1	Ecoinvent v2.2 & v.3.8
Epoxy	4,8	Ecoinvent v2.2 & v.3.8
Kobber	5,8	Ecoinvent v2.2 & v.3.8
Polyurethan	6,3	Ecoinvent v2.2 & v.3.8
Polykarbonat	7,9	Ecoinvent v2.2 & v.3.8
Aluminium	13,8	Ecoinvent v2.2 & v.3.8
Kulfiber (karbon)	71,0	Ecoinvent v2.2 & v.3.8 - er modificeret til at ekskludere fremstilling og ABS via OpenLCA database 2022

2. Kortlægning af kompositaffald fra vindmøllevinger og møllehuse i Danmark 2022-2052

Dette kapitel præsenterer et estimat over glasfiberkompositaffald fra vindmøllevinger. Estimatet er baseret på en oversigt fra Energistyrelsen over de vindmøller, som per 2022-opgørelsen er tilsluttet elnettet, samt deres kapacitet i kW.



FIGUR 5. Vindmøller i Danmark. Kilde: Energistyrelsen 2022.

Figur 5 viser et kort over vindmøller i Danmark. Farveskalaen angiver størrelsen på møllerne opgivet i kW (fra lys til mørk), hvoraf de mørkeblå er de største møller.

Der findes ikke et register over, hvad der sker med vindmøllerne når de er blevet nedtaget. Hverken Miljøstyrelsen eller brancheforeningen har et register over, hvad der sker med møller, vindmøllevinger eller møllehuse, som alle består af glasfiberkompositter. Kun når det gælder landmøller, skal man søge om nedrivningstilladelse i den kommune, hvor de er opstillet. Indtil nu har kommunerne behandlet få nedrivningstilladelser i forhold til, hvor mange vindmøller, der ifølge Energistyrelsens data, er blevet afmeldt elnettet.

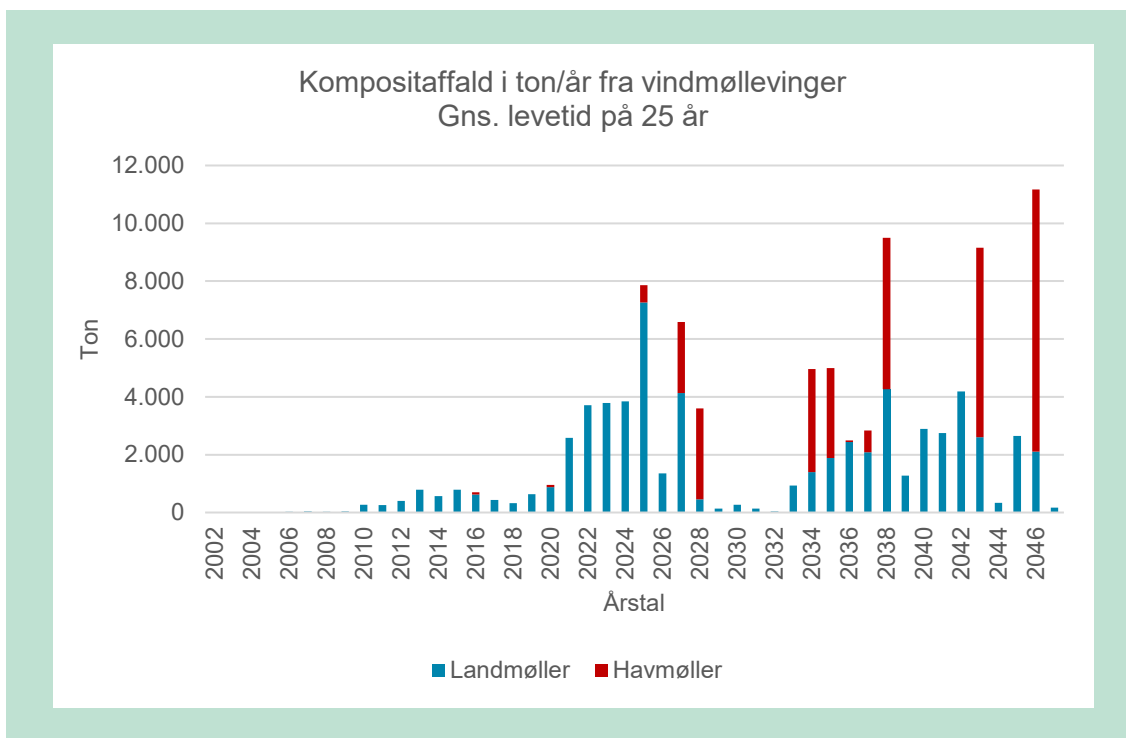
Lolland Kommune har, ud af 166 afmeldte vindmøller, kun givet 5 tilladelser til nedrivning af vindmøller, og i kommunen ligger der et deponeringsanlæg med gamle vindmøllevinger. Renovationselskabet REFA på Lolland-Falster har modtaget vindmøllevinger, som er deponeret, senest modtog de i 2020 omkring 250 ton vingeaflald (DR, 2020). Aalborg Kommune har ligeledes kun givet 5 tilladelser ud af 129 vindmøller, som er afmeldt (Ingeniøren, 2020a). I Vesthimmerlands Kommune er der afmeldt 170 møller og kun givet 28 tilladelser til nedrivning (Ingeniøren, 2020b). Der er tale om landbaseret vindmøller, men hvor mange vindmøller, en tilladelse indeholder, oplyses ikke. I nedrivningstilladelserne fra kommunerne skal vindmølle-ejeren ikke redegøre for, hvordan de præcist planlægger at skaffe sig af med affaldet, men i flere tilfælde har kommuner anbefalet ejeren at deponere det affald, der ikke kan genanvendes (Ingeniøren, 2020b). I Reno-Nord (tidl. Rærup Kontrollerede Losseplads) ved Aalborg ligger et deponeringslager, som blandt andet indeholder rotordele fra Vindeby havmøllepark. Men også virksomheden HJHansen Recycling Group, som har specialiseret sig i nedtagning og håndtering af vindmøllevinger, har modtaget en større kasseret testvinge, som blev skåret op og lagt i samme deponeringsanlæg. Denne testvinge vejede 30 ton ved modtagelse og 29 ton efter opskæring (Ingeniøren, 2020b).

Når det gælder nedrivningstilladelser til havvindmøller, udarbejdes en nedrivningsrapport gennem Energistyrelsen. Der vil samtidig være affald fra produktion i Danmark. Dette opbevares under kontrollerede forhold hos producenterne, eller sendes til genvinding, hvorfor det må forventes at mængderne og affaldstyperne vil kunne oplyses.

2.1 Affaldsstrømme hænger sammen med faktisk levetid på møllerne

Designlevetiden på vindmøllervinger er som udgangspunkt 20 år ved et givent lastscenarie. Men der er ingen møller, der egentlig udsættes for det lastscenarie, som vingen designes efter, hvilket blandt andet er 50 og 100 års storme. Derfor holder møllerne og de tilhørende vinger ofte i meget længere tid end designlevetiden på 20 år (Poulsen, 2022). Men tager man udgangspunkt i et 25 års scenarie som en gennemsnitlig designlevetid for vindmøller, kan man danne sig et basisscenarie over affaldsmængder fra vindmøllevinger.

Mængden af forventet kompositaffald er beregnet ud fra en formel, som indarbejder størrelse/længde af vingerne ud fra opstillings år, om der er tale om land- eller havvindmøller, og hvor de er tilsluttet elnettet. For landmøller estimeres der at være 7 ton vingemateriale pr. MW for møller opsat fra 1977 og frem til 1984. 10 ton vingemateriale pr. MW for årene 1985-1993 og 12 ton pr MW fra 1994 og herefter. Samme beregningsmetode blev anvendt af Vindmølleindustrien i 2012 til et estimat over forventet vingeaflald frem til 2020. Men, særligt havvindmøller er langt større end man forstillede sig i 2012. For havvindmøller estimeres der at være 15 ton vingemateriale per MW fra 2000 og frem til opstillingsåret 2022. Beregningsmetoden for kompositaffald per MW kan være lavt sat, for særligt de nyere vindmøller (land- og havvindmøller). Med årene er vingerne blevet længere og tungere på grund af nødvendige forstærkninger, i takt med at vindmøllerne bliver mere energieffektive. Fremskrivningen i Figur 6 viser prognose (I) for glasfiberkompositaffald fra vindmøllevinger i Danmark (basisscenariet) med en gennemsnitlige levetid på 25 år. I følge prognosen vil der være et hul i mængden af kompositaffald fra vindmøllevinger, f.eks. i årene fra 2029 til 2033, hvilket skyldes, at der i en årrække for 25 år siden ikke blev opstillet vindmølleparker.

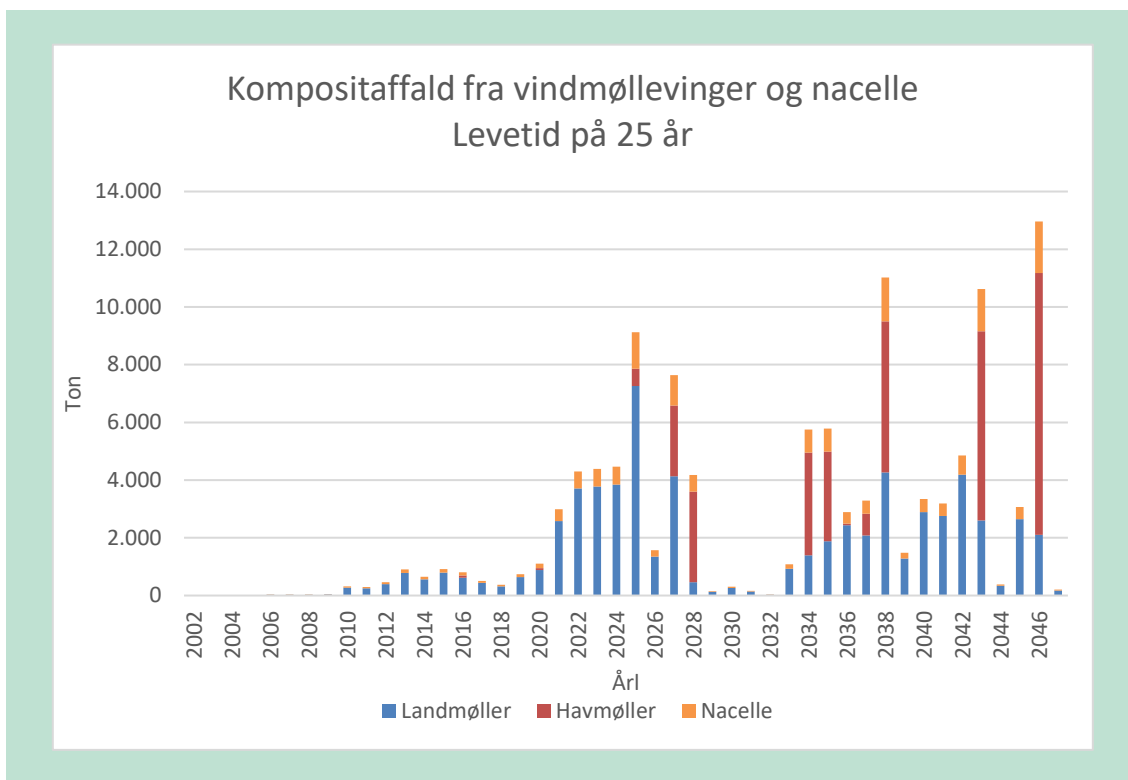


FIGUR 6. Prognose (I) for vingeffald i ton/år, for land- og havvindmøller, gennemsnitlig levetid på 25 år. Kilde: Ricard, 2023

2.2 Kortlægning af potentielt kompositaffald fra vindmøllevinger og møllehuse

Der er i prognose (II) i figur 7 medregnet møllehuset (nacellen) i affaldsmængderne. Møllehuset er af samme materiale som møllevingerne. Det er beregnet ud fra størrelsesforholdet mellem de tre rotorvinger og møllehusets skal, som ses i Tabel 1 med materialeliste i vægt for Vestas V90 (samme beregningsmetode er foretaget ud fra en 2MW og en 6MW Siemens Gamesa), hvormed der tillægges 16 procent til affaldsmængderne i forhold til de tre vindmøllevingers affaldsmængder (baseret på vægt). Estimat på de 16 procent (oveni) for møllehus er bekræftet af Jonas Pagh Jensen, Siemens Gamesa (Jensen, 2022).

Det anvendte datagrundlag er levende data fra Energistyrelsen, som kan ændre sig – og udkommer én gang om året. Datagrundlaget er for 2022. Vindmøller kan tages ned tidligere end de 20-25 år, f.eks. hvis vindmøllejerne har økonomisk incitament til at skifte de gamle møller ud med nyere, højere og mere indtjeningsgivende møller. Men de kan også stå længere end de 20-25 år. Landmøller er ofte opstillet steder, hvor vindlasten er mindre end det, som de er designet til, og med servicering holder de længere end traditionel designlevetiden på 20 år. Det vides ikke, hvornår vindmøllerne tages ned. For landmøller er der ikke en udløbsdato på den opførelsetilladelse, som er givet, mens for havmøller kommer det an på, hvilket udbud man har været en del af. Udbudsbetingelserne har ændret sig med tiden. F.eks. Horns Rev 3 (2019) og Kriegers Flak (2021) har 25 år, hvorefter tilladelsen kan forlænges efter ansøgning. Thor (2027) har en 30 års tilladelse, og der kan gives en forlængelse på 5 år én gang. For åben dør-havvindmøllerne, der stilles op uden for de statslige udbud, er reglerne også 25 år med mulighed for forlængelse (Green Power Denmark, 2022). Der er dertil forskel på om de nedtages løbende eller om kompositmængderne vil komme på én gang. Når havmølleparker afmeldes for nedtagning, kræver det leje af specialskibe med kraner og de vil derfor blive taget ned samlet på én gang, hvormed affaldsmængderne kommer på én gang. Anderledes er det for landmøller, som oftest nedtages én ad gangen.



FIGUR 7. Prognose (II) Kompositaffald for vingeaffald og møllehuse (nacelle) i ton/år, levetid 25 år, Ricard, 2023.

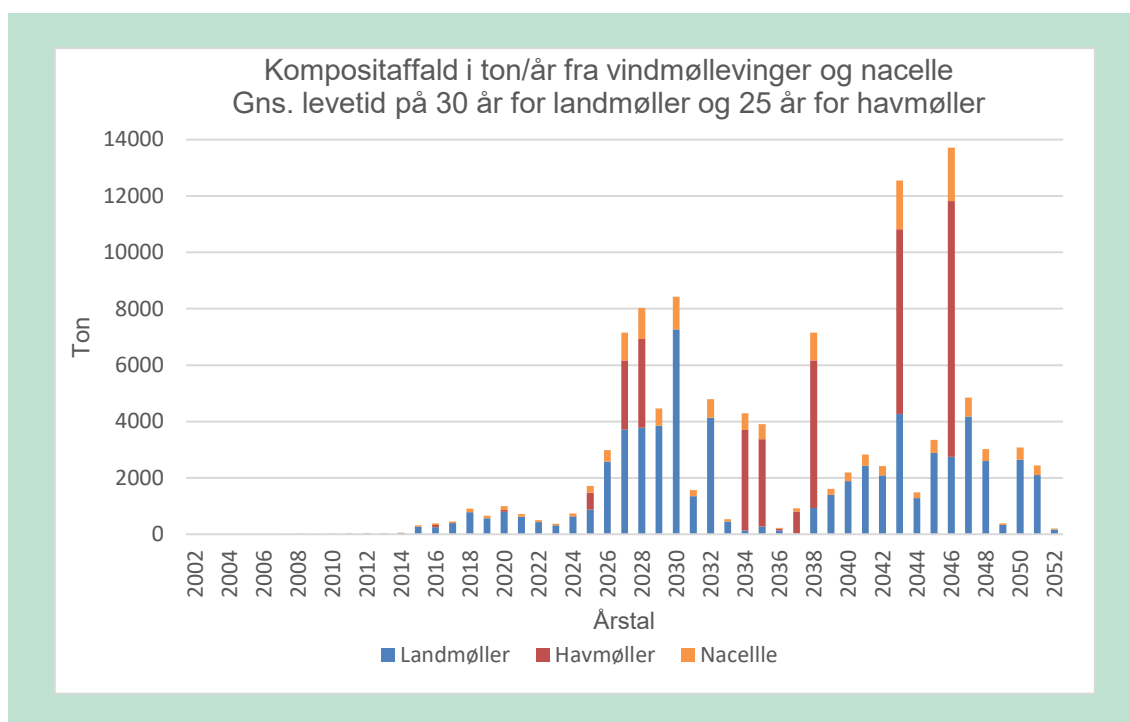
2.2.1 Levetidsforlængende scenario for landmøller

Data, som danner basis for prognoser, er udtræk i 2022 fra Energistyrelsens levende stamdata over Danmarks vindenergianlæg. Der udkommer opdateret stamdata hvert år. I 2020 opdaterede Energistyrelsen forudsætningerne for den årlige basisfremskrivning og analyseforudsætningerne til Energinet om forventet levetid for eksisterende vindmøller på land. Opdateringen var delvist baseret på konsulentrapporten "Driftsomkostninger for ældre vindmøller" udarbejdet af EMD International A/S for Energistyrelsen. Tidligere blev der regnet med en gennemsnitlig levetid på ca. 28 år for landmøller opstillet til og med 2007 og 25 år for møller opstillet fra 2008. Levetiden afhænger nu af møllestørrelse og placering og ligger inden for et bredt spænd på 25-40 år afhængig af servicering, vedligeholdelse og levetidsforlængelse (Energistyrelsen, 2022). Energistyrelsen fremhæver selv at denne fremskrivning er behæftet med stor usikkerhed, blandt andet fordi landmøller nedtages for at gøre plads til nye projekter. I det følgende vises en fremskrivning på levetiden for de eksisterende landmøller (30 år). Estimerer på, hvornår vindmøller nedtages er beregnet ud fra Energistyrelsens oplysninger om, at visse landmøller opstillet efter 2008 forventes at kunne have for en længere levetid end designlevetiden (normalt på 20-25 år).

I praksis er det svært at vide præcis, hvornår affaldsmængden fra vindmølleparkerne kommer, hvilket der er flere grunde til. For det første er der noget med incitamenter for at nedtage og udskifte til mere energieffektive møller. I 2019/2020 startede debatten om nedtagning, da elpriserne var lave, og mere rentable møller var en mulighed. Men incitamenterne for store projektudviklere og små vindmølleejere er ret forskellige. De ældre møller er i høj grad ejet af private, som har sat f.eks. 1-3 møller op - og de vil have nogle andre incitamenter til at tage dem ned eller lade dem køre. Det er f.eks. sværere at lånefinansiere til vindmøllerne, når elprisen er lav. Det har vist sig, at ustabile forsyningskæder og høje elpriser har udskudt nedtagningen og (ifølge producenter) også længere sagsbehandling med godkendelser. For det andet, så forlænges særligt landvindmøllernes levetid. I følge stamregisteret er der i dag 39 landmøller,

som er over 40 år gamle. For det tredje, sælges flere af nedtagne vindmøller videre på genbrugsmarkedet, særligt til udlandet til genopstilling eller som reservedele, som branchen oplyser (Green Power Denmark, 2022). For det fjerde er udtjente vindmøllevinger blevet udtaget til forskningsformål (dog mindre mængder), hvilket er tilfældet med nogle af vinger fra Vindeby havvindmøllepark (afmeldt i 2017), som er sendt til DTU Risø campus. De skal bruges til at teste materialernes mekaniske egenskaber og afsøge applikationsmuligheder for fiber efter årelang brugsfase, f.eks. om fibre kan bruges i møllehuset (Beauson, 2022). Alternative løsninger til deponering af vindmøllevinger omfatter både levetidsforlængelse, genbrug- og genanvendelsesteknologier.

Figur 8 viser prognose (III) med en gennemsnitlig levetid for landmøller på 30 år og på 25 år for havmøller. Heraf er møllehuset (nacellen) medtaget for både land- og havvindmøller i kompositaffaldsmængderne. Nu kunne man forestille sig et scenario, hvor vindmøller i gennemsnit lever f.eks. 35 år for landmøller og 30 år for havmøller eller mere. Blot bør man huske på at den teknologiske udvikling også indhenter de ældre møller, samt at de fremtidige vindmølleparker endnu ikke er medtaget i beregningen.



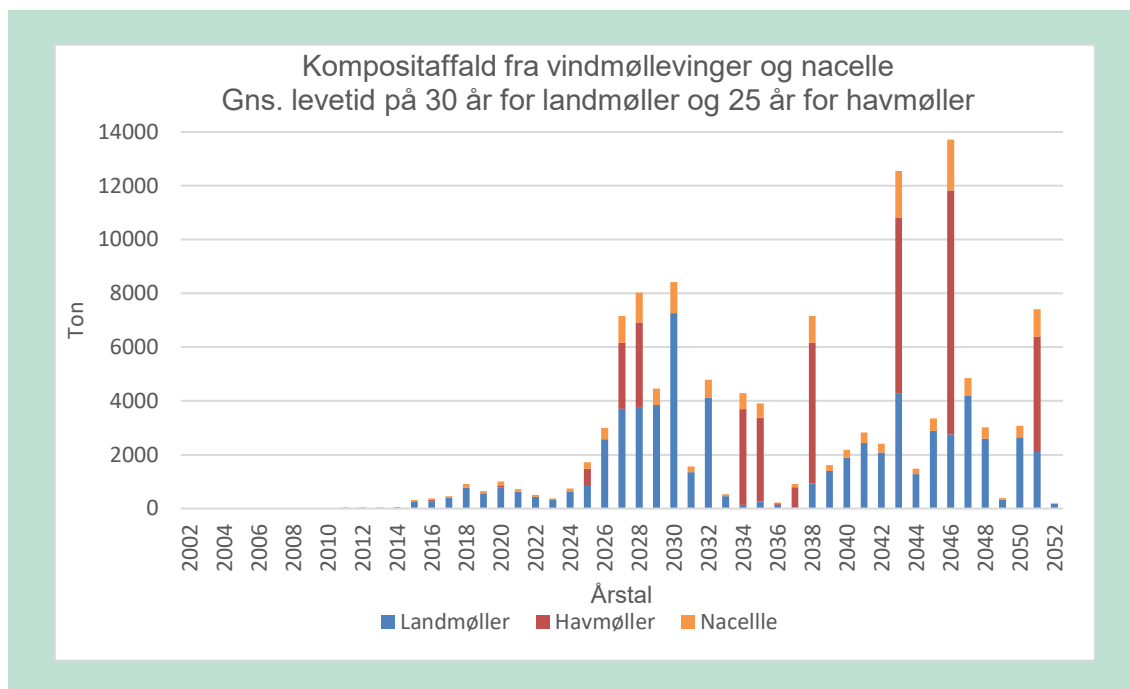
FIGUR 8. Prognose (III) Kompositaffald fra vinger og møllehuse (nacelle) i ton/år, gennemsnitlig levetid på 30 år for landmøller og 25 år for havmøller, Ricard, 2023.

2.2.2 Danmark står over for stigende mængder kompositaffald

I takt med at antallet af skrotningsmodne vindmøller stiger markant i de kommende år, kan affaldsmængderne potentielt betyde, at Danmark kommer til at deponere stigende mængder af glasfiberkompositter fra vindmøllevinger og møllehuse. Men de større volumener kan også være grundlaget for innovation og genanvendelse. Indtil nu har produktion- og serviceaffald været de største bidragydere til kompositaffald fra vindmølleindustrien, men i de kommende år nærmer flere vindmøller sig deres 20-25 års designlevetid og flere kilder har også peget på, at vindenergiindustrien bliver en væsentlig større bidragsyder til kompositaffaldsmængderne i 2029 (Liu and Barlow, 2017). Mængderne begynder at stige væsentligt i de kommende år i Danmark. Det skyldes, at opstillingen af vindmøller i Danmark begyndte at tage fart for omkring 25 år siden, og at Danmark i de næste 25 år vil skulle elektrificere samfundet og derfor opsætte langt større vindmølleparker end hidtil har set. Danmark kommer over de næste 20-30 år til at stå med potentielt mindst 105.000 ton kompositaffald fra vindmøllevinger og 16.000

ton fra møllehuse. Dvs. godt 121.000 ton kompositaffald i runde tal – alene fra eksisterende vindmøller tilsluttet elnettet i Danmark. Langt størstedelen af kilder til kompositaffald, vil komme fra havvindmølleparker.

I Figur 9 (prognose IV) indgår Aflandshage havvindmøllepark som eksempel. Parken forventes stå klar i 2026, med 26 vindmøller (Hofor, 2022), som potentielt vil indeholde 4.290 ton kompositaffald fra vindmøllevinger og 686 ton fra møllehuse (i alt ca. 5000 ton i 2051). Havvindmølleparken forventes først at blive tilsluttet elnettet i 2026 – og derfor ikke medregnet i Figur 8. Til gengæld fremgår parken af Figur 9 i år 2051.



FIGUR 9. Prognose (IV) Kompositaffald fra vinger og møllehus (nacelle) i ton/år. Eksempel med Aflandshage havmøllepark ses i 2051, Kilde: Ricard, 2023.

De illustreret prognoser (I, II, III, IV) er for de nuværende vindmøller, som er tilsluttet elnettet. Affaldsmængderne vil vokse i takt med at samfundets elektrificeres, og flere større vindmølleparker er i pipeline. Af bilag 2 fremgår prognose (V), som baserer sig på et overordnet estimat af affaldskompositter fra de fremtidige havvindmølleparker i pipeline. Der er 2 statslige udbud og 32 parker i åben-dør-ansøgninger, som giver ca. 374.00 ton. Sammenholder man mængder på de mindst 121.000 ton med nuværende vindmølleflåde, betyder det en stigning til det firdobbelte til knap 500.000 ton kompositaffald – potentielt, kan meget kan nå at ændre sig på den tid.

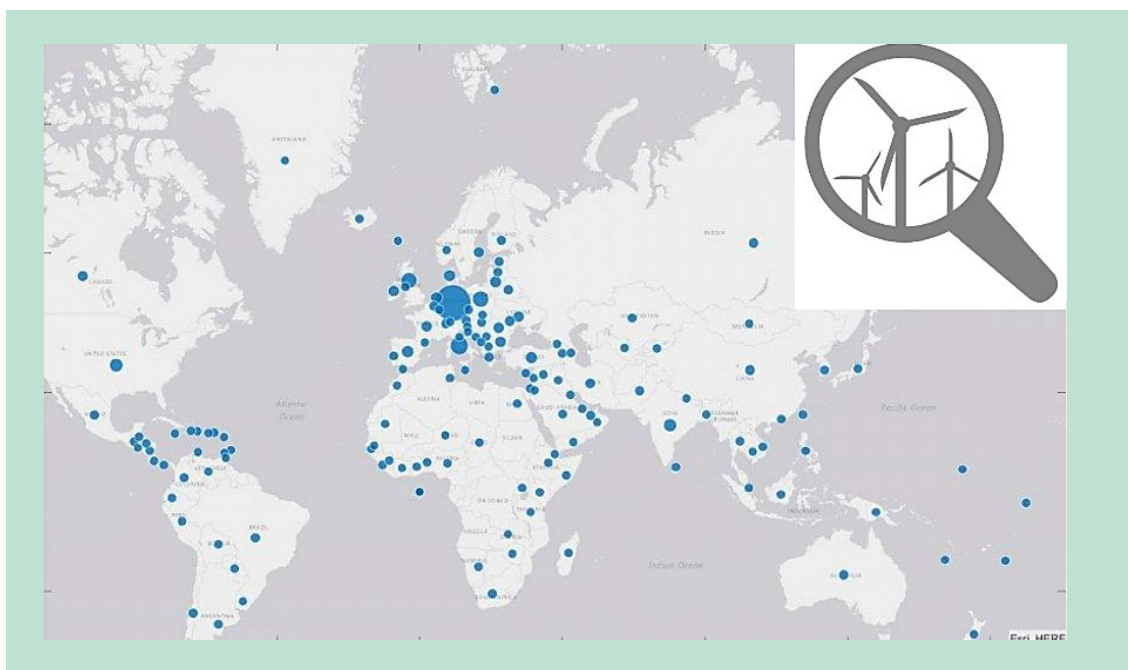
2.2.3 Hvad sker der med de øvrige vinger fra afmeldte anlæg?

Det vurderes ud fra dialog med Green Power Denmark, at størstedelen af de landvindmøller, der bliver taget ned i dag, bliver solgt videre som hele møller. Ifølge Green Power Denmark er der ikke ret mange brugte landvindmøller i omløb lige nu, for så længe det kan betale sig at reparere på landvindmøllerne, så længe kører de (Green Power Denmark, 2022). Med de høje energipriser i 2022, er der et meget lukrativt marked for at forlænge levetiden på møllerne. Set fra et cirkulært økonomiperspektiv er denne udvikling meget positiv og overflødig samtidig behovet for deponering af vindmøllevinger. Nogle vindmøllevinger sendes til et reservedelslager og andre går videre til forskningsformål og en del landvindmøller sælges videre til udlandet. Som det omtales i kapitel 6 estimerer de virksomheder, som står for nedtagning og videre salg, at det drejer sig om 50 procent i 2012. I dag (2022) oplyser de samme nedtagningsselskaber at op til 80 procent af de nedtagne vindmøller bliver videresolgt som hele vindmøller

eller at dele som f.eks. vinger lægges på et reservedelslager. Branchen forudser dog at dette tal falder fremadrettet, da mange af de ældre landmøller er tæt på at være udtjente og ikke vil kunne køre mere (Green Power Denmark, 2022).

2.3 Oversigt over globalt gensalgsmarkedet

I nærværende studie, er der kort fulgt op på det globale gensalgsmarked for vindmøller. Onlinenvirksomheden Wind-turbine.com – en webside, som formidler videresalg af brugte vindmøller – har i 2021 lavet en Google dataanalyse på, hvilke lande som køber brugte vindmøller og reservedele (Weidmann, 2021), som ses i Figur 10. På hjemmesiden wind-turbine.com forhandles brugte vindmøller fra forskellige anerkendte producenter. Vindmøllerne står specificeret efter byggeår, navhøjde, nominel effekt eller placering samt tilbehør og komponenter. De brugte vindmøller præsenteres inddelt efter nominel effekt, fra 250 kW, 500 kW, 750 kW op til 1 MW, 2 MW eller 3 MW samt fra forskellige producenter som f.eks. Vestas, Enercon, Nordex, DeWind, Bonus, Neg Micon, Tacke og Südwind. Sælgere af brugte vindmøller kan annoncere på hjemmesiden og få deres brugte vindmøller og virksomhed professionelt præsenteret. Man kan indgå som partner for wind-turbine.com og dermed annoncere et ubegrænset antal brugte vindmøller, kategoriseret efter nominel effekt, navhøjde eller placering og tilføje billeder, tekstbeskrivelser, videoer og en virksomhedsprofil. På denne måde får potentielle kunder alle nødvendige oplysninger om annoncerede vindmøller. Figur 10 viser hvorfra køber kommer. I Centraleuropa er der meget aktivitet. Det er et bredt udvalg af lande, som køber brugte vindmøller. Det er blandt andet lande som Irland, Italien, Polen og Tyskland, men også lande i Afrika og Sydamerika. USA og Indien markerer sig også med handelsaktivitet.



FIGUR 10. Oversigtskort over gensalgsmarkedet for brugte vindmøller, Kilde: Weidmann (2021)

Tabel 2 viser tallene i prognose (IV), Figur 9, fra år 2007- 2052 for at simplificere overblikket. Som eksempel på ny havmøllepark indgår Aflandshage og ses i 2051*.

TABEL 2. Kompositaffald fra vindmøllevinger og møllehuse i Danmark i ton (Figur 9).

Prognose år	Landvindmøller 30 års levetid	Havvindmøller 25 års levetid	Samlet potentielt vingeaffald	Nacelle potentielt affald
2007	0,4		0,4	0,06
2008	5,3		5,3	0,9
2009	2		2	0,3
2010	11		11	1,8
2011	25,5		25,5	4,1
2012	30,5		30,5	4,9
2013	26		26	4,1
2014	39,4		39,4	6,3
2015	272		272	43,5
2016	254	74	328	52,5
2017	396	0	396	63,3
2018	785	0	785	125,6
2019	565	0	565	90,3
2020	790	75	865	138,4
2021	620	0	620,3	99,3
2022	434	0	434	69,4
2023	321	0	321	51,4
2024	638	0	638	102
2025	879	600	1.479,1	237
2026	2.577	0	2.577	413
2027	3.710	2.460	6.170	987
2028	3.783	3.141	6.924	1.108
2029	3.847	0	3.847	616
2030	7.261	0	7.261	1.162
2031	1.350	0	1.349,5	216
2032	4.128	0	4.128	661
2033	457	0	457,4	73,2
2034	133	3.562,5	3.695,8	591,3
2035	266	3.105	3.371,3	539,4
2036	139	54	193	31
2037	34	756	790	126,4
2038	931	5.238	6.169	987
2039	1.394	0	1.394	223
2040	1.886	0	1.886	302
2041	2.434	0	2.433,5	389,4
2042	2.083	0	2.083	333
2043	4.264	6.555	10.819	1.731
2044	1.279	0	1.278,6	205
2045	2.886	0	2.886	462
2046	2.752	9.072	11.824	1.892
2047	4.183	0	4.183	669,3
2048	2.605	0	2.605	416,8
2049	334	0	334,2	53,5
2050	2.648	0	2.648	424
2051	2.103	*4.290	6.392,5	1.023
2052	173	0	173,1	28
Sum i ton	65.734	38.982,5	104.716	16.758

3. Hvor står branchen?

I vindenergiindustrien er der på europæisk plan bred enighed om, at vindmøllevinger skal indgå i en cirkulær økonomi og at deponering skal forbydes. Brancheorganisationen WindEurope arbejder for et forbud mod deponering af møllevinger efter 2025. Men der er brug for fælles lovgivning og incitamentter for at nå disse mål.

3.1 WindEurope's syn på cirkulær økonomi i møllevinger

Den europæiske vindenergiindustri's brancheorganisation WindEurope udgav i 2017 et baggrundspapir om de miljømæssige konsekvenser af vindenergi. Heri fastslog brancheorganisationen, at det er en udfordring at forbedre CO₂-aftrykket fra møllevinger, som i dag kun indeholder nyt materiale med meget begrænsede muligheder for genbrug af materialerne. Endvidere at det er nødvendigt at styrke forskningsprojekter i at udvikle nye forretningsmodeller for brugte møllevinger, dels ved at bruge makulerede kompositter som tilsætnings-/fyldmaterialer og dels ved langsigtet at finde metoder til at fremstille og genbruge hele møllevinger. Baggrundspapiret fra 2017 var brancheorganisationens respons på Europa-Kommissionens pakke om cirkulær økonomi, som blev vedtaget i 2016, som bl.a. indeholdte et reviderede lovforslag om affald for at stimulere Europas overgang til en cirkulær økonomi (WindEurope, 2017).

WindEurope udgav i 2020 et positionspapir om cirkulær økonomi i produktionen af møllevinger som fremlagde brancheorganisationens vision for vindindustriens bidrag til cirkulær økonomi (WindEurope, 2020). WindEurope vil arbejde for at udvikle bæredygtige metoder til genanvendelse af kompositmaterialer, og de går ind for et europæisk forbud mod deponering af kasse-rede møllevinger og store kompositkomponenter fra møllehuse inden 2025.

Positionspapiret nævner fire vigtige søjler for fuld genanvendelighed af kompositmaterialerne:

- Øget finansiering af forskning og udvikling, evaluering og opskalering af teknologier til genanvendelse.
- Øget anvendelse af genbrugskompositter i nye produkter.
- Øget finansiering af forskning og udvikling og anvendelse af nye, genanvendelige vingematerialer.
- Etablering af en europæisk tværsektoriel platform for alle sektorer, der genererer kompositaffald.

WindEurope's køreplan for at øge møllevingernes cirkularitet fokuserer på fire områder:

1. Implementering af deponeringsforbud.
2. Fuld genanvendelighed af vinger i fremtiden.
3. Fremtidige møllevinger skal være cirkulære.
4. Samarbejde med andre relevante sektorer.

3.1.1 WindEurope om vindenergibranchens bidrag til cirkularitet

WindEurope's positionspapir fra 2020 tager udgangspunkt i EU's nye handlingsplan for cirkulær økonomi og fremhæver, hvordan vindindustrien allerede i dag bidrager til bæredygtig energiforsyning:

- Sammenlignet med andre energikilder, som er inklusive affaldshåndtering (som ofte er forbrænding og dermed energitung), har vindenergi en af de laveste drivhusgasemissioner gennem sin livscyklus.

- Vindmøller har en designlevetid på 20-25 år, men kan nå op på 35 år gennem levetidsforlængelse som service, reparation og opgradering.
- Leverandørernes miljøaftryk indregnes i vindmøllers livscyklusvurderinger.
- Placering af vindmølleparker sker altid efter forudgående miljøkonsekvensvurderinger og dialog med lokale interessenter for at minimere påvirkninger.
- Under drift er vindmøllers direkte miljøpåvirkninger meget begrænsede.
- Ved udfasning kan mellem 85 til 90 % af vindmøllernes samlede vægt genanvendes. Det gælder fundament, tårn og komponenterne i møllehus (nacelle).

Det skal bemærkes, at 42 danske organisationer med tilknytning til vindenergibranchen er medlemmer af WindEurope (WindEurope, 2022), som herigennem har forpligtet sig til en forbud mod deponering fra 2025, hvilke fremgår af Tabel 3.

TABEL 3. Danske organisationer, som er medlem af WindEurope

Aalborg Universitet	NLMK Dansteel A/S
Avanti Wind Systems A/S	Odense Havn
Cadeler	Offshore Bornholm Center
Copenhagen Infrastructure Partners (CIP)	Ørsted Wind Power A/S
COWI A/S	Polytech
DHI	Esbjerg Havn
Danmarks Tekniske Universitet (DTU)	Aalborg Havn
DWEA - Danish Wind Export Association	Grenå Havn
EKF Denmark	Rønne Havn
EMD International A/S	Rambøll
ENABL	RelyOn Nutec
European Energy	Rohde Nielsen
Fiberline Composites A/S	SCM STS
Global Wind Organization	Semco Maritime
Green Power Denmark	Siemens Gamesa (SGRE)
Hempel	Silvasti Group
ITW WindGroup	Svendborg Brakes A/S
K2 Management	Terma Allies In Innovation
Kaya Research	USE61400-25 user group
LM Wind Power	Vestas Wind Systems A/S
Mærsk Supply Service	Wood Mackenzie Power & Renewables

3.1.2 WindEurope går ind for et fælles EU-forbud mod deponering

WindEurope betragter deponering af kasserede møllevinger som spild af værdifulde ressourcer. Deres vision er en cirkulær økonomisk tilgang, hvor kasserede møllevinger genanvendes sammen med kasserede kompositmaterialer fra andre sektorer, f.eks. marineindustri, byggeri og luftfart. WindEurope opfordrer til et europæisk deponeringsforbud inden 2025, og vil samtidig forpligte sig til at genanvende, genbruge eller genvinde 100 procent af de kasserede møllevinger. WindEurope argumenterer for, at forbuddet også bør gælde for andre store kompositkomponenter i vindmøller, f.eks. møllehuset (nacellen). Når et europæisk deponeringsforbud

er vedtaget i 2025, vil WindEurope også forpligte sig til ikke at sende kasserede møllevinger til deponering i andre lande. WindEurope vil udvikle et rapporteringssystem for de behandlede affaldsmængder, og som skal gøre overvågning mulig. Som en del af denne rapportering vil WindEurope undersøge, om der er behov for en ny affaldskode for vingeaaffald, eller om de eksisterende serienumre er tilstrækkelige.

3.1.3 WindEurope ønsker at genanvendelsesteknologier fremmes

WindEurope ser i øjeblikket ikke noget marked for genbrugskompositter, som kan konkurrere prismæssigt med nye materialer. Der er behov for en række incitamenter og en business-case, som kan skabe et marked for genbrugskompositter. WindEurope foreslår, at der ydes støtte til virksomheder, der vil anvende genbrugsmaterialer i deres produkter, herunder at der udvikles standarder og certificeringer for genbrugsmaterialer. En anden mulighed er at yde støtte til nye fremstillingsprocesser, hvor genbrugskompositter anvendes til produktion af nye materialer og nye kompositter til både vindenergiindustrien og andre sektorer. De ser samtidig et behov for yderligere forskning og udvikling gennem hele værdikæden for at udvikle nye højt-ydende cirkulære kompositmaterialer til vindmøller. WindEurope nævner, at vindenergiindustrien allerede arbejder på at udvikle nye materialeløsninger i f.eks. ZEBRA-projektet, som har til formål at designe og fremstille genanvendelige vindmøllevinger - og Siemens Gamesa, der fornyligt har lanceret en genanvendelige vinge (se rapportens kapitel 6 for dialog med producenterne om disse).

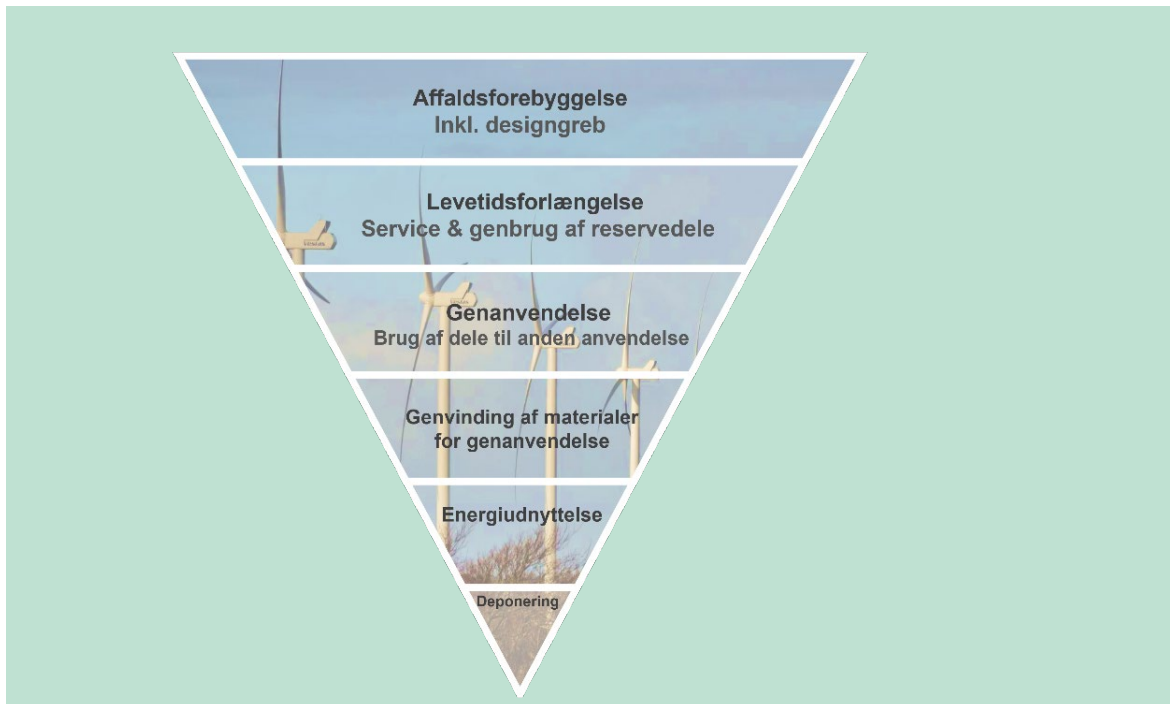
3.1.4 WindEurope ønsker EU-plattform for genbrugskompositter

Genanvendelse af kompositter er en tværsektoriel udfordring for vindenergiindustri, byggeri og konstruktion, elektronik, bilindustri, marineindustri, luftfart og producenter af tanke og rør (Jævnfør figur 1 i nærværende rapport). Derfor foreslår WindEurope, at EU etablerer en europæisk tværsektoriel platform, hvor de forskellige industrier kan dele viden inden for genanvendelse af kompositter.

4. Kortlægning af potentielle behandlingsmuligheder til genanvendelse

Oversigt over nuværende og fremtidige teknologiske løsninger til bortskaffelse, materialegenvinding eller genanvendelse af vindmøllevinger og lignende kompositter.

En fælles udfordring for alle teknologiske løsninger til genanvendelse af glasfiberforstærkede kompositmaterialer er, at der ikke eksisterer præcise data om materialesammensætningen i de varierende kompositmaterialer, der gennem tiden har været anvendt i møllevinger. Materialesammensætningen kan variere fra producent til producent og fra produktionsår til produktionsår, men én ting er branchen enige om – at se på de metoder, teknologier og praksisser, som dækker over hele affaldshierarkiet inklusiv genbrug og levetidsforlængelse. Men uanset metode, så vil der på et tidspunkt være affaldsmængder, som ikke kan genbruges, og derfor er det relevant at se på genanvendelses-, genvindings- og energiudnyttelsesteknologier. I Figur 11 er en model af affaldshierarkiet for affaldshåndtering af vindmøllevinger illustreret i en dansk udgave. Løsninger indenfor hvert hierarkisk trin er præsenteret, hvor det kan ses, at det højeste niveau af affaldsforebyggelse. Forebyggelse er at opbevare reservedele længere og designparametre, såsom at design for lettere demontering, for genbrug og for genanvendeligt vingedesign, samt f.eks. at minimere antallet af materialer i designfremstilling. Deponering bør der være mindst af – og langt mere nyttiggørelse af materialernes værdi. Tabel 4 redegør for begreberne anvendt i dette kapitel.



FIGUR 11. Illustration af affaldshierarki for udtjente vindmøllevinger i forbindelse med typer af behandlingsteknologier i nærværende rapport, Grafik: Ricard.

TABEL 4. Oversigt over terminologi i forbindelse med typer af behandlingsteknologier for ud-tjente vindmøllevinger.

Affaldsforebyggelse	Heri indgår designprincipper såsom at designe produkter til lettere demonte-ring, genbrug og genanvendelse, men også optimering af produktion for at minimere materialeforbrug og reducere produktionsspild. F.eks. udbedring af produktionsfejl er også et forebyggelsesgreb.
Levetidsforlængelse inkl. genbrug af hele mølle eller reservedele til eksisterende møller	Serviceer, reparér, og genbruger reservedele for levetidsforlængelse Levetidsforlængelse omfatter videresalg af hele møller, eller at vindmøllevin-ger genbruges som reservedele eller istandsættes og bruges til mindre møller for at forlænge materialernes levetid i deres eksisterende form.
Genanvendelse, re-trofit	Vindmøllevinger genanvendes til anden anvendelse - oftest af ringere værdi end det oprindelige formål. F.eks. som cykelskure, staldvægge, støjværn eller lignende.
Materialelevinding	Processer til materialelevinding foregår ofte gennem omsmelting. F.eks. Vingen oparbejdes gennem knusning, pyrolyse eller solvolyse, hvor materialerne adskilles og derefter kan bruges som råmaterialer til nye produk-ter. F.eks. til byggebranche, bilindustrien, skibsskrog, og muligvis til mølle-huse eller topdæksler.
Energiudnyttelse	Alle genbrugelige komponenter fjernes, og det resterende kompositaffald bru-ges i medforbrænding med cement. Dvs. forbrænding med energiudnyttelse af resin og glasfiber som råstoffer.
Deponering	Deponering falder ind under bortskaffelse ligesom forbrænding uden energi-udnyttelse gør. Men glasfiber er ikke et brændbart materiale og brændvær-dien for vindmøllevinger er lav og er ikke en praksis. Deponering, derimod er en mere udbredt form for bortskaffelse af vindmøllevinger.

4.1 Behandlingsteknologier og deres markedsmodenhed

I det følgende gennemgås de forskellige bortskaffelsesmetoder og behandlingsteknologier in-klusiv en vurdering af deres modenhed – ved brug af det såkaldte ”technology readiness level” (TRL). TRL er en skala, hvorpå man vurderer en teknologis markedsmodenhed. Skalaen løber fra 1 til 9, hvor TRL 1 er en observation af basic principper, ved TRL 4, så er teknologien vali-deret i et laboratorie, mens TRL 9 er det højest på skalaen, og betyder at teknologien er bevist som et faktisk system i et driftsmiljø, dvs. at teknologien er på et kommercielt stadie (EU Kommission, 2022).

TRL 1 – grundlæggende principper observeret

TRL 2 – teknologikoncept formuleret

TRL 3 – eksperimentel proof of concept

TRL 4 – teknologi valideret i laboratoriet

TRL 5 – teknologi valideret i relevant miljø (industrielt relevant miljø)

TRL 6 – teknologi demonstreret i relevant miljø (industrielt relevant miljø)

TRL 7 – demonstration af systemprototype i et driftsmiljø

TRL 8 – system komplet og kvalificeret

TRL 9 – faktisk system bevist i et driftsmiljø (konkurrencedygtig fremstilling)

Kortlægningen bygger på et mini-litteraturstudie af teknologier til genanvendelse og materiale-levinding af vindmøllevinger (Sakellariou (2017); Beasuon & Brøndsted (2016); Ramirez-Tejedaet al. (2017); Bax & Company (2019); Psomopoulos, et al., (2019)) – og fra WindEuro-pes oversigtsdokumenter. Priser på deponering er indhentet via European Environment Agency (2020), Confederation of European Waste-to-Energy Plants (CEWEP) (2021) og Statista.com (2021). En oversigt af procesteknologiers TRL, anvendelse, styrker og svagheder ses i Tabel 5.

TABEL 5. Oversigt over behandlingsteknologier til udtjente vindmøllevinger

	Proces	Anvendelse	Styrker	Svagheder og barrierer
Deponering	Deponering (TRL 9)	Ingen	Billigste praksis i EU og USA. Priser: USA = US\$ 60/ton UK = US\$ 130/ton DK = US\$ 130/ton eller 895 DKK/ton	Restriktioner for deponering Plads til deponering/optager plads Mulig frigivelse af metan og andre gasser. Dårlig signalværdi – og skubber ikke på innovationen for alternativer
	Formalet pulver (TRL 9)	Fyldstoffer Lydabsorbende paneler m.m. Høje produktionshastigheder	· Tilgængelig og moden proces Som forstærkende fyldstoffer til iblanding i industrielle kompositprodukter f.eks. målrettet byggebranchen	Det er pt. et relativt lille marked for brugte kompositmaterialer Problemer med udskillelse af støv Adskiller ikke glasfiber og resin Brugte fibre er kortere = dårligere mekaniske egenskaber end nye fibre
Co-proces	Fibrøse produkter Cement medforbrænding (TRL 9)	Kan indgå i cement fællesbehandling/medforbrænding Høje produktionshastigheder	Tilgængelig og moden proces Anvendelse af hele glasfiberkompositter i cementproduktion, indgår som råstoffer; Knust glasfiber, som alternativ til vasket sand. Resinen fungerer som brændsel i cementovnsreaktor	· Lav markedsværdi for fibre og substitueret råmateriale Og i priskonkurrence med andre affaldstyper
	Forbrænding (TRL er ikke tilgængelig)	Forbrænding uden og med energiudnyttelse - f.eks. til fjernvarme er et alternativ til deponering	Tilgængelig og moden proces Simple krav til forbehandling – Klippes/skæres i mindre stykker (f.eks. 1 x 1 m)	Forbrænding er ikke at anbefale: -udleder giftige biprodukter som dioxin fra PVC-skum glasfibre ekstrem lav brændbarhed Flyveaske fra forbrændingen skal bortskaffes eller bruges. Tab af ressourcer: 50-60% af materialet bliver tilbage i forbrændingsanlæg og blandes med øvrige rester fra anlæg i en sort slagge
Termisk proces	Pyrolyse (og forgasning) (TRL 9)	Fyldstoffer og forstærkning	Tilgængelig og moden proces for kulfiber (men ikke for glasfiber). Separation af glasfibre og matrix (polyester eller epoxy) · Homogent slutprodukt	Få udbydere på markedet og kun for kulfiber, som er lettere at afsætte · Lavt energiudbytte · Glasfiber mister 50% eller mere i trækstyrke Denne proces kræver ofte makulering af kompositten, så fibre er forholdsvis korte. En ulempe er at sizing forsvinder (beskyttelseslag), som sikrer at de binder til resinen. Sizing må genpåføres.
	Fluidiseret leje (forgasning) (TRL 5-6)	Teknologi på TRL 5-6 og for tidligt at sige	· Høj fleksibilitet · Høj energigenvinding	Urentabel pga. ringere kvalitet af glasfibre. Mulig udledning af miljøskadelige gasser. Høje investeringsomkostninger. Fluidiseret leje kræver en min. produktionskapacitet på 10.000 ton/år for at være økonomisk rentabel
Termokemisk proces	Solvolyse (TRL 5-6)	Down-cycling: Fyldstoffer og ganske lidt som forstærkning + kemikalier og resin (Kloroform, DMF; DNP)	Højt materiale output Økonomisk rentabel, afhængig af de anvendte kemikalier. Trækstyrke i glasfiber bevares muligvis. Plast kan (delvist) anvendes som nyt materiale	Fin granulering er nødvendig (brækker epoxy i stykker) Afhænger af valg af kemikalier (syre) Sizing forsvinder (må påføres igen). Lav modenhed - Høje investeringsomkostninger Dyrt & kræver anlæg i storskala.
	Superkritiske væsker (TRL n/a)	n/a	· Resin og fibre kan genvindes: trækstyrke i glasfiber bevares · potentiale for industriel skalering	· Samme barrierer som solvolyse – kræver materialevolumen for anlæg i storskala – et kontinueret flow af materialer for at blive kommercielt.

4.2 Deponering og forbrænding uden energiudnyttelse

I dag er den billigste affaldshåndtering for udtjente møllevinger deponering hvor vingerne opbevares, i princippet nedgravet indtil der findes bæredygtige alternative muligheder. Før man sender en vindmøllevinge til et deponeringsanlæg, fjernes bronzespidser, kabler, nav og de øvrige komponenter fra vindmøllevingerne, som er materiale, som kan genanvendes. Nogle EU-lande bl.a. Tyskland og Holland har forbud mod deponering af plastkompositter, blandt andet på grund af for højt indhold af organisk materiale, som kan udlede metangas (CEWEP, 2021).

Kompositmaterialer er lette og slidstærke, men de er særdeles vanskelige at nedbryde og genanvende. Resin-indholdet kan forbrændes, men glasfibrene brænder ikke godt, hvilket gør det vanskeligt at bortskaffe kompositaffald ved forbrænding. Efter forbrænding i et affaldsanlæg vil glasfibrene være tilbage i en sammensmeltet masse. Forbrændingsprocessen kan beskadige forbrændingsanlægget ved at tilstoppe filtrene, og den ikke-brændbare masse (glasfibre) bliver tilbage i en sort slagge, der indeholder forbrændingsanlæggets øvrige rester (fra øvrigt affald) i opkoncentreret form bl.a. tungmetaller, en rest som formentlig må deponeres eller bortskaffes på anden vis.

Af disse grunde er det *ikke* en god løsning at brænde vindmøllevinger i affaldsforbrændingsanlæg. Som Lektor i Kemi, Plast og Polymeringeniør Mogens Hinge, Aarhus Universitet forklarer: "Det man skal huske - og det er en meget vigtig pointe - det er, at når man kigger på glasfiberforstærkede epoxy-systemer, så taler man ofte om volumenfraktionerne, og de ligger på 55-60 procent glasfiber. Problemet er, at når du kigger på ton materiale (masse), så bliver du nødt til at ændre din opfattelse af det, fordi densiteten af glasfiber er så meget højere, end den er for resinen. Den er 2/3-dele og det vil sige, at når du kigger på brændværdien for ton materiale, så er den ekstremt lav. Man skal ikke tænke på det her som resin med lidt glasfiber i, man tænke på det her som meget tæt-pakkede glasfibre, hvor der er brugt resin til at lime dem sammen. Og det gør faktisk at brændværdien er ret lav." (Hinge, 2022).

4.3 Mekanisk nedbrydning (genanvendelse)

I en mekanisk nedbrydningsproces opskæres udtjente vindmøllevinger i mindre sektioner for billigst muligt at transportere dem fra nedtagelsessted til det næste behandlingssted. Det gælder for alle genanvendelse/bortskaffelsesmetoder. Større vindmøllevinger (længde og bredde) vil kræve flere "snit" for at neddele vindmøllevingen i transportvenlige sektioner. Der ligger en udfordring i at foretage neddelingen så kosteffektivt som muligt. Det kræver kraftigt specialudstyr at håndtere vingerne, blandt andet fordi de er hårde at skære i, og man skal opsamle støvet fra processen. Derfor er der tale om en lidt vanskelig og dyr proces – også i transport.

4.4 Termiske processer (forbrænding)

Fiberkompositter kan brændes, men for vindmøllevinger er brændværdien ekstremt lav, da densiteten af glasfiber er 2/3, mens resinen er 1/3. Desuden kan glasfiber i røggassen skade gasrensningssystemet (filtre) og røggassen indeholder sundhedsfarlige polyaromatiske kulbrinter. Endelig vil man stå tilbage med store mængder aske, som også skal bortskaffes eller genanvendes (Brøndsted og Beauson, 2016). En central ulempe er, at de ikke-brændbare glasfibre havner i en restfraktion sammen med de øvrige opkoncentreret rester fra affaldsforbrændingsanlæggene, som vil indeholde uønsket tungmetaller fra anlægsovn (Hinge, 2022). Lokal lovgivning vil som regel forbyde brugen af denne type slagge som fyldmateriale og den må bortskaffes på anden vis (dvs. at slaggen højst sandsynligt sendes til deponering).

4.5 Medforbrænding i cement (energiudnyttelse og substitut)

Granuleret kompositaffald kan anvendes som brændsel i cement medforbrænding og glasfibre-egenskaber kan substituere sand. Denne behandlingsmetode er kendt under den engelske betegnelse "co-processering" med cement.

Processen kan bruges såfremt cementfabrikken er forberedt til at håndtere alternativt brændsel. Det er en metode, hvor granuleret glasfiberkompositaffald indgår som råmateriale i en cementovnsreaktor. EUCIA, Cefic (European Chemical Industry Council) og WindEurope har skabt en tværsektoriel platform for at fremme nye tilgange til genanvendelse af vindmøllevinger, heraf vurderer de, at det vil skabe en CO₂-besparelse på 16 procent i cementproduktionen, hvis glasfiberkompositter repræsenterer 75 procent af råstofferne i cementproduktionen (Cefic - WindEurope - EuCIA, 2020). Forklaringen er, at resinen optimerer brændstofforbruget, som et alternativt brændstof, der erstatter kul, petroleumskoks, brændselsolie eller naturgas. Ved en temperatur på omkring 900 °C brænder resinen og omdanner glasfibrene til aske. Disse asker går derefter sammen med resten af de brændte råmaterialer (normalt en blanding af kalksten og ler) i cementovens sintringszone for at fremstille cementklinker (ved 1500 °C). Til sidst formales klinkerne til et fint pulver sammen med en lille mængde gips, der danner det endelige produkt, cement. I modsætning til forbrændingsanlæg, vil medforbrænding med cement ikke resultere i dannelse af slagger, som skal bortskaffes på anden vis. Medforbrænding med cement har den fordel at hele vingeffaldet bruges og giver alternative råmaterialer til cementproduktion, hvilket potentielt reducerer behovet for indhentning af sand og transport herfra (som dog erstattes af transport fra vindmøllevingerne).

4.6 Pyrolyse (genvinding/omsmeltning for at genanvende)

Pyrolyse gør det muligt at adskille glasfibre fra resinen ved at udsætte vingematerialet for høje temperaturer mellem cirka 500-600 °C i en iltfri atmosfære, indtil resinen omdannes til væske eller går på gasform og fritlægger glasfibrene. Inden forgasningen skal råmaterialerne nedskæres til stykker på cirka 25x25 cm. Væsken kan bruges som brændstof eller i den kemiske industri. Gassen kan bruges til opvarmning eller fremstilling af elektricitet. De fritlagte glasfibre sorteres til brug som isoleringsmateriale eller fiberforstærkning til nye plastprodukter. Efter pyrolysen har fibrene mistet mere end 50 procent af deres oprindelige styrke, mens fibrenes stivhed - elasticitetsmodul - muligvis er intakt. Der kan muligvis frigives polyaromatiske kulbrinter i processen, som i daglig tale er PAH- forbindelser. De findes i en række fossile brændsler, og frigives ved forbrænding af de fleste materialer - dog i lavere koncentrationer (stoffet er kendt for at være kræftfremkaldende, særligt i forbindelse med tobaksrygning, men også i forbindelse med arbejde med byggematerialer) (Miljøkontrol, 2023).

Der er endnu ingen pyrolyseanlæg i industriel skala, der kan behandle glasfiberkompositter. Det er en proces, som kræver store affaldsmængder for at være økonomisk rentabel i stor skala. En ulempe er, at sizing forsvinder fra fibrene i processen. Sizing er vigtig, da det er den overfladebeskyttelse, som fibrene har – og som gør at resinen binder sig til fibrene. "Uden sizing ingen binding – og vil betyde at sizing vil skulle påføres fibre igen", fortæller John Korsgaard (Korsgaard, LM Wind Power, 2022).

4.7 Fluidiseret leje (adskillellesproces for at genanvende)

Det unikke ved en fluidiseret leje proces er, at den kan behandle blandet materiale, hvor nedskåret kompositmateriale og luft blandes i et bestemt forhold for at opnå forbrænding. Ulempen ved denne proces er, at selvom glasfibrene frigøres løst og så ubeskadiget, som muligt, er deres trækstyrke reduceret med en faktor to eller mere, hvilket nedsætter deres muligheder for genanvendelse.

4.8 Termokemiske processer (adskillelse for at genanvende)

4.8.1 Solvolyse

Solvolyse er en proces, hvor man med kemikalier ved høje temperaturer opløser kompositmaterialet, indtil det er adskilt, hvorefter bestanddelene kan udtrækkes gennem en væske. Endnu er solvolyse en umoden teknologi, der er for dyr at anvende, når man sammenholder værdien af de genindvundne materialer med prisen på tilsvarende nye materialer. Desuden mister de

genindvundne glasfibre nogle af deres oprindelige egenskaber, så de ikke kan anvendes til krævende kompositmaterialer såsom nye møllevinger. Men de kan genanvendes som fibre til mindre krævende formål som skærme og motorhjelme. Som tidligere nævnt indeholder møllevingerne også en andel kulfibre, som har en højere markedsværdi end glasfibre, men de er vanskelige at adskille fra glasfibre. Et grundlæggende problem ved at bruge kemikalier er, at man skal kende vindmøllevingernes materialesammensætning, som kan variere meget, for at finde det bedste opløsningsmiddel. Samtidig er de nødvendige kemikalier potentielt farlige og stiller store krav til arbejdsmiljø, det omgivende miljø og bortskaffelse. Også i denne proces forsvinder sizing fra fiberne, som er afgørende for binding mellem fiber og plast.

4.8.2 Superkritiske væsker (adskillelse for genvinding)

Superkritiske væsker kan løse problemet med, at opvarmning af glasfibre til temperaturer over 250 °C forringer deres mekaniske egenskaber og gør dem ubrugelige til nye møllevinger. Derfor er det vigtigt at få sænket temperaturen i genindvindingsprocesserne, hvilket superkritiske væsker kan bidrage til. Superkritiske væsker har bl.a. den unikke egenskab, at de kan diffundere gennem faste stoffer lige som en gas, men samtidig kan de opløse stoffer på samme måde som en væske. De nødvendige superkritiske væsker er dog i de fleste tilfælde potentielt farlige kemikalier, der kræver en særlig indsats med hensyn til arbejdsmiljø, det omgivende miljø og bortskaffelse.

4.9 Diskussion af behandlingsmuligheder

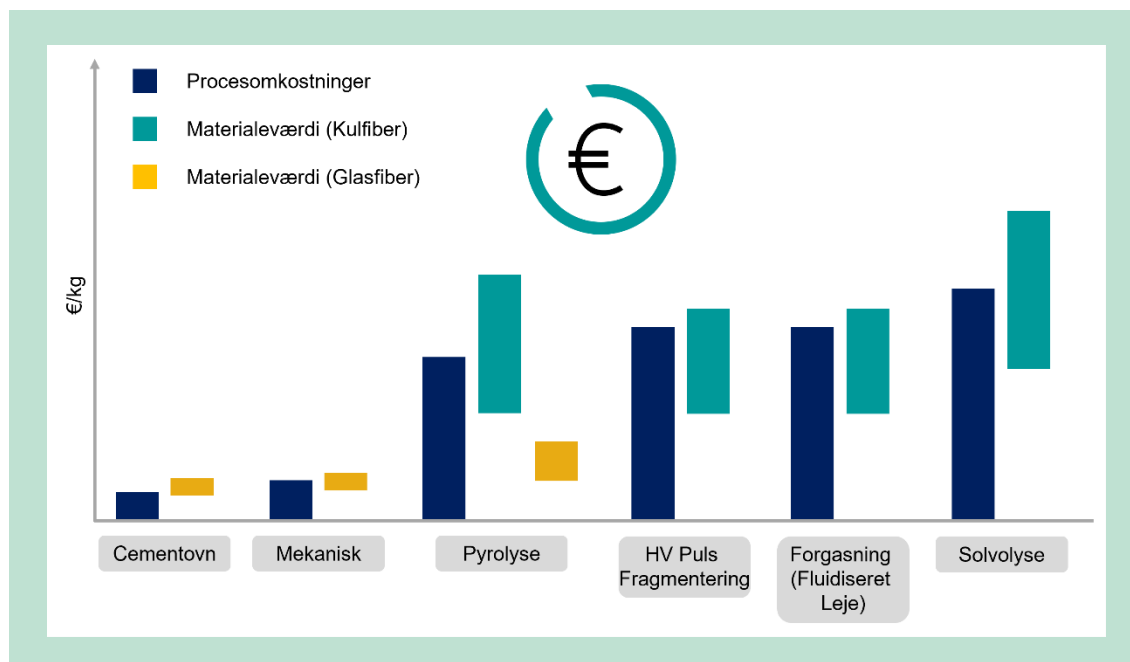
Som det fremgår af Tabel 7 (overblik over behandlingsmuligheder), hvor de mekaniske metoder som nedknusning og medforbrænding i cement, er teknologier, som er på markedet i Europa. De mere avancerede metoder med materialeadskillelse er fortsat kun udviklet på demonstrationsniveau – og ikke som en konkurrencedygtig fremstilling, når det gælder glasfiberkompositter. De er dog mere udviklet når det gælder kulfiber, som blandt andet bruges i flyindustrien. Men teknologierne findes og metoderne ikke er nye, da de har været kendt i mindst 10 år. Samtidig er det også tydeligt, at der er initiativer i praksis på affaldsbehandling af udtjente møllevinger, som ikke kun befinder sig nederst i affaldshierarkiet.

En af de mere markedsmodne teknologier er medforbrænding i cementproduktion. Det er den behandlingsproces som er mest udbredt og er den billigste efter deponering (Bax & Company, 2019). En af fordelene ved medforbrænding af glasfiberkompositterne i cementovnsreaktoren er, at kompositaffaldet anvendes fuldstændigt i processen. F.eks. erstatter glasfibre sandets egenskaber, som normalt vil tilføres som råstof og hærdeplasten (resinen) forbrændes med energiudnyttelse. Cementruten er mest udbredt i Tyskland. Et af markedsusikkerhederne er, at det granuleret affald fra udtjente vindmøllevinger og andre lignende glasfiberkompositter vil være i "hård konkurrence med andre alternative brændselsfraktioner (f.eks. bildæk), og cementfabrikker vil måske fravælge granuleret kompositaffald, hvis det ikke er konkurrencedygtigt på pris og tilgængelig mængde", oplyser John Korsgaard, LM Wind Power (Korsgaard, LM Wind Power, 2022).

Kompositter som vindmøllevinger kan nedknyttes mekanisk og bruges som lydabsorberende og forstærkende fyldstoffer til f.eks. byggebranchen. Det er set i mindre skala (f.eks. Miljøskærm). I større skala har virksomheden Continuum (som opererer i Europa) i januar 2023 meldt ud, at de vil bygge et fabriksanlæg i Esbjerg havn, som vil bruge udtjente vindmøllervinger i produktion af facadeelementer, industridøre m.m. til byggebranchen. En investering i størrelsesorden 600 millioner DKK, som forventes klar ved udgangen af 2024 med en kapacitet på årligt at aftage 36.000 ton kompositaffald (Building Supply, 2023).

Figur 12 viser en oversigt fra Bax & Company (2019), hvor teknologierne er sammenlignet i forhold til pris for processer og materialernes værdi. Medforbrænding med cement er velegnet til glasfiberkomposit og det billigste alternativ, hvor oplyst pris på processen er cirka 1250 DKK. Cementovn, mekanisk nedbrydning er de mest velegnet til glasfiber, mens high voltage

(HV) plus fragmentering (elektrodynamisk fragmentering), fluidiseret leje og solvolyse er velegnet til kulfiber. Pyrolyse er velegnet til både glasfiber og kulfiber. Elektrodynamisk fragmentering er ikke medtaget i skema (Tabel 7), da den kun er på TRL 6 og mest velegnet til kulfiber. Elektrodynamisk fragmentering er en metode baseret på vekselvirkningen af en elektrisk udladning med et fast stof mellem to elektroder nedsænket i vand med kompositterne. Denne metode har potentialet til at genvinde kulfiber uden at de beskadiges, og derefter kan genbruges.



FIGUR 12. Komparativ analyse af behandlingsprocesser. Klide: Bax & Company, 2019.

Sammenfattende kan man sige, at hverken mekanisk eller termisk behandling er økonomisk rentable løsninger, på trods af deres høje TRL-niveau, når der ikke er mulighed for en høj volumen af vingeaffald. Den volumen er der ikke lige nu, men den er der om 5-10 år og langt ude i fremtiden. Den mekaniske håndtering vil være vigtig i fremtiden, fordi uanset hvilken proces der anvendes, vil vindmøllevingen skulle skæres i mindre stykker for at muliggøre transport. En udfordring, der bliver større i takt med vingernes øgede længde – og kræver investering i specialiseret udstyr. Spørgsmålene er, hvad der skal til for at få teknologierne implementeret i større skala? Spørgsmålet danner ramme for dialog med branchen i kapitel 6. I det følgende kastes et blik på de danske miljøprojekter med fokus på genanvendelse af glasfiberkompositter, samt de nyere Innovationsfondsprojekter med industriel forskning og udvikling, herunder industriens materialeudvikling af genanvendelige vindmøllevinger. Sidstnævnte initiativer befinder sig øverst i affaldshierarkiet.

4.10 Danske offentligt støttede miljøprojekter om genanvendelse af kompositmaterialer

Der er de sidste ti år gennemført en række pilotforsøg med alternative bortskaffelsesmetoder for vindmøllevinger. Nogle af disse er gennemført i regi af det Miljøteknologiske udviklings- og demonstrationsprogram (MUDP) hos Miljøstyrelsen og nyere innovationsprojekter, der er støttet under Innovationsfondens Grand Solutions program.

4.10.1 MUDP-projekter

Miljøforprojekt, 2021: Genanvendelse gennem termisk behandling

Forprojektet "Trinity" fokuserede på i laboratorieskala at kunne dokumentere, at glasfibre kan gøres genanvendelige gennem termisk behandling. Forprojektet belyste denne business case,

herunder investeringsbehov, procesdesign, markedsundersøgelser, miljøgodkendelser og samarbejdsaftaler. Business casen tyded på, at projektet i sin endelige form vil kunne tiltrække den nødvendige kapital til etablering af et fuldskala-anlæg. Trinity Synergies A/S forventet at kunne håndtere en årlig mængde på 30.000 tons glasfiberaffald.

Miljøprojekt nr. 2029 (2018): Fremstilling af genbrugsfibre

Miljøprojekt nr. 2029 undersøgte mulighederne for at udvinde genbrugsfibre ved nedknusning af udtjente vindmøllevinger. Projektets konklusion var, at glasfiber, der ellers skulle have været deponeret, har en værdi som genbrugsfibre, der kan bruges som råvarer i nye produkter. Det forudsætter skarp kontrol med oparbejdningsprocessen, foruden en effektiv kvalitetskontrol undervejs i processen. Det er ikke realistisk, at genbrugsfibre kan bruges til en ny vindmøllevinge på lige fod med nyproducerede fibre. Men genbrugsfibre kan indgå som forstærkning af andre kompositter. Et eksempel er en virksomhed, der har brugt genbrugsfibre til plaststøbning af Europaller, hvor fibre har øget pallerens styrke med op til 35 procent. Projektet viste, at der ved bearbejdning af udtjente møllevinger og omhyggelig kontrol med processen kunne skabes en ny råvare, der kan anvendes i fremstillingsindustrien, eksempelvis ved at indgå i polymerbeton og forøge dennes styrke. Genbrugsfibre kan også indgå som delelementer i plaststøbning og i sandwichkonstruktioner. Her opnås en øget stivhed og et reduceret forbrug af øvrige råvarer. Miljøprojekt nr. 2029 har således vist, at det er muligt at udvinde anvendelig genbrugsfiber af kompositaffald. Genbrugsfiberen kan kvalitetssikres, så den kan anvendes i en forretningsmæssigt attraktiv videreproduktion.

Miljøprojekt nr. 1890 (2016): Pilotproduktion af støjskærme af genanvendt glasfiber

I dette projekt blev der udviklet proces teknologi og produktionsmetoder til fremstilling af støjskærmelementer af genanvendte glasfiber- og plastmaterialer fra vindmøller. Der blev fremstillet en "0-serie" af støjskærmsprodukter og dokumentation for produkternes kvalitet ved akkrediterede test. Projektet udviklede teknologi til fremstilling af et glasfibergranulat, der er velegnet til akustiske formål. Der blev udviklet støjskærmskassetter fremstillet med 90 procent genanvendte materialer. Det blev dokumenteret, at støjskærmsprodukterne opfyldte gældende krav til kvalitet og anvendelse, og at fremstillingsprocessen kan bidrage til en væsentlig reduktion af udledning af drivhusgasser og energiforbrug, i forhold til fremstilling af støjskærmsprodukter af aluminium og mineraluld.

Miljøprojekt nr. 1819 (2015): Kompositprofiler af genanvendte glasfibre

En virksomhed havde i dette projekt udviklet en proces teknologi til at erstatte en del af glasråvarerne med kasseret restglas fra anden industriel produktion. Der blev gennemført en analyse af virksomhedens produktportefølje, hvor muligheder og barrierer for at bruge restglas blev kortlagt og kvantificeret. For en del af produktporteføljen er der efterfølgende gennemført vellykket produktion og fremstillet salgbar emner med indhold af restglas. For en anden del af produktporteføljen har virksomheden forbedret den såkaldte pultruderingsproces til brug af restglas. Pultruderingsprocessen bruges til kontinuerlig fremstilling af kompositprofiler med konstant tværsnit og materialeegenskaber tilpasset anvendelsen. Projektet har skabt de indledende forudsætninger for at identificere og måle på kritiske kvalitetsparametre for råvaren, så den nødvendige processtabilitet kan opretholdes, når nyproduceret glas erstattes med restglas. Processen har endnu ikke vist sig, som et konkurrencedygtigt alternativ.

Miljøprojekt nr. 1551, 2014: RecyBlade projekt

Formålet med RecyBlade projektet var at opbygge et koncept for genanvendelse af vingekonstruktioner til nye byggematerialer og konstruktionselementer. Vanskeligheder med at få adgang til de nødvendige tekniske oplysninger om vingerne gjorde, at projektet ikke kunne gennemføre alle planlagte faser. Der blev undersøgt tre genbrugsalternativer, med tilpasning. Dvs. at de genbrugte eksisterende dele af en vindmøllevinge til en anden anvendelse (oftest af lavere værdi end originalen), nemlig som støjskærme, højspændingsmaster og indhegning af

akvakulturer. Men manglen på præcise data gjorde det umuligt at gennemføre konkrete beregninger af resterende styrke, lastgrænser og restlevetidsvurdering. Alle tre genbrugsalternativer synes at vise økonomisk og miljømæssig rentabilitet. Der er imidlertid stadig betydelige indledende finansielle investeringer, sociale barrierer og juridiske begrænsninger, som kræver yderligere undersøgelser, konkluderet projektet. Miljøskærm er i dag en mindre virksomhed, som laver støjskærme ud af udtjente vindmøllevinger.

Miljøprojekt nr. 1455 (2012): Genanvendelse af glasfibermateriale

I projektet blev der undersøgt og dokumenteret en række mekaniske egenskaber af kasseret glasfibermateriale i en forarbejdet form. Testene blev hovedsageligt gennemført med glasfibermateriale fra kasserede vindmøllevinger. Dette materiale havde et indhold af glasfibre på ca. 70 % af vægten. Resultaterne viser, at materialet har gode termiske og akustisk isolerende egenskaber. Der er dokumenteret egenskaber, der er sammenlignelige med almindeligt anvendte typer af mineraluld. Endvidere viser mekaniske prøvninger, at materialet er mekanisk stabilt og har egenskaber, der ikke påvirkes ved eksponering til et fugtigt miljø.

4.10.2 Innovationsfondsprojekter

Dreamwind, 2016 - 2020

Projektet Dreamwind (Designing REcyclable Advanced Materials for WIND energy) var et forskningsprojekt om udvikling af nye kompositmaterialer, gennemført i et samarbejde mellem Aarhus Universitet, Vestas og Teknologisk Institut. Dreamwind-projektet arbejdede på at udvikle genanvendelige højstyrke kompositmaterialer inden for en cirkulær økonomisk ramme. Ved at se materialeudviklingen i denne bredere sammenhæng blev der sat fokus på at udvikle produkter, der var bæredygtige i både økonomisk og ressourcemæssig sammenhæng. Materialeudviklingen var dels baseret på fremstilling af såkaldte "stimuli-responsive" materialer - materialer som kan skilles ad efter vindmøllens levetid - og dels ved inkorporering af biobaserede ressourcer i de nye materialer. Endvidere skulle det sikres, at produktet kunne matche nuværende materialers præstationsevner. Kontraktperioden løb fra marts 2016 til marts 2020 (Dreamwind, 2022). Projektet forsætter til CETEC-projektet, 2021-2024, som omtalt foruden.

DecomBlades-projektet, 2021-2023

I projektet DecomBlades undersøges og udvikler ti danske projektpartnere løsninger til at genanvende kompositmaterialet fra vindmøllevinger. Projektet fokuserer på tre specifikke processer: mekanisk nedknusning af vindmøllevinger, så materialet kan anvendes i forskellige produkter og processer; anvendelse af nedknust vingemateriale i cementproduktion; og pyrolyse, hvor kompositmaterialet adskilles ved høje temperaturer. DecomBlades-projektet fokuserer på de genanvendelsesteknologier, der kan opskaleres i en grad, så de kan genanvende de mængder af udtjente vindmøllevinger, som DecomBlades konsortiet forventer at se i de kommende årtier (DecomBlades, 2022). Konsortiet bag DecomBlades tæller Ørsted, LM Wind Power (en del af GE Renewable Energy business), Vestas Wind Systems, Siemens Gamesa Renewable Energy, FLSmidth, MAKEEN Power, HJHansen Recycling Group, Energy Cluster Denmark (ECD), Syddansk Universitet (SDU) og Danmarks Tekniske Universitet (DTU). De ti partnere repræsenterer forskellige led i en potentiel værdikæde, der kræves for at etablere en genanvendelsesindustri for kompositmaterialer fra vindmøllevinger og som er formålet med projektet ud fra de tre genanvendelsesteknologier. Projekt er endnu ikke afsluttet, sådan at der foreligger en konklusion.

CETEC-projektet, 2021-2024

Projektet CETEC (Circular Economy for Thermostes Epoxy Composites), med parterne Vestas, Olin Corporation (verdens førende resin/epoxyproducent), Teknologisk Institut og Aarhus Universitet (er en opfølgning fra Dreamwind projektet). Innovationsfonden har investeret 10,5 mio. kr. i dette Grand Solution projekt, som arbejder med genanvendelsesteknologi for vindmøllevinger gennem afprøvning af en ny epoxy-resin. Teknologien består af to dele. Først bli-

ver de brugte kompositmaterialer adskilt i glasfibre og epoxy-resin. Herefter bliver epoxy-resinen yderligere opdelt i sine kemiske grundbestanddele. Resultatet er materialer af samme kvalitet som nye materialer. Processen kaldes kemisk genanvendelse, eller chemcycling. De genindvundne bestanddele kan efterfølgende genanvendes til produktion af ny epoxy-resin og potentielt kan fibre genanvendes og dermed gøre både glasfibre og epoxy resin genanvendelig. Teknologien har potentiale for vindenergiindustrien, men også for de mange andre industrier, der bruger store mængder epoxy-resin f.eks. bilindustrien, den maritime branche og elbranchen. Projektet har primært fokus på at gøre epoxy-resinen cirkulær. Projektet løber fra maj 2021 til maj 2024 (Innovationsfonden, 2022; Aarhus Universitet, 2022). I løbet af denne projektperiode har CETEC konsortiet netop været ude med offentliggørelse af den nye genanvendelsesproces, som kan bruges på epoxy-resin vindmøllevinger og lignende kompositter. Vestas investerer i processen – og konsortiet vil i løbet af den næste årstid fremlægge en færdig løsning for både implementering og kommercialisering af den nye genanvendelsesteknologi (EnergiWatch, 2023).

4.11 Vindindustriens projekter på genanvendelige rotorvinger

4.11.1 Zebra-projektet

Zebra-projektet sigter efter at fremstille en resin-type, som gør det lettere at genanvende kompositmaterialet. I Zebra-projektet arbejder LM Wind Power i samarbejde med resin-producenten Arkema og Jules Verne Institutet i Paris. Dette projekt er et stort skridt på vejen mod en genanvendelig vindmøllevinge. Resinen vil kunne genvindes, men det er endnu uklart om glasfiberen efterfølgende kan føres tilbage i et lukket cirkulært loop til nye møllevinger. Det er almindeligt kendt, at slidte glasfibre bliver kortere og dermed mister deres styrkeegenskaber. Der findes udmattelsesdata for glasfiber af ensrettede lange fibre. Men det vil være umuligt at finde ud af, hvilke fibre som på hvilket genanvendelsestidspunkt har tilstrækkelig rest levetid til at kunne anvendes igen. Sidst men ikke mindst, så er det afgørende for design af vindmøllevinger, at fiberforstærkningen i længderetningen er kontinuerligt lange fibre. Det vil være meget besværligt at "splidse" korte fibre til kontinuerte lange fibre. Derudover vil sizing forsvinde under genanvendelsesprocesser, som er fibrenes beskyttelseslag. Sizing vil skulle påføres på ny, for at fiberne binder til resinen. "Mit bedste bud på genanvendelse af glasfibre til fremstilling af vindmøllevinger er gen-smeltning (re-melting) af genindvundne til nye jomfruelige glasfibre" oplyser John Korsgaard (Korsgaard, LM Wind Power, 2022).

4.11.2 RecyclableBlade projektet

Siemens Gamesa har i deres projekt RecyclableBlade udviklet en ny type epoxy-resin, der gør det muligt at opløse vingematerialet ved hjælp af eddikesyre opvarmet til blot 80°C. Processen opløser vingematerialet i løbet af 3-4 timer, hvorefter man står med præcis det samme materiale, som i sin tid blev placeret i vindmøllevingen. Den nye teknologi er også baseret på epoxy-resin med en ny kemisk sammensætning. Epoxy-resinen er udviklet i et tæt samarbejde med den indiske epoxyleverandør Aditya Birla. Før var der behov for temperaturer på 500 °C for at opløse vingematerialet, hvilket både gav anledning til stor CO₂-udledning og ringere kvalitet af de genvundne glasfibre. Den nye epoxy-resin gør det muligt at genanvende mere end 95 procent af vingematerialet. RecyclableBlade er for nuværende kun udviklet til havvindmøller, men Siemens Gamesa undersøger mulighederne for også at anvende genanvendelige vinger i landplacerede vindmøller. Ni af Siemens Gamesas genanvendelige vinger blev i 2022 installeret på tre vindmøller i Kaskasi-havvindmøllepark ved Helgoland i Nordsøen. Denne vindmøllepark ejes af energivirksomheden RWE. Ligeledes har Vattenfall meddelt, at ni genanvendelige vinger installeres på tre af de 140 vindmøller i den hollandske havvindmøllepark Kust Zuid, der forventes i drift i 2023 (Vattenfall, 2022), samt EDF France har bestilt til et nyt havmølleprojekt i Frankrig (Fransk Energiselskab) (Jensen, 2022).

5. Naboland der undersøger behandlingspraksis

I Danmarks nabolande er der specialiserede virksomheder, som tilbyder behandlingsmuligheder for møllevinger ved at nedknuse vingerne og anvende materialet i co-processing i andre processer. Det er især Tyskland og Holland, som tilbyder disse muligheder som alternativ til deponering, mens Frankrig hidtil primært har sendt vingeaffald til behandling i Tyskland eller Spanien.

Hidtil har det i flere lande i Europa - herunder Danmark - været en billig og lovlig praksis at deponere vindmøllevinger, fordi der ikke har været alternative bortskaffelses- eller genanvendelsesmuligheder. Deponering indebærer, at det udtjente produkt, efter at alle genanvendelige dele er fjernet, henlægges på lossepladser på ubestemt tid. På moderne deponeringsanlæg nedgraves materialerne ofte, blandt andet for at skåne materialerne for solens stråler, som normalt nedbryder polymermaterialer. Men glasfiberkompositterne fra møllevinger er vanskeligt nedbrydelige, og der eksisterer ikke så meget viden om, hvad der sker med materialerne i deponering, hverken i praksis eller i litteraturen.

Af Danmarks affaldsbekendtgørelse - [BEK nr. 2512 af 10.12.2021](#) - fremgår det, at det er kommunerne, der klassificerer affald, som deponeringseget eller ej. Det er også kommunerne, der har anvisningspligt for affald klassificeret som deponeringseget. Som udgangspunkt, er deponering en mulighed, for affald, som ikke er egnet til materialenyttiggørelse eller til forbrænding. I følge interviews med de danske vindmølleproducenter gennemført i forbindelse med udarbejdelse af denne rapport oplyser de, at de gradvis er gået væk fra deponering siden 2012, netop fordi der findes andre behandlingsmuligheder, f.eks. i nabolande til Danmark (læs dialog med branche i kapitel 6).

Miljøstyrelsen kan udarbejde såkaldte vejledende udtalelser for håndtering af affald fra vindmøllevinger. Vejledende udtalelser har ingen juridisk forpligtelse og opfattes alene som "best practice" – på dette område foreligger der ingen sådanne vejledninger endnu. WindEurope ser gerne, at en sådan vejledning udarbejdes på fælles EU-plan.

I Tyskland er det ikke lovligt at deponere vindmøllevinger, og i Frankrig er det dyrt, hvilket kan ses i Tabel 6. Et forbud mod deponering af vindmøllevinger og lignende kompositter hænger muligvis sammen med, at det dermed sikres, at alle udtjente vindmøllevinger og møllehuse føres ind i en mere cirkulær værdikæde. Som kapitel 4 redegjorde for, så kræver (de mere lovende) alternative behandlingsmetoder store affaldsvolumener før et anlæg anses som en rentable forretning.

WindEurope sammen med de store vindmølleparcejer (f.eks. Vattenfall og Ørsted) og de store vindmølleproducenter (som Vestas og Siemens Gamesa m.fl.) bakker op om et fælles EU-forbud mod deponering af vindmøllevinger for at supportere udviklingen af genanvendelsesteknologier, og få så meget kompositaffald på markedet, at de producenter, der er afhængige af en stabil forsyning af kompositaffald til produktionen, faktisk har adgang til det. Der ligger således ikke alene et miljøsyn, men også et udbud og efterspørgselsspørgsmål i den henseende for at skubbe på miljøsynet i et større og mere langsigtet plan og dermed fremme innovationen.

TABEL 6. Oversigt over hvordan EU-lande omsætter EU Landfil Direktivet om at mindske deponering, Kilde: Confederation of European Waste-to-Energy Plants (CEWEP) (2021).

EU Land	Deponeringsafgift, €/Ton	Deponeringsforbud vedtaget
	<p>23 EU-lande har indført afgift (AT, BE, BG, CZ, DK, EE, EL, ES, FI, FR, HU, IE, IT, LT, LU*, LV, NL, PL, PT, RO, SE, SL, SK), desuden Schweiz og UK. 4 EU-lande har ingen afgift (CY, DE, HR, MT), hvilket også gælder Norge**</p> <p>Afgiften varierer fra 5 €/t (LT) til over 100 €/t (BE).</p> <p>*Kommunal afgift pålægges ** deponeringsafgift blev ophævet i 2015</p>	<p>I henhold til kravene i direktiv 1999/31/EF om deponering af affald har 16 EU-lande vedtaget en form for forbud* AT, BE, DE, DK, EE, FI, FR, HU, HR, LT, LU, NL, PL, SE, SL, SK) samt Norge, Schweiz og UK og 11 EU-lande har ikke (BG, CY, CZ, EL, ES, IE, IT, LV, RO, MT, PT). *se eksempler herunder.</p>
Danmark	<p>Statslig afgift siden 1987 (afgift på 475 DKK/ton (63,3 €) før moms (79 € inkl. moms). Mindste pris på deponeringstaksten er ca. 895 DKK/ton. Varierer med mængde.</p>	<p>*Forbud mod deponering af genanvendeligt og brændbart affald siden 1997 (med organisk indhold højere end 3% TOC i 2011, TOC = total organic carbon).</p>
Tyskland	<p>Ingen afgift</p>	<p>Deponeringsforbud indført med en administrativ forordning (TASi) i 1993 om ubehandlet affald med TOC > 3 %, fuld implementering siden 1.6.2005. Der er undtagelser for:</p> <ul style="list-style-type: none"> - mekanisk-biologisk behandlingsaffald med brændværdi > 6600 kJ/kg tørstof - mekanisk behandlet affald med brændværdi > 6600 kJ/kg tørstof og TOC > 8 %
Frankrig	<p>A: 152 €/t i 'ikke-autoriserede' deponilagre. B: 25 €/t i 'autoriserede' deponilagre med 75 % energigenvinding fra opfanget biogas C: 35 €/t i 'autoriserede' bioreaktordeponerings-celler med biogasgenvinding Andre 'autoriserede' deponilagre for både B & C: 42 €/t</p>	
Sverige	<p>435 SEK/t siden 2006. Gebyr forhøjet 1. januar 2020: 540 SEK/t (51€)</p>	<p>*Siden 2002 forbud mod sorteret brændbart affald. Siden 2005 forbud mod organisk affald</p>
Holland	<p>Indført i 1995, ophævet i 2012 og genindført i 2015. Samme affaldsafgift for deponering og forbrænding. For 2021: 33,15 €/t</p>	<p>*Siden 1995 begrænsning på 35 affaldsstrømme, herunder brændbart og bionedbrydeligt affald (TOC > 5%). I 2018 omfatter begrænsningen over 60 affaldsstrømme</p>

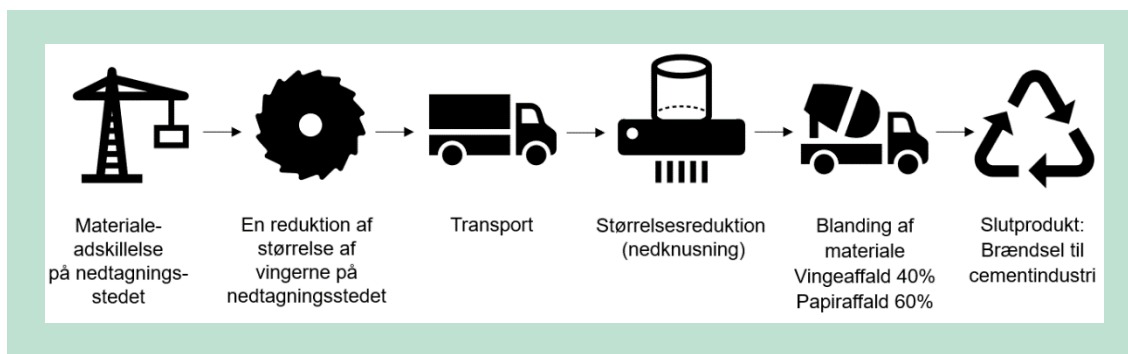
Tabel 6 giver en oversigt over EU-landenes forskellige reguleringer vedr. deponering. Det skal understreges at udover afgiften til staten, så varierer prisen. Prisen kan typisk variere mellem de 895 DKK og 1800 DKK i Danmark. F.eks. er der omkostninger forbundet med modtagelse og åbning af deponeringsanlæggene (et såkaldt "gate fee"). I praksis betyder det, at prisen bliver billigere, jo større mængder man kommer med på én gang.

5.1 Tyskland

Tyskland har i deres lovgivning om husholdningsaffald indført regler for kompositaffald, og har forbudt deponering og forbrænding af kompositmaterialer (Ricard, IEA taskforce: Recycling of wind turbine blades, møde 29. november 2022, 2022).

I Tyskland findes flere virksomheder, som tilbyder behandling og teknologiske løsninger til genanvendelse af udtjente vinger. Den mest benyttede teknologi er kendt som "cementruten", hvor vingerne nedknuces og f.eks. blandes med op til 60 procent affaldspapir, hvorefter materialet sælges som brændsel til cementproducenter (se Figur 13), eller nedknuste vinger anvendes direkte i co-processering af cementklinker. Der findes værdikæder mellem nedtagningsfirmer, transport og aftager. I Tyskland findes der samarbejder mellem affaldsbehandlingsvirksomheder, vindmølleproducenter og aftagere, såsom cementfabrikker. Ofte er det affaldsvirksomhederne, som har udviklet et forretningsområde for at håndtere vingeaffald og lignende kompositter. En af udfordringer er, at der skal være et kontinuerligt flow af vingeaffaldsmaterialer og lignende kompositter for, at der er grundlag for en økonomisk rentabel forretning. Som et eksempel er den tyske virksomhed neocomp (ejet af neowa) nu lukket. De arbejdede med genanvendelse (primært downcycling) af vindmøllevinger og andre fiberkompositter. Med en kapacitet på 80.000 ton per år henvendte virksomheden sig til en række industrier, og arbejdede således med genanvendelse af produktionsrester af fiberkompositter fra elektronik-, marine-, luftfart- og bilindustrien (neocomp, 2022). Kompositmaterialet blev granuleret og anvendt enten som brændstof til cementindustrien (Cementruten) eller som højkvalitets genbrugsfibre til produktionsindustrien. Neocomp/neowa benyttede metoden med at blande granuleret kompositaffald med papirmasse. Det skyldes, at neowa havde adgang til store mængde papirmasse via deres øvrige affaldsforretning indenfor papirbranchen. Processen er, som illustreret i Figur 13.

Vindmøllevingen indgår i produktion af cement, hvor glasfibreindholdet af mineraler indgår i cementblandingen som erstatning for sand. Resinen fra kompositten anvendes i cementfremstillingen som erstatning for konventionelt brændstof. Forarbejdningsmetode, som vist i Figur 13 med reduktion af vingernes størrelse udføres bl.a. af virksomheden Nehlsen Group, som udover kasserede vindmøllevinger også modtager andet fiberkompositaffald.



FIGUR 13. Illustration af Cementruten, hvor vingeaffaldet konverteres til brændsel til medforbrænding til cementindustrien i Tyskland. Kilde: neocomp/neowa webside 2022.

Blandt andet samarbejdede neocomp med LM Wind Power (jf. neocomp hjemmeside) – men neocomp er ikke længere aktiv indenfor bortskaffelse af vindmøllevinger, da mængden af kompositter - og dermed forretningen - var for lille og usikker, oplyser John Korsgaard, LM Wind Power (Korsgaard, LM Wind Power, 2022). Ifølge neocomps hjemmeside betjente de ikke kun Tyskland, men modtog også vindmøllevinger fra Benelux, Frankrig, Østrig, Schweiz, Sverige og Danmark.

5.2 Holland

I Holland vil det kommende udbud for offshore vindmølleparken Kust West i Nordsøen have miljø og økosystemer som et innovationstema. Byderne opfordres til at beskrive, hvordan deres tilbud bedst beskytter miljøet og økosystemet. Initiativet med at skrive bæredygtighed ind i udbud hænger til dels sammen med forebyggelse af affaldsproblemer (Ricard, IEA taskforce: Recycling of wind turbine blades, møde 29. november 2022, 2022). På den ene side, kan man sige, at nogle EU-landene går foran på forskellige bæredygtighedsinitiativer, mens man på den anden side kan sige, at der mangler fælles europæiske miljøpolitikker.

Holland har - som Tyskland - i deres lovgivning om husholdningsaffald indført regler for kompositaffald, og landet har ligeledes forbudt deponering og forbrænding af kompositmaterialer. Finland og Østrig har indført tilsvarende regler.

I Holland tilbyder virksomheden Groningen Seaports at skære vinger i mindre stykker og herefter nedknuse stykkerne. Granulatet kan ifølge konsortiet Decom North erstatte hårdtræ ved anvendelse i produkter som støbeforme, broer, kranunderlag osv. (Groningen Seaports, 2022). Alt efter ejerens behov og forskrifter skæres vingerne ned på stedet, hvor vindmøllen nedtages. Vingestykkerne kan derefter transporteres på normal vis. Der anvendes enten rundsave eller hydrauliske klippeværktøjer, men af sikkerhedshensyn og hensynet til omgivelserne undersøges muligheden for at gå over til vandstråleskæring. Udover mekanisk genanvendelse arbejder virksomheder i Decom North konsortiet også med kemisk adskillelse, hvorefter resin og fibre kan genanvendes hver for sig. Genanvendelsesprodukterne kan for 70 procent vedkommende anvendes til fremstilling af produkter i bilindustrien og offentlig transport og de resterende 30 procent bruges til fremstilling af såkaldt pyroolie via en kemisk proces. Pyroolien kan anvendes til produktion af ny plast. Denne forarbejdning udføres i Decom North af virksomheden Circular Recycling Company, som tager imod kompositmaterialer fra vindmøllevinger og skibe.

Der har flere Europæiske lande, såvel som i Danmark været en del forsøg og pilotprojekter med genbrug af vingematerialet til f.eks. møbler, lavkvalitets polymermaterialer og isolering. Men ingen af disse løsninger er endnu udbredt eller har vist et skalerbart forretningspotentiale for større volumener. Det bliver ofte på projekt til projekt basis. En niche for genbrug er at fraskære sider i møllehuset og de lige stykker fra vingerne - disse kan skæres ud til pladematerialer, der kan bruges i byggeindustrien evt. som vægge i stalde og lignende.

I Holland er udtjente møllevinger blevet brugt til at fremstille byrumsudstyr, hvor forskellige eksempler og mængden af brugte møllevinger kan ses i Tabel 7. Det er udviklet af Blade-Made, et arkitekturkollektiv i Holland, i samarbejde med et andet arkitekturkollektiv, Superuse Studios. Et internationalt arkitekturkollektiv for cirkulært design i form af en legeplads kan ses i figur 14.

TABEL 7. Byrumsudstyr af materialer fra brugte vindmøllevinger. Kilde: BLADE-MADE.COM.

Output:	Input:
20 legepladser	100 møllevinger
11 bænke	100 møllevinger
100 læskure til busstoppesteder	200 møllevinger
Undgået forbrænding eller deponering	400 møllevinger



FIGUR 14. Legeplads i Amsterdam af vindmøllevinger. Kilde: BLADE-MADE.COM.

Legepladsen på billedet i figur 14 står i Amsterdam. Projektet hedder Blade-made og er iværksat af Hollandske arkitekter, som hedder Superuse. Der findes i dag to versioner, som er demoversioner. Legepladser til børn er nogle af de produkter, som har højest sikkerheds- og miljømæssige standarder. Det er jf. rapportens forfatter, ikke et udbredt koncept og er heller ikke bekendt med tests eller certificering på at brugte vindmøllevinger, som materialer egner sig til legepladser.

5.3 Frankrig

Frankrig har en streng regulering af deponier, hvor afgifterne for deponering øges fra år til år for at mindske brugen, se Tabel 8. Deponering er dog stadig muligt, men benyttes ikke af virksomhederne.

TABEL 8. Frankrigs statslige afgifter på deponering, efter type af deponeringsanlæg.

Kilde: UNIFER (2022).

Deponeringsanlæg	Statslige afgifter i Euro per ton						
	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025
A. Uautoriserede deponier	151	152	164	168	171	173	175
B. Autoriserede deponier med mere end 75% valorisering af opsamlet biogas	24	25	37	45	52	59	65
C. Autoriserede deponier med brug af bioreaktormetode og valorisering af opfanget biogas	34	35	47	53	58	61	65
Autoriserede deponier, der falder ind under både B og C	17	18	30	40	51	58	65
Andre autoriserede deponier	41	42	54	58	61	63	65

En fransk lovgivning på genanvendelsesområdet for vindmøller blev vedtaget den 22. juni 2020. Loven fastlægger, at fra 1. juli 2022 skal 90 procent af vindmøllernes samlede masse (vægt) inklusiv mindst 35 % af rotorens masse genbruges eller genanvendes (rotoren er omtalte komposit - enten som kulfiber- eller glasfiberkomposit). Denne procentdel for rotoren stiger til 45 % efter 1. januar 2023 og til 55 % efter 1. januar 2025. For at overholde disse genanvendelsesforpligtelser skal operatøren således kende til de materialer som er brugt. Denne

type krav er på vej ind i udbudsmaterialerne i Frankrig for at skubbe på udviklingen, hvor udtjente produkters materialer har en værdi i en cirkulær økonomi (Ricard, IEA taskforce: Recycling of wind turbine blades, møde 29. november 2022, 2022). I den seneste offshore-udbudsrunde i Frankrig (i 2022) havde otte procent af punkterne i udvælgelseskriterierne fokus på vindmøllernes genanvendelighed (Jensen, 2022).

I Frankrig forventer man, at 1.500 vindmøller skal demonteres i løbet af de næste 5 år, og med en fransk lovgivning om obligatorisk genanvendelse fra 2023 har virksomheden Suez positioneret sig som strategisk partner for vindenergiindustrien. Suez demonterer vindmøller for den franske energivirksomhed Engie. Efter demontering sorterer virksomheden materialerne i en række fraktioner som stål, kabler, glasfiber, elektroniske komponenter, transformere og motorer. De sorterede materialer sendes videre til den bedst egnede genbrugskanal og virksomheden oplyser, at kun ca. 1 procent af materialerne sendes til deponeringsanlæg. Virksomheden omtaler, hvordan kasserede møllevinger bruges til isoleringspaneler og fiberforstærket cement. Ifølge virksomhedens hjemmeside er der genanvendt mere end 20 vinger med længder på op til 50 meter fra Frankrig.

Suez samarbejdede med den spanske virksomhed Reciclaia Composites, der tilbyder service på opskæring af vindmøllevinger, som illustreret i Figur 5 med klippeværktøjet på en lastbil med en presenning under for at fange støvet fra processen. Reciclaia Composites udførte desuden pyrolyse og solvolyse på kompositaffald, men forretningen er lukket, oplyses det i interview (Guermeur, 2022). Suez har også selv investeret i teknologi til mekanisk knusning af møllevingerne. Det nedknuste materiale kan bruges i nye produkter, f.eks. tagrender og kabelbeskyttere, som ikke kræver høje mekaniske egenskaber. Suez forventer (i fremtiden) at kunne håndtere et par hundrede ton om året.

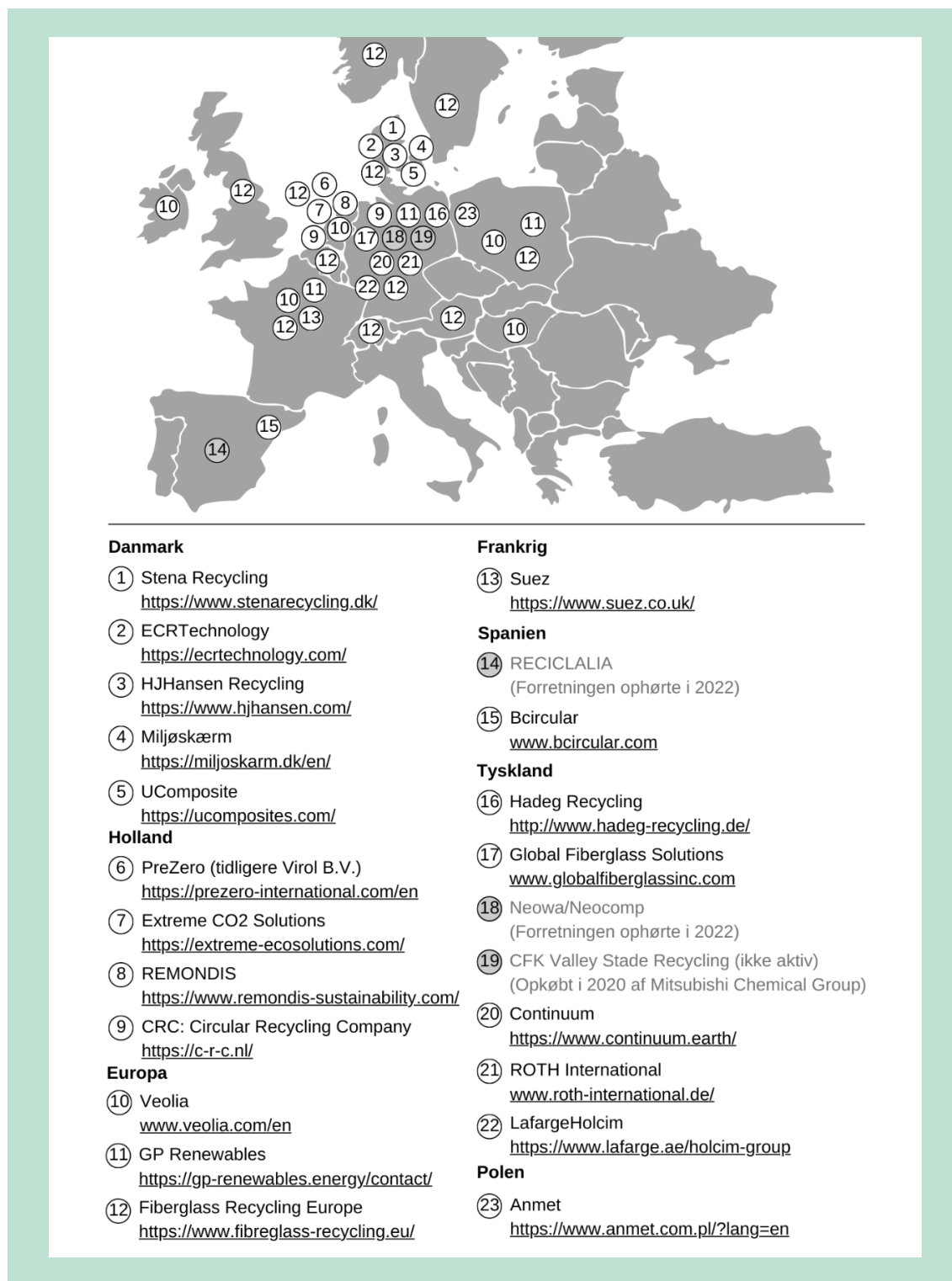


FIGUR 15. Klippeværktøjet til opskæring af vindmøllevinger af spanske Reciclaia Composites
Kilde: Ricard, Internetsøgning (2022).

En anden virksomhed er Guyot Environment, som opererer i den franske region Bretagne og i Spanien. De tilbyder vejledning om affaldshåndtering, sortering og genanvendelige materialer, indsamling, behandling og nyttiggørelse af materialer i godkendte centre samt operationel af-rapportering med monitoringsværktøjer. Virksomhedens har fem centre, placeret i Brest, Morlaix, Ploufragan, Poullaouen og Bilbao. Deres hjemmeside nævner ikke direkte vindmøllevinger, men beskriver, hvordan forarbejdet affald tidligere blev deponeret. Nu omdannes affaldet i stedet til brændstof til kedler og cementproduktion (GUYOT environnement, 2022).

5.4 Eksempler på virksomheder der behandler kompositaffald

Figur 16 viser eksempler på virksomheder, som specialiserer sig indenfor kompositaffald og har nævnt vingeffald som ét af deres forretningsområder. Aktiviteter på området ændrer sig løbende. Tre af de store anlæg (to i Tyskland og ét i Spanien) er lukket i 2021/2022, og er markeret med grå.



FIGUR 16. Eksempler på virksomheder i Europa som værdikædeled i at behandle kompositaffald. Kilde: Ricard, Internetsøgning (2022).

6. Dialogen med branchen

Som led i kortlægningen er der gennemført en række interviews med fageksperter fra danske vindmølleproducenter, brancheorganisationen og en repræsentant fra et affaldshåndteringsfirma. Alle interviews er foretaget mellem d. 21 og 29. november 2022 af SDU. Bilag 6.1 giver en liste over de personer, som er blevet interviewet.

6.1 Hvilke forhold påvirker ændringer i affaldsstrømme?

Der er flere faktorer, som påvirker affaldsstrømmenes volumen. Selvom mængden potentielt kan kortlægges, afhænger den af mange parametre. Her i slutningen af 2022 påvirkes affaldsstrømmene ikke mindst af mulighederne for at holde vindmøllerne i drift længere tid end forventet.

Jonas Pagh Jensen, Siemens Gamesa, nævner det faktum, at vindmøllerne lever i væsentligt længere tid, end de er designet til. Ser man alene på nedtagne møller, ville man konkludere, at gennemsnitslevetiden for en vindmølle er 18 år. Men det skyldes, at ikke alle de forventede vindmøller er taget ned endnu. Det er mere korrekt at antage, at gennemsnitslevealderen for en landbaseret vindmølle i Danmark nu er 29 år. Det betyder et lavere volumen af kompositafald og at man skal lægge 5 til 10 år til de antagelser, man hidtil har arbejdet efter (Jensen, 2022).

Jonas Pagh Jensen har erfaret, at nogle vindmøller bliver nedtaget i Danmark og genopført i UK, Irland og Italien, som er nogle af de lande, hvor særligt højderestriktioner og elnetkrav gør det relevant at sætte vindmøllerne op igen. Der findes ikke tal for, hvor mange det drejer sig om. I USA har Siemens Gamesa taget 1.800 vinger ned i år, og ingen af disse er endt i deponi (Jensen, 2022). Flere af de danske producenter er nævnt som reference på hjemmesider hos genanvendelsesfirmaer, særligt hos de virksomheder, som indgår i værdikæder for cementruten. Disse genanvendelsestilbud findes ikke blot i USA, men også i Europa (Jf. tidligere Figur 16). Producenterne oplyser, at de også udtager til lager for reservedele og servicering af ældre møllemodeller.

Green Power Denmark oplyser, som opfølgning på interviewet med brancheorganisationen, at de ikke kender de præcise tal, men nogle af de virksomheder, som står for nedtagning, kom med et estimat på 50 procent i 2012 for videresalg og reservedele. I dag (2022) oplyser en af de adspurgte nedtagningsvirksomheder med henblik på videresalg, at i øjeblikket går op til 80 procent af de nedtagne landbaseret vindmøller i Danmark til videresalg som hele vindmøller eller at vindmøllevinger lægges på et reservedelslager. Nedtagningsvirksomheden forudsiger dog, at denne tendens vil falde, da mange af de ældre landmøller efterhånden er så nedslidte, at de ikke kan fungere længere (Green Power Denmark, 2022).

Landbaseret vindmøllers faktiske levetid hænger ofte sammen med ejertypen. Mange af de nuværende landvindmøller er enkeltmandsejet, hvor ejeren på et tidspunkt har investeret en (dengang) stor privat sum penge i at få vindmøllen rejst. I dag koster en landvindmølle 50 til 60 millioner kroner, og derfor bliver færre nye vindmøller enkeltmandsejede. Jonas Pagh Jensen, Siemens Gamesa, mener, at vindenergibranchen sagtens kan bygge vindmøller, der har en

designlevetid på 35 år. I deres serviceforretning kan Siemens Gamesa f.eks. gå ind og forstærke vinger mv. relevante steder, og ved høje vindhastigheder kan vingerne drejes lidt ud af vinden for at mindske belastningerne. Muligheder som bidrager til levetidsforlængelse. Han udtrykker det således, at han har ca. 9.000 kollegaer, der tager sig af servicering og levetidsforlængelse.

Bæredygtighed handler blandt andet om at undgå at overdesigne produkter i forhold til deres levetid og dermed bruge for meget materiale. Siemens Gamesa får typisk vindmøllerne certificeret til et bestemt antal år, som så er den minimumsalder de skal holde under bestemte driftsbetingelser. Der er f.eks. sensorer i vingerne til måling af belastninger mv. Det er en integreret del af den måde Siemens Gamesa arbejder på, bl.a. for at undgå at anvende for meget materiale i forhold til møllernes levetid (red. det er generelt for de fleste vindmølleproducenter at montere sensorer på vingerne).

Jonas Pagh Jensen, Siemens Gamesa, mener, at der er "masser af håndtag at skrue på, så vi kan ikke se det isoleret, men det er jo klart, at ligegyldig hvor lidt materiale vi bruger og hvor længe vi bruger det, så kommer der jo en affaldsmængde på et tidspunkt" (Jensen, 2022).

John Korsgaard, LM Wind Power, supplerer med, at vindmøller og dermed også vindmøllevinger bliver designet til bestemte vindklasser, men de bliver ofte opstillet på lokationer, som har mindre vindstyrke end de vindklasser, som de er designet til. Ved design af en vindmølle/vindmøllevinge regnes med en "svigt sandsynlighed", så mølle og rotorvinger med 95 procent sandsynlighed vil kunne overleve designlaster med 95 procent konfidens. Dette betyder, at der er lave svigtsandsynligheder inden for designlevetiden. Ved levetidsforlængelse forøges svigtsandsynligheden, hvis dele ikke udskiftes (hvilket ofte ikke er nødvendigt). Der indføres ofte forøget inspektion og vedligehold for at tage hånd om den forøgede svigtsandsynlighed (Korsgaard, LM Wind Power, 2022).

Levetidsforlængelse som et bæredygtighedsgreb er derfor en relativ integreret proces og mulig, hvis der kan opnås tilladelser til længere levetid f.eks. til havvindmøller, som i dag har en tilladelse på 25 år (med mulighed for at forlænge med 5 år, som reglerne er nu).

6.2 Hvilke forhold påvirker udbud af genanvendelsestilbud

6.2.1 Mangel på volumen er en udfordring

Green Power Denmark pointerer, at en af udfordringerne for genanvendelse af kompositaffald er mangel på volumen. Hvis der ikke er volumen nok, er der ikke basis for rentable genbrugsvirksomheder. Derfor er WindEurope gået sammen med kompositbrancheforeningen og den kemiske brancheforening på europæisk plan, hvor idéen er at få samlet kompositaffald på tværs af industrierne, f.eks. fra skibe, store siloer mv., og få det kategoriseret, så det kan anvendes samlet til forskellige nye produkter. Som eksempel nævner Green Power Denmark terrassebrædder eller andet, hvor genbrugskompositens egenskaber måske er mindre vigtige, end hvis den skulle anvendes i en nacelle. Green Power Denmark påpeger, at man kigger ind i et scenarie, hvor de nuværende vindmøller er "en pose blandede bolsjer", hvilket vingeaaffaldet også vil være. Fremadrettet vil der blive installeret mange tusinde vindmøller, hvilket vil medføre meget større mængder vingeaaffald, når de om 25-35 år er udtjente (Green Power Denmark, 2022).

Jonas Pagh Jensen, Siemens Gamesa, pointerer også, at der pt. ikke er volumen nok til rentabel drift af genbrugsvirksomheder. Han peger på de høje energipriser, som gør det ekstra dyrt at behandle vingeaaffaldet. Samtidig betyder de nuværende høje energipriser, at der ikke bliver nedtaget vinger, da vindmøllerne stadig giver god indtjening på elproduktionen. "Der var ikke særlig meget volumen i forvejen, og nu er der så absolut ikke noget. Vores konklusion er, at der vil være en svær periode nogle år frem". Det er svært at få nogen til at investere i og drive

genbrugsvirksomheder, fordi der ikke er kompositaffald nok til 8 timers daglig drift, hvilket er nødvendigt, hvis man har et dedikeret anlæg. "Lad os sige at sådan et anlæg koster 80 millioner – det er ikke helt urealistisk - hvis du skal afskrive det, så er du nødt til at have noget materiale igennem, ellers ringer banken på et tidspunkt" (Jensen, 2022).

Allan K. Poulsen, Vestas, peger ligeledes på volumen og kontinuitet som værende de store problemer for genanvendelsesvirksomheder. "Problemet er, at hvis man har en produktion der er afhængig af stabil forsyning af råmaterialer, og der ikke kommer nok, så er det ikke attraktivt at kigge i den retning. Der er ikke nogen værdikæde, og vi ved reelt ikke, hvornår vindmølleleveringerne kommer" (Poulsen, 2022).

6.2.2 Initiativer der kan fremme genanvendelses af materialer

Allan K. Poulsen, Vestas, pointerer, at det er nødvendigt at skabe en efterspørgsel på genanvendte materialer, så genbrugsvirksomhederne kan sikres stabile forsyninger af kompositaffald. Netop afhængigheden af en enkelt affaldsfraktion som mølleleveringer, er pt. den største risiko for en genbrugsvirksomhed. Der er ikke etableret nogen værdikæde, og det er ikke muligt at skalere produktionen (Poulsen, 2022). Netop forsyningskæden kan få stor negativ betydning for kommende genbrugsvirksomheder. Hvis en genbrugsvirksomhed kun skulle være baseret på dansk kompositaffald, så vil der i følge prognosen i Figur 6 være et hul i forsyningerne i årene fra 2029 til 2033. Det skyldes, at der for 25 år siden ikke blev opstillet vindmølleparker i en årrække. Set fra en forsyningskædeproblematik med affald som råvare, vil der være et hul i de forsyninger, som en produktion skal bygge på. Hvis en genbrugsvirksomhed derimod baserer sig på en geografisk spredt forsyningskæde, f.eks. vingeaffald fra Sverige, Tyskland og Frankrig, bliver forsyningsikkerheden større. På den negative side vil denne løsning medføre øgede transportomkostninger og større CO₂-udledning fra transport (Korsgaard, LM Wind Power, 2022).

6.2.3 Omfordeling af priser på nyt og genanvendt materiale

John Korsgaard, LM Wind Power, pointerer, at der er behov for at gøre det mere attraktivt at sende vinger til genanvendelse. "Så længe jomfruelige materialer er billigere end genanvendte, så tror jeg det bliver en hård kamp. Så hvis man kunne finde et set-up, hvor man kan omfordele nogle omkostninger på de jomfruelige materialer, så de genanvendelige materialer bliver konkurrencedygtige – det tror jeg simpelthen er nødvendigt." (Korsgaard, LM Wind Power, 2022). John Korsgaard, LM Wind Power, tilføjer, at det bliver nødvendigt at gå på tværs af sektorerne og finde materialetyper, der er sammenlignelige, f.eks. vindmølleleveringer og glasfiberbåde. "I store træk er det jo de samme materialetyper der indgår. LM Wind Power er jo tidligere bådebyggere, så det er fordi vi kendte til det at producere med glasfiber, at vi overhovedet kom ind i vingeindustrien" (Korsgaard, LM Wind Power, 2022).

6.3 Branchens praksis på bortskaffelse og nyttiggørelse

John Korsgaard, LM Wind Power, fortæller, at virksomheden har benyttet den tyske genbrugsvirksomhed neocomp til at aftage deres affald. Men i følge John Korsgaard har neocomp¹ trukket sig ud af markedet i foråret 2022, fordi der ikke var volumen nok (forretningen blev for lille). Det til trods for at flere i vindenergiindustrien brugte neocomps løsning, hvor knust komposit blandes med papiraffald og sælges som brændstof til cementindustrien (cementruten, se kapitel 4). LM Wind Power har endvidere lejlighedsvis leveret materiale fra test- eller restproduktion til miljøskærme.

Allan K. Poulsen, Vestas, nævner, at virksomheden har haft dårlige erfaringer i bl.a. USA med at sende vingeaffald andre steder hen end til cementruten (Poulsen, 2022).

¹ Neocomp er meldt konkurs i foråret 2022 på grund af manglende volumen på kompositaffald og formentlig de stigende energipriser.

6.3.1 Kunne det være aktuelt at etablere genvindingsanlæg i Danmark?

Allan K. Poulsen, Vestas, mener ikke, at det kan betale sig at etablere et genvindingsanlæg i Danmark. Han forklarer, at hvis man tegner en cirkel omkring de områder, hvor vindmøllerne er, så er det i denne cirkels centrum en genbrugsvirksomhed skal placere sig i forhold til, hvor langt det kan betale sig at transportere vingeaffaldet, f.eks. 300 km. Denne øvelse vil vise, at en genbrugsvirksomhed som udgangspunkt ikke skal ligge i Danmark. Lokale løsninger er kostbare og han er bekymret for, at der ikke er volumen nok (Poulsen, 2022).

John Korsgaard, LM Wind Power, understreger, at hvis det er en fordel for cementindustrien at anvende brændsel fremstillet af vingeaffald, og der er et gunstigt CO₂-regnskab, så vil de gøre det. Ud over denne forholdsvist simple mekaniske proces vurderer han, at den mere avancerede pyrolyseproces (omtalt i kapitel 4) fører til pyrolyseolie, hvilket der kan findes aftagere til. Dermed burde pyrolyseprocessen kunne blive rentabel, hvis pyrolyseolien kan afsættes til en konkurrencedygtig pris (Korsgaard, LM Wind Power, 2022).

Allan K. Poulsen, Vestas, er enig i, at udbyttet af pyrolyse er en kommercielt interessant oliefraktion, som kemivirksomheder gerne vil aftage. Men pyrolysevirkomhederne har også problemer med at få affald nok. Allan K. Poulsen mener, at genanvendelsesteknologiernes fælles problem er, at der ikke er vingeaffald nok til drive en rentabel forretning, med mindre andre industriers kompositaffald kan indgå (Poulsen, 2022).

Jonas Pagh Jensen, Siemens Gamesa, er med hensyn til cementrutens muligheder, meget på linje med John Korsgaard, LM Wind Power. Han mener, "at hvis cementruten skulle være rentabel i Danmark, ville der være behov for 12.000 ton vingeaffald om året fra Danmark, som ikke må importere kompositaffald. Det vil betyde at først i cirka 2046, når havmøllerne kommer ned, ville en cementfabrik have kompositmateriale nok, under forudsætning af at de kan få hele den volumen, der tages ned, og sådan fungerer det åbne marked ikke (Jensen, 2022).

Jonas Pagh Jensen, Siemens Gamesa, fortæller, at virksomheden genererer procesaffald, som for størstedelens vedkommende ikke er kompositaffald. Siemens Gamesa har rammeaftaler med virksomheder, der håndterer affaldet. Det opdeles i fraktioner efter genanvendelsesmetoder, og for nogle af fraktionernes vedkommende er der en returordning med leverandørerne. Derfor foregår Siemens Gamesas affaldshåndtering på en relativ standardiseret måde. Virksomheden entrerer med affaldsfirmaerne, som har licens til at transportere de opdelte affaldsfraktioner og har erfaring med affaldskoder og ISO-certificering. Med hensyn til solgte møllevinger er det kunden (dvs. ejeren), som på et eller andet tidspunkt har et bortskaffelsesansvar. Der kan i løbet af garantiperioden være tilfælde, hvor Siemens Gamesa i Danmark har et bortskaffelsesansvar, og her bruger virksomheden den tyske cementrute. Der er ikke anvendt deponering i mange år. Selv tørt glas sendes heller ikke længere til deponeringsanlæg, men går til virksomheden UComposites, som behandler glasset som råmateriale og sælger det videre til bilindustrien, hvor det for eksempel anvendes til akustik og isolering i døre m.v. (Jensen, 2022).

6.3.2 Hvilke genanvendelsesmetoder arbejder de danske affaldsfirmaer med?

En af de genanvendelsesvirksomheder, der nedtager vindmøller, er HJHansen Recycling Group. De har konceptet "Wind Decom", som er en samlet løsning til nedtagning af landvindmøller og genanvendelse af materialerne. Sophus Borch, forretningsudviklingschef i HJHansen Recycling Group, fortæller, at virksomheden arbejder med tre muligheder for genanvendelse, nemlig pyrolyse, medforbrænding med cement og støjskærme (Borch, 2022). I rapportens bilag 4 er et eksempel fra dansk nedtagningsfirma på, at der køres på EAK-affaldskoder for plastikaffald, når det drejer sig om transport af udtjente vindmøllevinger fra Danmark til nyttiggørelse i Tyskland, typisk til medforbrænding i cementproduktion.

6.4 Opsummering på deponeringsforbud

De danske producenter og de store parkejer i vindenergibranchen er enige om, at vindmøllevinger ikke længere skal lægges på deponipladser. Men pt. er der ingen realistiske alternativer. I Tyskland er vingeaffald hidtil indgået i cementproduktion gennem virksomheden neocomp, der nu er lukket. Derfor er der et stort behov for at finde alternative løsninger. Green Power Denmark kan gennem branchen for nedtagning konstatere, at langt over halvdelen af nedtagne møller bliver videresolgt, og den anden halvdel kommer simpelthen ikke ned, som forventet. "Derfor rykker man jo hele tiden væk fra, hvornår der overhovedet er noget at genanvende. Det er klart bedre at genbruge vingerne til det, de er skabt til" (Green Power Denmark, 2022).

Green Power Denmark har vurderet mulighederne for et såkaldt "partial repowering" projekt. Idéen er, at en ældre vindmølle renoveres med henblik på både levetidsforlængelse og øget effektivitet. Et eksempel kan være en ældre 500 kW vindmølle, der står et sted, hvor der ikke kan placeres en større vindmølle. Her kan vingerne skiftes ud med vingerne fra en 600 kW mølle. Vindmøllen bliver måske 5 meter højere, den bliver mere effektiv og den kan måske også gøres pitch-reguleret i stedet for stall-reguleret, hvilket betyder, at vindmøllens computer kan dreje vingerne både i forbindelse med effektregulering (for optimal retning mod vinden) og som sikkerhed, når vindmøllen stoppes i stærk vind, som også er en fordel for elnettet (Energistyrelsen, 2022). Vingerne fra 500 kW møllen kan genbruges ved at udskifte de eksisterende vinger på en endnu mindre mølle og så fremdeles. "Skaleres det op til en 1 MW mølle, vil det formentlig have interesse for en stor del af de mange vindmølleejere af ældre vindmøller. Det levetidsforlænger både vingerne og møllerne. Det er cirkulært, og vi har vurderet, at 90 procent af de 3.500 ældre møller i Danmark kan opgraderes på denne måde" (Green Power Denmark, 2022). Green Power Denmark er i løbende dialog med de virksomheder, der nedtager møllerne og videresælger dem, og vurderingen fra en af dem er, at 80 procent af de møller, som de håndterer, bliver videresolgt. Branchen vurderer dog, at færre møller fremover vil kunne videresælges, da de er så udtjente, at de ikke kan køre mere (Green Power Denmark, 2022).

6.5 Hvilke miljø-og affaldsregler kan understøtte en cirkulær økonomi på komposit?

CEO i WindEurope, Giles Dickson, har udtalt i en pressemeddelelse (af 16 juni 2021), at der blandt deres medlemmer er vedtaget en fælles forpligtelse om at stoppe deponering af vindmøllevinger fra 2025, hvilket vil bidrage til udvikling af kommercielt levedygtige metoder til bæredygtig genanvendelse (WindEurope, 2021).

6.5.1 Er den danske branche klar på et forbud mod deponering?

Green Power Denmark bakker, sammen med de øvrige store virksomheder i vindenergibranchen og WindEurope, op om et forbud mod deponering af vindmøllevinger og øvrige glasfiberkompositdele (f.eks. rotor og nacellehus). Green Power Denmark fortæller, at 2025 er sat som mål i Europa, fordi der skal være tid til at finde alternative muligheder. Vindenergibranchen finder det vigtigt, at der kommer en lovgivning, bl.a. for at forhindre, at enkelte private mølleejere fortsat deponerer, hvis det fortsat er muligt i enkelte EU-lande (Green Power Denmark, 2022). Lovgivning vil gøre det nemmere for hele branchen, og det vil både give incitament og større investeringssikkerhed for de virksomheder, der vil investere i genbrugsløsninger. "Vi skal hæve barren og være sikre på, at vingerne bliver genanvendt i stedet for at blive kørt på deponipladser. Det er bagtanken med den udmelding vi er kommet med" (Green Power Denmark, 2022).

Både Allan K. Poulsen, Vestas, og John Korsgaard, LM Wind Power, mener, at det bliver vanskeligt at etablere cirkulære værdikæder på genanvendelse, så længe nye materialer er billi-

gere end de genanvendte. En mulighed er at vingeffaldet deles helt op, så resinen kan gå tilbage til kemiindustrien og fibrene til glasindustrien. De pointerer, at de har et tæt samarbejde, da Vestas køber vinger hos LM Wind Power, men normalt ser de stærk konkurrence mellem vindmøllevirksomhederne. De mener dog, at industrien har accepteret, at det er et fælles industriproblem, hvilket kommer til udtryk gennem projekter som DecomBlades med fokus på genanvendelse og etablering af cirkulære værdikæder (omtalt i afsnit 6.6) (Korsgaard, LM Wind Power, 2022) (Poulsen, 2022).

6.5.2 Hvad med udbuds krav: er det et instrument til øget cirkularitet?

Allan K. Poulsen, Vestas, fortæller, at branchen i øjeblikket diskuterer, hvordan bæredygtighedskrav kan skrives ind i udbudsmaterialet (for bud på vindmølleparker). Det er dog ikke så enkelt, "Den ene producent kan måske tilbyde en genanvendelig vinge, mens den anden producent måske tilbyder en proces, der også kan genanvende materialerne, og hvordan skal det så vægtes i vurderingen af buddene? Derfor er det vanskeligt at lægge sig fast på en enkelt teknologi på et tidspunkt, hvor der udvikles adskillige genbrugsprocesser. Markedet er simpelt hen endnu ikke modent nok, og der vil også være store usikkerheder forbundet med at bruge udenlandske underleverandører", fortæller Allan K. Poulsen (Poulsen, 2022).

John Korsgaard, LM Wind Power, ville være meget bekymret, hvis et udbud favoriserer en speciel teknologi eller en speciel materialetype, da det ville være konkurrenceforvridende. Udbuds krav kan således hurtigt føre til konkurrenceforvridning i forbindelse med udbud af nye vindmølleparker (Korsgaard, LM Wind Power, 2022). John Korsgaard, LM Wind Power, pointerer, at set i et dansk perspektiv vil det fremover i højere grad være institutioner, der investerer i vindmølleparker og de sætter samtidig penge af til bortskaffelse. Allerede i dag skal der være en plan for dekommissionering i forbindelse med tilladelse til at opføre en vindmøllepark. Tilsvarende ordninger gælder mange andre lande i Europa, men reglerne er ikke ens. Det bør de være på europæisk plan. "Det giver ikke mening med lokale regler og lokal fortolkning af hvornår noget er genanvendt og hvornår det ikke er – det er bare fordyrende" (Korsgaard, LM Wind Power, 2022). Med fordyrende mener han, at der i så fald skulle skræddersyes bud til hvert lands lokale regulering, i stedet for til EU-krav.

Allan K. Poulsen, Vestas, mener også, at der gennem WindEurope bør være fælles europæiske standarder og fælles europæiske krav (Poulsen, 2022). Allan K. Poulsen har erfaret, at Tyskland arbejder med udvidet produktansvar, som indebærer, at leverandøren skal tage vingerne tilbage. Men erfaringer fra elektronikbranchen tyder ikke på, at det er den rigtige vej at gå. "Det er vigtigere at undersøge, hvordan man får mest værdi ud af kompositmaterialerne, i stedet for standarder, der sætter en given retning, som måske virker fornuftig lige nu, men om to år er det måske forældet teknologi. Standarder risikerer på nuværende tidspunkt at stoppe innovation". En form for CO₂-afgift kunne give en fordel til genanvendte glasfibre og genanvendt resin (Poulsen, 2022).

6.5.3 Deponeringsforbud i EU Landfill Direktivet og nye affaldskoder

EU har fastsat de overordnede rammer for affaldsreguleringen i affaldsdirektivet og andre regler for specifikke affaldsfraktioner. Reglerne skal beskytte både menneskers sundhed og miljøet, men også sikre, at de virksomheder som beskæftiger sig med affald, har så ens vilkår som muligt. EU affaldsdirektiv (direktiv 2018/851/EC som ændrede direktiv 2008/98/EF) følger affaldshierarkiet med særligt henblik på at mindske fraktionen af det affald, som deponeres. Reguleringen af deponering skal følge EU Landfill Direktiv (1999/31/EC), direktiv, som foreskriver at affald, som må deponeres, er affald som ikke kan genbruges, genanvendes eller energiudnyttes. Enten fordi det ikke kan brændes, f.eks. fordi det udleder giftig røggasser, når det brændes, eller fordi der endnu ikke findes konkurrencedygtige teknologier for genanvendelse på markedet (EU Kommissionen, Landfill waste, 2023). EU Landfill Direktiv fremhæver

brugen af økonomiske incitament til anvendelse af affaldshierarkiet, såsom afgifter for deponering af affald og regulering af affald indeholdende organisk materiale (EUR-LEX; EU Commission, 2023).

Jonas Pagh Jensen, Siemens Gamesa, tolker Landfill Direktivet således, at hvis der eksisterer alternative løsninger, så skal man gøre brug af dem, i stedet for at deponere. Speciallovgivning på området kan måske føre til dobbeltlovgivning. Jonas Pagh Jensen kunne godt forestille sig en pantordning som en mulighed, men han pointerer, at værdien af genanvendelse er lav, fordi den ligger om f.eks. 35 år. Derfor bør det økonomiske incitament flyttes tidligere op i levetiden. Er der f.eks. for 100.000 Euro værdi i materialerne, og det bliver nedskrevet 35 år frem i tiden, så er der måske for 5.000 i nutidsværdi. Så er der et meget lavt incitament for at gøre noget. "Man er nødt til at gøre et eller andet, hvis man vil have, at vi skal komme over i vinger 2.0 eller 3.0, hvor man favoriserer genanvendelighed" (Jensen, 2022).

For Green Power Denmark er det vigtigt, at et forbud mod deponering af vindmøllevinger bliver indført i Landfill Direktivet. Dernæst er der behov for at indføre affaldskoder, som bedre matcher kompositterne. Både lovgivning og affaldskoder skal understøtte genbrug og genanvendelse. Green Power Denmark støtter op om en kommende IEC-standard for en sikker nedtagning af vindmøller. "Vindmøllen skal nedtages på en miljømæssig forsvarlig måde, så den ikke påvirker sit nærmiljø i den forbindelse" (Green Power Denmark, 2022). WindEurope har udarbejdet en guideline til nedtagning, og den er undervejs til at blive en IEC-standard. "Det er noget branchen har medvirket til og leveret input til, fordi vi gerne vil have det her", siger Green Power Denmark. Green Power Denmark minder dog også om, at der er et sweet spot mellem at få udarbejdet en god standardisering og virksomhedernes muligheder for at finde de bedste løsninger. Hvis en standardisering er for restriktiv eller specifik, kan det forhindre innovative løsninger på et område, som alt andet lige er forholdsvis ungt, og hvor genanvendelsesudfordringerne formentlig kan løses på væsentligt mere effektive måder end dem, der kendes i dag (Green Power Denmark, 2022). Green Power Denmark peger på, at bæredygtighed ikke kun handler om et end-of-life-perspektiv på produktet, men for hele cyklussen og at bæredygtighed skal ind i udbuddene i hele Europa. En måde at arbejde med bæredygtighed generelt i værdikæden er gennem de krav, der stilles i havvindsudbuddene - både i Danmark og i Europa. Her vil der formentlig fremadrettet indgå krav, hvor bæredygtighedsvurderingen ikke kun skal gælde slutproduktet, men eksempelvis også produktionen på fabrikken, arbejdsmiljøet i værdikæden, etableringsfasen, installationsskibets brændsler eller CO₂-udledninger fra stålproduktion mv. (Green Power Denmark, 2022).

6.6 Innovationer

6.6.1 Er fremtidens vindmøllevedesdesign genanvendeligt?

Jonas Pagh Jensen, Siemens Gamesa, fortæller, at lige nu er de genanvendelige vinger dyrere, hvilket ikke bliver værdiansat i udbuddene. Derfor er det en mulighed, som kunden aktivt skal vælge til, "lidt ligesom hvis man vil have økologisk mælk eller ej". Altså skal vindmølleejeren være villig til at betale ekstra for det bæredygtige aspekt. Siemens Gamesa håber, at det bliver et standardprodukt, hvilket vil kræve, at de enten får mere konkurrence på materialesiden, eller at myndighederne begynder at efterspørge bæredygtige vinger. De bæredygtige vinger er identificerbare gennem mærkning, så når møllerne til sin tid skal nedtages, medfølger der en manuel for adskillelse og genanvendelse (Jensen, 2022). I CETEC-projektet har Vestas i samarbejde med en resinproducent udviklet en resin, som gør det muligt at producere genanvendelige vindmøllevinger (Red: ved opvarmning vil resinen slippe fibre lettere og dermed kan man adskille fiber og resin). Det er en ny type resin, som resinproducenten Olin vil kunne tilbyde til andre produkter og dermed ikke en patenteret løsning (Green Power Denmark, 2022). Også Zebra-projektet med LM Wind Power arbejder med at designe genanvendelige vindmøllevinger med en ny resin (Korsgaard, LM Wind Power, 2022). Initiativer fra de danske

vindmølleproducenter placerer sig med designvinklen øverst i affaldshierarkiet på affaldsforebyggelse med design for genanvendelse.

6.6.2 Hvorfor vælger man ikke den samme resin?

Forretningsudvikler Sophus Borch fra HJHansen (Borch, 2022) efterlyser mere samarbejde om materialestrømmen mellem producenterne i Danmark, og han nævner som eksempel spørgsmålet om, hvorfor hver vindmølleproducent skal have hver sin resin. Men i følge Green Power Denmark er det netop dette, som vindmølleproducenterne konkurrerer på. Green Power Denmark finder det meget vigtigt, at genanvendelsestiltag ikke må bremse tidlig innovation (Green Power Denmark, 2022). Der er masser af konkurrence om, hvordan en specifik vindmølle er fremstillet, og vingernes præcise sammensætning er afgørende for, hvordan den opfører sig i vinden, hvor længe den kan holde osv. Hvis der var regler for indholdets sammensætning, ender man med et strømlinet produkt, der ikke udvikler sig, eller kun inden for et snævert område. Green Power Denmark fremhæver, at grunden til at Danmark er en vindmølleinnovation netop er innovation, hvilket vi som samfund ikke har råd til at give slip på, heller ikke hvis man ønsker grøn omstilling. Det handler om, at man laver de bedste vindmøller til at fremme den grønne omstilling (Green Power Denmark, 2022). Green Power Denmark pointerer, at vindvirksomhederne løbende arbejder med innovation, og at virksomhederne ikke bør være tvunget til at innovere på en ensartet måde. De innovationer, som vindvirksomhederne introducerer nu, bliver først relevante for genbrugssektoren, når disse vindmøller bliver nedtaget om måske 25-35 år fra nu (Green Power Denmark, 2022).

6.7 Affaldskoder og mobilitet

WindEurope er i dialog med glasfiberbrancheforeningen og kemibrancheforeningen om at samle glasfiberkompositter fra forskellige sektorer for at skabe mere volumen. Det kræver, at der indføres relevante affaldskoder i affaldsdirektivet, lige som der er et stort behov for at få ensrettede regler for transport af kompositaffald over landegrænserne. Så længe der i de enkelte EU-lande ikke er volumen nok i affaldet fra glasfiberkompositterne, bliver man nødt til at transportere kompositaffaldet over en vis afstand for at kunne skabe volumen nok til en rentabel genanvendelsesforretning. Derfor er det nødvendigt at indsamle kompositaffald på tværs af landegrænser (WindEurope, 2020). Green Power Denmark sidder med i WindEurope's arbejdsgruppe om bæredygtighed, og i denne er de blevet bedt om at undersøge, hvordan lovgivningen er, og i hvilken grad der er fri bevægelighed over grænserne. Som Green Power Denmark ser det, er der behov for nye Basel koder og nye koder i affaldsdirektivet, så disse dækker kompositmaterialer. Det er vigtigt, at der indføres Basel koder, som gør det nemt at transportere kompositaffaldet over grænserne. Sporbarhed skal sikre, at kompositaffaldet bliver betragtet som en ressource til f.eks. forbrænding med energiudnyttelse, eller til genanvendte fiber til f.eks. ski i Norge eller solcellestativer i Holland, som der er eksempler på (Green Power Denmark, 2022).

Sophus Borch fra HJHansen, ser en udfordring i mobiliteten omkring transport af kompositaffald over landegrænser. Der eksisterer et notifikationssystem for grænseoverskridende transporter. "For os kan notifikationssystemet (Red: som det er nu) betyde ventetider på op til ni måneder, foruden at det i Danmark koster cirka 30.000 kroner at starte en notifikation op. Denne proces er besværlig, når det f.eks. blot drejer sig om at få udført en test på at få om-dannet et bestemt kompositmateriale på et anlæg i Tyskland. En løsning kunne være et fast-track forløb for at sende prøver til test hos potentielle genbrugsvirksomheder i udlandet". HJHansen er ikke imod sikkerhedsstillelsen, blot det bliver muligt at sende mindre mængder til test i produktionen hos en potentiel kunde, sådan at det ikke hæmmer afsøgningen af etablering af en værdikæde (Borch, 2022).

7. Udvaskning fra vindmøllevinger i deponeringsanlæg

Miljøstyrelsen har bedt en separat rådgiver om at foretage en undersøgelse, der skal belyse, om der kan ske nogen stofudvaskning fra vindmøllevinger placeret på et deponeringsanlæg. Dette arbejde har resulteret i rapporten ”Screeningsundersøgelse af udvaskning fra vindmøllevinger”².

Der er i dette arbejde foretaget en gennemgang af tilgængelig litteratur om stofudvaskning af især per- og polyfluoralkylstoffer (PFAS) og bisphenol A (BPA) fra vindmøllevinger og andre glasfiber-produkter i relation til deponering. Det blev konstateret, at:

- Der findes ingen specifikke danske (og heller ikke udenlandske) data vedr. udvaskning fra deponerede vindmøllevinger.
- Der findes ingen specifikke danske (og heller ikke udenlandske) data vedr. udvaskning fra deponerede glasfiberkomposit(er).
- Selv om perkolat fra deponier, baseret på forfatterens erfaringer, er en af de største ikke-direkte (hvor direkte omfatter produktion og anvendelse) kilder af PFAS, findes der ingen data (udenlandske eller danske) om udvaskning af PFAS (eller BPA) i perkolat fra deponier som vil være direkte knyttet til deponerede glasfiberkomposit, epoxy, eller PUR.

Der blev desuden indsamlet prøvemateriale fra udtjente vindmøllevinger, produktionsaffald fra fremstilling af vindmøllevinger og vindmøllevinger, der allerede var anbragt på et deponeringsanlæg. Med hensyn til den potentielle usikkerhed relateret til krydskontaminering af prøverne forud for testning anses disse ikke for at være ens, da nogle af dem var indsamlet direkte af projektteamet fra et deponeringsanlæg, mens andre blev leveret af tredjepartsvirksomheder eller direkte af producenter.

Prøverne blev underkastet to slags tests, nemlig såkaldte batchudvaskningstests, hvor materialet nedknes til en partikelstørrelse på mindre end ca. 4-10 mm og anbringes i kontakt med vand under agitation, og tankudvaskningstests til undersøgelse af, om der ved kontakt med vand frigives stoffer fra overfladen af hele stykker af materialerne. Vandfaserne (eluate) fra testene blev derefter analyseret parallelt hos to forskellige laboratorier for: (i) indhold af 22 PFAS'er samt BPA hos ALS i Tjekkiet og (ii) indhold af 35 PFAS'er hos Laboratory of Environmental Biotechnology, Institute of Microbiology at Czech Academy of Sciences (KU). 16 af de 22 PFAS'er indgik også i de 35 PFAS'er, så alle eluate blev analyseret for 41 forskellige PFAS'er. Da testningen af udvaskningsegenskaberne ikke blev udført som replikater, og da de fundne indhold af PFAS er meget lave (og derfor behæftet med en betydelig måleusikkerhed), bør nedenstående resultater af screeningen kun ses som foreløbige indikationer:

² Hyks, J. & Hjelmar, O. (2023): Screeningsundersøgelse af udvaskning fra vindmøllevinger. Miljøprojekt nr. 2242. Miljøstyrelsen, Miljøministeriet.

- De samme PFAS-forbindelser (PFHpA, PFOA, PFNA, PFOS) blev identificeret af to forskellige laboratorier i kvantificerbare mængder (mellem 0,2 og 9,7 ng/l for de enkelte forbindelser, svarende til 2-97 ng/kg) i eluaterne fra batchudvaskningstests udført på tre materialer, indsamlet og leveret af en affaldsbehandlingsvirksomhed i knust form. 6:2 FTS blev identificeret i eluat fra de samme materialer på et niveau af 0,4-1,5 ng/l (svarende til 4-15 ng/kg); dette blev dog ikke bekræftet på begge laboratorier. Desuden blev PFHxA identificeret af begge laboratorier i koncentrationer på 0,7-3,7 ng/l i eluat fra prøvemateriale leveret af en anden affaldsbehandlingsvirksomhed.
- PFHxA og PFHpA blev identificeret i kvantificerbare koncentrationer (mellem 0,4 og 3,7 ng/l, svarende til mellem 4 og 37 ng/kg testet materiale) i eluaterne fra batchudvaskningstests udført på to prøver, der blev indsamlet på plade-form på et deponeringsanlæg og knust som en del af prøveforbehandlingen.
- De mest "forurenede" prøver blev alle indsamlet på et fuldskala-shredderanlæg, der håndterer forskellige typer affald, herunder metalskrot og kabelskrot. Det kan derfor ikke udelukkes, at alle eller nogle af de identificerede PFAS'er i eluaterne fra disse prøver stammer fra krydskontaminering af prøverne under knusningen.
- Resultaterne fra tankudvaskningstestene viste både lavere koncentrationer og lavere antal af de kvantificerbare PFAS'er i eluaterne i forhold til batchudvaskningstestene. I modsætning til resultaterne for de knuste prøver blev der i eluaterne fra de tre tanktests på prøverne fra deponeringsanlægget kvantificeret NaDONA (33-60 ng/l) og FRD903 "GenX" (4,3-5,8 ng/l), der begge tilhører såkaldte "next-generation" PFAS'er. Eluat fra fire andre tankudvaskningstests viste ingen kvantificerbare mængder af disse forbindelser. Hverken NaDONA eller FRD903 "GenX" indgår i de danske summeringsgrænseværdier Σ 4PFAS og Σ 22PFAS.
- Mindre mængder af 6:2 FTS blev identificeret hos KU-laboratoriet i eluater fra flere tankudvaskningstests. Dette blev dog ikke bekræftet af resultaterne fra ALS-laboratoriet, og det kan nævnes, at 6:2 FTS også blev identificeret i vandet fra blindprøven med ståltråden til fastholdelse af prøven på KU-laboratoriet.
- BPA blev identificeret i de fleste af eluaterne fra batchudvaskningstestene (mellem 3 og 59 μ g/l svarende til 30-590 μ g/kg testmateriale) og i alle eluaterne fra tankudvaskningstestene (mellem 0,06 og 0,24 μ g/l).

På det foreliggende grundlag, som må betegnes som en screeningsundersøgelse, kan det konstateres, at der sandsynligvis kan udvaskes BPA fra vindmøllevinger. Derudover kan det ikke udelukkes, at der efter deponering kan udvaskes kvantificerbare mængder PFAS fra vindmøllevingeaffald, især efter knusning. De målte niveauer er meget lave, og forfatterne vurderer ikke, at de i givet fald vil kunne bidrage synligt til den samlede PFAS-udvaskning observeret i perkolat fra deponeringsanlæg, som generelt er flere størrelsesordener højere. I betragtning af den miljømæssige persistens og mobilitet af nogle PFAS'er, kombineret med årtiers udbredt anvendelse, som har resulteret i PFAS-tilstedeværelse i overfladevand, grundvand, drikkevand, regnvand, jord, sediment, luft, planter, og humant blodserum over hele kloden, og en dermed forbundet risiko for krydskontaminering af prøver med PFAS, især ved forbehandling udenfor laboratoriemiljøet, og det begrænsede antal prøver samt meget lave koncentrationsniveauer, må det anbefales, at der gennemføres yderligere undersøgelser under fuldt kontrollerede forhold på et større antal prøver og med replikatbestemmelser, hvis man ønsker at kunne drage endelige konklusioner om mængde og betydning af udvaskning af PFAS fra glasfiberprodukter, herunder særligt vindmøllevinger.

Det skal understreges, at de koncentrationer, som i dette projekt er målt i eluaterne fra udvaskningstestene, afhænger af testbetingelserne, og at de derfor IKKE kan sammenlignes direkte med diverse grænseværdier for stoffer i grundvand og overfladevand. En eventuel vurdering i forhold til grænseværdier forudsætter, at der på et relevant datagrundlag gennemføres en egentlig risikovurdering baseret på modellering af konkrete scenarier.

8. Konklusion

Dette kapitel opsummerer og konkluderer på kortlægning af affaldsmængder fra vindmøllevinger, inklusion dialog med branchen om fremtidsprognoser. Rapporten redegør for, hvordan en mere cirkulær affaldshåndtering og udvikling af genanvendelsesteknologier til håndtering af fremtidige affaldsmængder. Et fælles EU-forbud mod deponi af vindmøllevinger og lignende affaldskompositter vil skubbe på innovation.

8.1 Affaldsstrømme og prognoser

Affaldsmængder fra vindmøllevinger og nacellehus er beregnet ud fra den eksisterende mølleflåde i Danmark. Der vil i perioden 2022-2052 være akkumuleret mindst 105.000 ton vingefald og ca. 16.000 ton affald fra møllehuse ud fra en prognose på at eksisterende landmøller i gennemsnit lever 30 år og 25 år for havvindmøller før de nedtages. Det vil sige mindst 121.000 ton glasfiberkompositaffald, som potentielt kan sendes på deponeringsanlæg i Danmark. Et prognosetal, som er uden at medregne eventuelt procesaffald fra produktion og service.

Prognoseerne er baseret på 2022 udtræk fra Energistyrelsen af levende stamdata over vindmøller. Hvert år udkommer Energistyrelsen med et opdateret overblik over vindmøller og parkanlæg tilsluttet elnettet og oplysninger om levetidsændringer for landmøller. Det er vigtigt at understrege at der er tale om potentielt affald når det gælder en fremtidig fremskrivning og at prognoserne er forbundet med en vis usikkerhed for hvornår den faktiske nedtagning af vindmøller vil finde sted.

I modsætning til havvindmøller, hvor tilladelser gives for 25 år – med mulighed for forlængelse i 5 år, har landmøllerne som sådan ikke nogen udløbstidstid på deres tilladelser. Der findes en teknisk certificering, men historien viser, at det ikke er tekniske begrænsninger, der driver nedtagningen. Det sker typisk på grund af økonomiske incitamenter, f.eks. at man kan sætte en større vindmølle op. På et tidspunkt kan det blive besværligt at få reservedele og drift mv., men vindmøllerne nedtages ikke blot, fordi de er udtjente, men fordi der er en økonomisk årsag. Det kan derfor være svært at forudsige, hvornår landmøllerne bliver nedtaget og hvad der skal ske med dem. I dag kan en levetid for en landvindmølle forventes at lægge et sted mellem 20 og 35 år. Nogle forudsiger endda, at enkelte modeller vil kunne være i drift i op til 40 år. I følge standardregisteret er der 39 landvindmøller, der her i 2022 er mere end 40 år gamle.

Det er et faktum, at vindmøllerne lever væsentligt længere end producenterne forventede. Ser man alene på nedtagne møller, så ville man måske konkludere at gennemsnitslevetiden er 18-20 år, men det skyldes at den samlede population ikke er taget ned endnu. Det har rapportens prognose taget højde for ved at indregne levealder af eksisterende landmøller og antager, at gennemsnitslevealderen for en landbaseret vindmølle i Danmark ligger omkring de 30 år. Det betyder samtidig, at den volumen, som man tidligere forventede blev nedtaget, er skubbet længere ud i fremtiden. Derfor kan man lægge mindst 5 år og maksimalt 10 år til de antagelser man hidtil har arbejdet med.

Der er i rapporten redegjort for, at estimater på 50 procent eller mere af nedtagne møller genbruges, enten ved videresalg af hele møller, eller som reservedele til levetidsforlængelse. For

en adspurgt virksomhed ligger deres tal på 80 procent. Dette tal forventes fremadrettet at falde, da flere af de ældre landvindmøller er tæt på at være udtjente og vil ikke kunne være i drift længere. Men meget tyder på at der er et velfungerende marked for videresalg og istandsættelse af ældre landmøller.

Vindmøllens faktiske levetid hænger også sammen med ejertypen. Mange nuværende landvindmøller er enkeltmandsejet og ejeren har på et tidspunkt investeret i at få den op. I dag koster en vindmølle 50-60 millioner kroner, som er mange gange fordoblet i pris (9-10 gange fordoblet i pris), men også i kapacitet siden 1999, så der er langt færre private ejere, men mere investeringsselskaber og større parkejer, der sætter vindmøller op i dag end da møllerne var mindre, fordi der nu er meget større finansieringsbehov end tidligere. Ejerne af enkelte vindmøller vil typisk være interesseret i, at den er i drift så lang tid som muligt. Lige nu er der en stærk tendens til, at landvindmøllerne lever længere. Mange af de ældre landmøller er privatejede, og ejerne lader dem fortsætte med at levere elektricitet, så længe elpriserne er høje. Men hvis tendensen vender, kan det ske, at de ældre modeller bliver nedtaget tidligere på grund af økonomiske incitamenter. Det sker for at gøre plads til nye møller, som er mere energieffektive og har færre vedligeholdelsesudgifter.

Når landmøller tages ned, er det ofte én ad gangen, mens når havmølleparker afmeldes for nedtagning, kræver det leje af specialskibe med kraner og de vil derfor blive taget ned samlet på én gang - og affaldsmængderne vil således generes i storskala, som har sine økonomiske stordriftsfordele. Tag eksemplet fra kapitel 2 med Aflandshage havvindmøllepark, som vil stå klar i 2026 og kunne forsyne 300.000 husstande. Parken vil bestå af 26 vindmøller, hver med en kapacitet mellem 9,5 og 11 MW, og en samlet kapacitet op til 286 MW. Når denne havvindmøllepark skal nedtages 25-30 år senere, vil der være 5.000 ton glasfiberkompositaffald fra rotorvinger og nacellehus på én gang. Mængderne fra havvindmøller vil have en økonomisk fornuftig størrelse for processer til behandling for genanvendelse og genvinding.

8.2 Design for levetidsbrug og ikke udødelighed

Producenterne kan sagtens bygge vindmøller med en længere designlevetid på f.eks. 35 år. Det kan ske ved at forstærke bestemte steder på rotorvingerne. Samtidig kan man dreje vingerne en lille smule ud af vinden, når der er kraftig vind, for at mindske belastningerne. Dette bidrager til levetidsforlængelse. F.eks. har Siemens Gamesa omkring 9.000 folk, der arbejder med levetidsforlængelse, så dette bæredygtighedsgreb er allerede en velintegreret proces. Ligeledes bruger de fleste vindmølleproducenter sensorer i vingerne til måling af belastninger og en kontrolstrategi, der reducerer lasterne på konstruktionerne, så møllerne holder længere.

I modsætning til tidligere designpraksis, hvor man gik med livrem og seler, så designer man i dag til levealder. Det gør man som konsekvens af et bæredygtighedsprincip, som handler om ikke at over-designe og derved ikke at bruge mere materiale end nødvendigt. En forlænget levetid kræver forstærkning af slitagepunkter og dermed større materialeforbrug.

8.3 Udvaskning fra vindmøllevinger i deponeringsanlæg

Miljøstyrelsen har bedt en separat rådgiver foretage en screeningsundersøgelse af udvaskning af bisphenol A og PFAS fra vindmøllevinger i deponeringsanlæg. Dette arbejde har resulteret i rapporten "Screeningsundersøgelse af udvaskning fra vindmøllevinger". Resultaterne og konklusionerne herfra er gengivet i kapitel 7. På grundlag af en screeningsundersøgelse forbundet med betydelige usikkerheder, som især skyldes risikoen for krydskontaminering fra andre kilder til PFAS, konkluderes det, at der sandsynligvis kan udvaskes bisphenol A fra deponerede vindmøllevinger, og at det ikke kan udelukkes, at der efter deponering kan udvaskes kvantificerbare mængder af PFAS fra vindmøllevinger, især efter knusning af disse. De målte niveauer af udvasket PFAS er meget lave, og forfatterne (Hyks & Hjelmar, 2023) til rapporten af undersøgelsen vurderer ikke, at vindmøllevinger i givet fald vil kunne bidrage synligt til den samlede PFAS-udvaskning observeret i perkolat fra deponeringsanlæg.

8.4 Deponering skubber ikke på innovation

Deponering ligger nederst i affaldshierarkiet, som den form for bortskaffelse af affald, som man med affaldsdirektivet ønsker absolut mindst af, jævnfør EU Landfill Direktiv (EU Direktiv 2008/98 og Ændringsdirektiv EU 2018/851 med fokus på cirkulær økonomi). Med udsigt til hastig voksende mængder af glasfiberkompositter, særligt fra vindmøllevinger og møllehuse, kan behovet for deponeringspladser potentielt stige i fremtiden da de er svære at genanvende i dag. Eksisterende vindmøllevinger består primært af glasfiberkompositter med skrogforstærkninger af balsatræ og/eller PET-skum og i sjældne tilfælde PVC-skum. Genanvendelse af vindmøllevinger er svært, da de består af hærdede, sammensatte materialer. De ikke-brændbare glasfibre udgør 2/3 dele af massen, og derfor er forbrændingsværdien meget lav, da glas ikke brænder godt – og i en forbrændingsanlægsovn vil glasfibrene enten tilstoppe anlægfilterne eller være tilbage med øvrige ikke-brændbare rester, som formentlig vil indeholde tungmetaller fra affaldsforbrændingsanlægget i en sort slagge. Glasfibre og resin er billige materialer, derfor vil omkostningerne til transport og energi for at genvinde og genanvende dem overstige deres værdi. Det vil kræve stordriftsfordele, hvis det skal være økonomisk rentabelt.

Deponering af vindmøller og lignende kompositaffald er lovligt og billigt i Danmark. EU-lande som Tyskland, Østrig, Holland og Finland har allerede et forbud mod at deponere kompositaffald, som har et organisk indhold f.eks. højere end 5 procent, og som derved omfatter vindmøllevinger. Deponering er kun en løsning, når der ikke findes andre muligheder såsom nyttiggørelse. De vindmølleproducenter, som er interviewet i denne rapport, oplyser, at de tolker deponering som en ikke lovlig praksis, da der findes alternativer, f.eks. at benytte cementruten i Tyskland.

Den Europæiske brancheforening WindEurope ønsker et fælles EU-forbud mod deponering af vindmøllevinger og lignende kompositter fra 2025. Det synspunkt støtter både den danske og den europæiske vindenergibranche op om. De store parkejere og vindmølleproducenter har tilsluttet sig udmeldingen blandt andet også for at understøtte udviklingen af genanvendelsesteknologier, og for at få så meget kompositaffald på markedet, at de producenter, der er afhængig af en stabil forsyning af kompositaffald til produktionen, også kan få adgang til det. Det er en pointe, som erfaringerne med de lukkede affaldsanlæg i henholdsvis Tyskland og Spanien vidner om, da de har måtte lukke ned på grund af for lidt affaldsmængder. Dvs. at der er et behov for at alle lignende affaldsfaktionerne går til nyttiggørelse eller genanvendelse og ikke til deponering. Udfordringen er, at for nogen – også de mindre private vindmølleejere, når videresalg ikke er mulig, og vindmøllerne er udtjente, så er deponering af vingerne en billig løsning for bortskaffelse, som alternativt til en mere kostelig og besværlig indsats – ofte over landegrænser for nyttiggørelse af materialerne i forbrænding med cement, som er den næst-billigste proces, med en pris på cirka 1250 DKK/ton uden nedtagning, transport m.m. (Tyskland) mod en mindstepris på cirka 895 DKK/ton for deponering i Danmark, som afhænger af mængder m.m.

8.5 Vejen til at komme højere op i affaldshierarkiet

Hvis deponering er et reelt alternativ, går innovationen i stå af flere årsager. Som et billigt alternativ kan deponering nemt friste ejerne af møllerne i stedet for at sende affaldsstrømmen ind i det cirkulære flow. Der er udviklet en del genanvendelsesteknologier. Nogle er mere lovende end andre – og nogle er mere markedsmodne (jf. kapitel 4). Hvis genanvendelse skal blive mere udbredt, kræver det rentabilitet og volumen. Et af hovedproblemerne for genanvendelse af kompositaffald er volumen. Hvis der ikke er volumen nok, er der ikke basis for rentable genanvendelsesvirksomheder. Det er vigtigt, der skabes en efterspørgsel, så genbrugsvirksomhederne kan regne med have en stabil forsyning af råmaterialer. For at få volumen i mængderne bliver man nødt til at se på tværs af sektorer, der anvender sammenlignelige materialetyper, f.eks. er både vindmøllevinger og mange skibe konstrueret af sammenlignelige glasfiberkompositter. Netop afhængighed af en affaldsfraktion som møllevinger er den største

risiko, en genbrugsvirksomhed kan have. Af samme grund vil det heller ikke være muligt at skalere produktionen i nær fremtid med mindre lignende affaldstyper sammentænkes.

WindEurope er gået sammen med kompositbrancheforeningen og den kemiske branche for ening på europæisk plan. Idéen er at få samlet kompositaffaldet på tværs af industrierne, f.eks. fra skibe, store siloer og andre ting og få det kategoriseret, så det kan genanvendes samlet til forskellige nye produkter.

Blandt EU-lande er Frankrig interessant. I juni 2020 indførte de regler med virkning fra 1. juli 2022, at mindst 35 procent af rotor og vingernes vægt skal genbruges eller genanvendes efter deres serviceliv – og kravene øges til 45 procent fra 1. januar 2023 og til 55 procent efter 1. januar 2025. Det lyder umiddelbart som en farbar vej, som kan skabe en efterspørgsel og drive udvikling og omkostninger ned på genanvendelsesteknologier. Men spørger man John Korsgaard fra LM Wind Power, så synes det franske krav at være uhensigtsmæssigt. Kravet gælder på rotormassen (dvs. vindmøllevingerne), hvor navet med tilhørende pitchsystem ofte udgør mere end 50 procent af rotormassen. Kravet kunne favorisere kulfibervinger, da de er lettere end glasfibervinger og at man på denne måde kunne undgå at skulle genanvende kulfibervinger i Frankrig. Jævnfør rapportens kapitel 1 med tabel over glasfiber versus kulfiber, som har et langt højere CO₂-aftryk, virker det ikke hensigtsmæssigt af flere årsager. Et europæisk forbud mod deponering af vindmøllevinger er ønskeligt, lyder det fra branchen.

Der er i rapporten gjort rede for, at vindmøllers reelle levetid ofte er længere end designlevetiden, samt at mere end 50 procent af de nedtagne vindmøllevinger genbruges gennem gensalg af hele vindmøller eller som reservedele. Der vil i fremtiden komme store blokke fra nedtagning af vindmøller, særligt når havvindmølleparker bliver nedtaget. Tager man de havvindmølleparker med, som er i pipeline til at sikre samfundets elektrificering (bilag 2), vil prognosen med en levetid på op til 35 år for de nye havvindmølleparker firdoble de akkumuleret kompositmængder til mindst 500.000 ton om 35-40 år i Danmark.

Nye genanvendelsesprocesser, som kan adskille glasfibre fra epoxy-resin, er på vej - og vindmøllevinger designet til genanvendelse er fremtiden, men som man først vil se genanvendelse af om 30 år. Det anbefales at se på affaldskoder og mobilitet, når det gælder testprøver af kompositaffald til nyttiggørelse over landegrænser, for at understøtte udforskningen af nye værdikæde. Det anbefales desuden at understøtte et fælles EU-forbud mod deponering af kompositaffald fra vindmøllevinger og tilsvarende affaldstyper for at understøtte en udvikling mod en mere cirkulær omstilling, som følger affaldshierarkiet.

Tak til

Tak til de interviewede personer. Til materialeforsker fra Aarhus Universitet og Danmarks Tekniske Universitet og dialogbaseret interview med fagekspertise fra de danske vindmølleproducenter, med brancheorganisationen og med en repræsentant fra et affaldshåndterings-firma, se bilag 1. Samt en tak til Leif Sønderberg for redaktionel bistand og til SDU Ph.d.-studerende Sofie Bach Hybel for grafik- og forskningsassistance.

Bibliografi

- AffaldPlus. (25. november 2022). *polstrede-moebler*. Hentet fra <https://affaldplus.dk/polstrede-moebler>
- Aleksiev, H. (26. november 2022). *The Different Uses of Fiberglass in the Automotive Industry*. *Ennomotive*. Hentet fra [ennomotive.com/fiberglass-automotive-industry/](https://www.ennomotive.com/fiberglass-automotive-industry/) : <https://www.ennomotive.com/fiberglass-automotive-industry/>
- Ansys Granta Edupack. (2021).
- ARC. (29. december 2022). *AV Miljø – et moderne deponi*. Hentet fra <https://a-r-c.dk/om-arc/av-miljoe/>
- Bachmann, J., Hidalgo, C., & Bricout, S. (2017). Environmental analysis of innovative sustainable composites with potential use in aviation sector – a life cycle assessment review.. *Science China Technological Sciences.*, s. 1301-1317.
- Beauson, Justine. (23. 11. 2022). Materialeforsker, DTU Rlsø. (L. Ricard, Interviewer)
- Bladena - KIRTXTHOMSEN. (2019). *Wind Turbine Blades Handbook*. www.kirt-thomsen.com. Hentet fra <https://www.kirt-thomsen.com/s/cortir-handbook-2019.pdf>
- Bonou Laurent and Olsen. (2016). Life cycle assessment of onshore and offshore wind energy-from theory to application. *Applied Energy*, s. 327-237.
- Borch, Sophus. (25.11. 2022). HJHansen Recycling Group. (L. M. Ricard, Interviewer)
- Brøndsted, P. og Beauson, J.. (2016). Wind Turbine Blades: An End of Life Perspective. *MARE-WINT*, DOI 10.1007/978-3-319-39095-6_23.
- Building Supply. (17. 01. 2023). *Building Supply*. Hentet fra 36.000 ton vindmøllevinger skal genanvendes som facader, døre og paneler: https://www.building-supply.dk/article/view/891739/36000_ton_vindmollevinger_skal_genanvendes_som_facader_dore_og_paneler
- Cefic - WindEurope - EuCIA. (2020). *Accelerating Wind Turbine Blade Circularity*. WindEurope.org. Hentet fra <https://windeurope.org/wp-content/uploads/files/about-wind/reports/WindEurope-Accelerating-wind-turbine-blade-circularity.pdf>
- Confederation of European Waste-to-Energy Plants (CEWEP). (28. 10 2021). *Landfill Taxes and Restrictions*. Hentet fra <https://www.cewep.eu/landfill-taxes-and-restrictions/>
- DecomBlades. (02.12. 2022). *DecomBlades*. Hentet 18. 11 2022 fra decomblades.dk.
- DR. (15.12. 2020). *Udtjente vindmøllevinger hober sig op på lossepladser - og der vil kun komme flere i fremtiden*. Hentet fra [dr.dk](https://www.dr.dk/nyheder/indland/udtjente-vindmoellevinger-hober-sig-op-paa-lossepladser-og-der-vil-kun-komme-flere-i): <https://www.dr.dk/nyheder/indland/udtjente-vindmoellevinger-hober-sig-op-paa-lossepladser-og-der-vil-kun-komme-flere-i>
- Dreamwind. (29.11. 2022). *Om Dreamwind*. Hentet fra [Dreamwind](https://www.dreamwind.dk/om-dreamwind/): <https://www.dreamwind.dk/om-dreamwind/>
- Ecoinvent database. (27.12 2022). Ecoinvent database. *Opslag i databasen*.
- Eker, B., Akdogan, B., & Vardar, A. (2006). Using of Composite Material in Wind Turbine Blades. *Journal of Applied Sciences*, 6,, s. 2917-2921.
- Energistyrelsen. (02.12. 2022). Hentet fra <https://ens.dk/presse/aeldre-vindmoeller-paa-land-forventes-leve-laengere-end-hidtil-antaget>
- Energistyrelsen. (2022). *cas.ens.dk*. Hentet fra Vejledning til bekendtgørelse om teknisk: <https://cas.ens.dk/media/1249/vejledning-til-bekendtgørelse-om-teknisk-certificering-og-servicering-af-vindmoeller.pdf>
- EnergiWatch (13.03.2023) Tilfældighed gav gennembrud for vinge-genanvendelse
- EU Kommissionen, Landfill waste. (januar 2023). *Landfill waste*. Hentet fra https://environment.ec.europa.eu/topics/waste-and-recycling/landfill-waste_en
- EU Kommission, H. 2. (2022). *Technology readiness levels (TRL)*. Hentet fra https://ec.europa.eu/research/participants/data/ref/h2020/wp/2014_2015/annexes/h2020-wp1415-annex-g-trl_en.pdf
- EUR-LEX; EU Commission. (Januar 2023). *EU's lovgivning om håndtering af affald*. Hentet fra EUR-LEX, Access to European Union law: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DA/TXT/?uri=LEGISSUM%3Aev0010>
- European Environment Agency. (2020). *Municipal waste landfill rates in Europe by country*. Hentet fra <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/figures/municipal-waste-landfill-rates-in-1>
- Green Power Denmark. (29.11 2022). Green Power Denmark. (L. M. Ricard, Interviewer)
- Groningen Seaports. (8. november 2022). *groningen-seaports.com*. Hentet fra <https://www.groningen-seaports.com/en/>

- Guermeur, R. (11. 2022). Wind turbine dismantling activity manager hos SUEZ. (L. M. Ricard?, Interviewer)
- GUYOT environnement. (30. 12. 2022). *GUYOT environnement*. Hentet fra GUYOT environnement: <https://www.guyotenvironnement.com/>
- Hyks, J. & Hjelmar, O. (2023): Screeningsundersøgelse af udvaskning fra vindmøllevinger. Miljøprojekt nr. 2242. Miljøstyrelsen, Miljøministeriet.
- Hill, C., & Norton, A. (2018). *LCA Database of Environmental Impact to Inform Material Selection Process, DACOMAT*. . Paris. Frankrig: EU Horizon 2020 projekt.
- Hinge, Mogens. (16. 11. 2022). Lektor, plast og polymeringeniør, Aarhus Universitet. (L. M. Ricard, Interviewer)
- Hofor (02.12. 2022). *Nye havvindmøller i Øresund*. Hentet fra <https://www.hofor.dk/baeredygtige-byer/vind-og-sol/nye-vind-og-solprojekter-paa-vej/nye-havvindmoeller-i-oeresund/aflandshage-vindmoellepark/>
- Haapala and Prempreeda. (2014). Comparative life cycle assessment of 2.0 MW wind turbines. *International Journal of Sustainable Manufacturing* 3(2), s. 170-185.
- Ingeniøren. (17. 04. 2020a). *Glasfiber fra Vindeby Havmøllepark endte på losseplads i Aalborg*. Hentet fra ing.dk: <https://ing.dk/artikel/naceller-vindeby-endte-pa-losseplads-234245>
- Ingeniøren. (17. 04. 2020b). *Ringe affaldshåndtering af udtjente vindmøllevinger: De ender på losseplads*. Hentet fra ing.dk: <https://ing.dk/artikel/vindmollevinger-ender-deponi-234244>
- Innovationsfonden. (29.11. 2022). *Grønne vindmøllevinger*. Hentet fra Innovationsfonden: <https://innovationsfonden.dk/da/nyhed/groenne-vindmoellevinger>
- Jensen, Jonas Pagh. (23.11. 2022). Siemens Gamesa. (L. M. Ricard, Interviewer)
- Kara, S., & Manmek, S. (2009). *Composites: Calculating their embodied energy*. . The Life Cycle Engineering and Management Research Group at the University of New South Wales.
- Korsgaard, John. (21. 11. 2022). LM Wind Power. (L. Ricard, Interviewer)
- Liu and Barlow. (2017). Wind turbine blade waste in 2050. *Waste Management*, 62,, s. 229-240.
- LM Wind Power. (2022). *Figur fra LM Wind Power*. LM Wind Power.
- Miljøkontrol, D. (2. 2. 2023). *PAH-forbindelser*. Hentet fra <https://danskmmk.dk/pah-forbindelser/>
- Miljøstyrelsen. Aktindsigt, Vindmøllebranchens estimater (2012).
- neocomp. (16. 11. 2022). <https://www.neocomp.eu/>. Hentet fra neocomp.eu: <https://www.neocomp.eu/>
- Poulsen, Allan Koorsgaard. (21. 11. 2022). Head of Advanced Structures and Sustainability, Vestas. (L. M. Ricard, Interviewer)
- Rajaei, M., & Tinjum, J. (2013). Life Cycle Assessment of Energy Balance and Emissions of a Wind Energy Plant. *Geotechnical and Geological Engineering*, 31., s. 1663-1670.
- Rankine, R., Chick, J., & Harrison, G. (2006). Energy and carbon audit of a rooftop wind turbine. . *Proceedings of the Institute of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*, s. 643– 654.
- Ricard, L. M. (2022). IEA taskforce: Recycling of wind turbine blades, møde 29. november 2022.
- Ricard, L. M. (2023). *Kortlægning af mængder og behandlingsmuligheder for vindmøllevinger*. Miljøstyrelsen.
- Song, Y., Youn, J., & Gutowski, T. (2009). Life cycle energy analysis of fiber-reinforced composites. *Composites Part A*, s. 1257-1265.
- Statista.com. (2021). *Average cost to landfill municipal solid waste in the United States in 2020 and 2021, by region (in U.S. dollars per ton)*. Hentet fra <https://www.statista.com/statistics/692063/cost-to-landfill-municipal-solid-waste-by-us-region/>
- Suzuki, T., & Takahashi, J. (2005). Prediction of energy intensity of carbon fiber reinforced plastics for mass-produced passenger cars. *Proceedings Ninth Japan International SAMPE Symposium*, s. 14-19.
- UNIFER. (08. 12. 2022). *La TGAP (Taxe Générale sur les Activités Polluantes) devraient fortement évoluer les 5 prochaines années pour inciter davantage les entreprises à trier leurs déchets*. Hentet fra UNIFER: <https://www.unifer.fr/evolution-de-la-taxe-tgap-sur-lenfouissement/>
- US DoE. (2016). *Bandwidth study on energy use and potential energy saving opportunities in the manufacturing of lightweight materials: Glass fibre reinforced polymer composites*. . US Department of Energy.

- Vattenfall. (November 2022). *Vattenfall*. Hentet fra <https://vattenfall-hollandsekust.nl/en/blog/2022/06/13/vattenfall-and-basf-to-use-recyclable-blades-at-hollandse-kust-zuid-wind-farm/>
- Vaughan, D. (1998). Reinforcements and composites – Fiberglass reinforcement. I S. T. Peters, *Handbook of composites. Second Edition*. (s. 131-155). California,; Mountain View: Process Research.
- Weidmann, B. (2021). *wind-turbine.com (Global market place)*. Hentet fra <https://en.wind-turbine.com/>
- WindEurope. (2017). *Background paper on the environmental impact of wind energy - a contribution to the circular economy discussion*. WindEurope.
- WindEurope. (2020). *How to build a circular economy for wind turbine blades through policy and partnerships*. WindEurope.
- WindEurope. (16. juni 2021). *Wind Industry calls for Europe-wide ban on landfilling turbine blades*. Hentet fra Preas releases: <https://windeurope.org/newsroom/press-releases/wind-industry-calls-for-europe-wide-ban-on-landfilling-turbine-blades/>
- WindEurope. (21. 11 2022). *List of WindEurope members*. Hentet fra [windeurope.org: https://windeurope.org/membership/meet-our-members/?sector=&country=DK&search=#search-results](https://windeurope.org/membership/meet-our-members/?sector=&country=DK&search=#search-results)
- Witik, R., Payet, J., Michaud, V., Ludwig, C., & Månson, J. (2011). Assessing the life cycle costs and environmental performance of lightweight materials in automobile applications. *Composites Part A Applied Science Manufacturing*, s. 1694–709.
- Aarhus Universitet. (29. 11 2022). *Internationalt samarbejde mellem industri og forskning vil lancere løsning for fuld genanvendelse af vindmøllevinger*. Hentet fra Faculty of Natural Sciences, Aarhus University: <https://nat.au.dk/om-fakultetet/nyheder/nyhed/artikel/internationalt-samarbejde-mellem-industri-og-forskning-vil-lancere-loesning-for-fuld-genanvendelse-af>

Bilag 1. Oversigt over interviewpersoner

Interview til kapitel 1-6

Interviews med eksperter fra de danske producenter af vindmøllevinger:

Allan K. Poulsen, Head of Advanced Structures and Sustainability, Vestas (interview den 21. november 2022).

John Korsgaard, Senior Director, Engineering Excellence, LM Wind Power (interview den 21. november 2022).

Jonas Pagh Jensen, Sustainability Specialist, Siemens Gamesa Renewable Energy (interview den 23. november 2022).

Interview med repræsentant for affaldshåndteringsvirksomhed (som deltager i DecomBlades projektet):

Sophus Borch, chef for forretningsudvikling, HJHansen Recycling Group, Wind Decom (interview den 25. november 2022).

Interview med repræsentanter fra brancheforeningen:

Green Power Denmark (fællesinterview med Anja Pedersen, Chefkonsulent og Lea Wichmand, Afdelingschef, Erhverv og Innovation, den 29. november 2022).

Interview til kapitel 1 og 4:

Videninstitutioner:

Mogens Hinge, lektor, plast og polymeringeniør, Institut for Bio- og Kemiteknologi, Aarhus Universitet (Interview den 16. november 2022).

Justine Beauson, udviklingsingeniør, DTU Wind (interview den 23. november 2022).

Nabolande:

Ronan Guermeur, Suez, Frankrig (interviewet af Mickaël Sofiane Niels Benghezal, SDU udvekslingsstuderende fra Frankrig).

Bilag 2. Havvindmølleparker i pipeline

TABEL 9. Potentielle kompositaffaldsmængder i ton fra havvindmøllepipeline.

Navn	Forventet klar	MW	Rotorvinger	Møllehus	i alt (ton)	Ved 35 års levetid
Hesselø**	2030	1.200	18000	2880	20880	2065
Energiø Bornholm**	2030	3000	45000	7200	52200	2065
Vesterhav Syd og Vesterhav Nord	2024	350	5250	840	6090	2059
Omø Syd	2026	320	4800	768	5568	2061
Jammerland Bugt	ukendt	240	3600	576	4176	ukendt
Lillebælt Syd*	2027	160	2400	384	2784	2062
Frederikshavn*	ukendt	72	1080	172,8	1252,8	ukendt
Aflandshage	2026	250	3750	600	4350	2061
Nordre Flint	2025	160	2400	384	2784	2060
Thor*	2027	1000	15000	2400	17400	2062
Kadet Banke*	2027	600	9000	1440	10440	2062
Paludan Flak*	2026	200	3000	480	3480	2061
Treå Møllebugt	ukendt	600	9000	1440	10440	ukendt
Hesselø*	2029	1000	15000	2400	17400	2064
Lolland*	2028	200	3000	480	3480	2063
Ærø Forsøgsmølle	2023	11	165	26,4	191,4	2058
Frederikshavn Nord*	2028	250	3750	600	4350	2063
Guldborgsund*	2028	250	3750	600	4350	2063
Hirtshals Havn*	2028	200	3000	480	3480	2063
Rømø*	2028	300	4500	720	5220	2063
Stevns Nord*	2028	250	3750	600	4350	2063
Vigsø bugt*	ukendt	350	5250	840	6090	ukendt
Grenå*	ukendt	306	4590	734,4	5324,4	ukendt
Klintebjerg	2028-2035	585	8775	1404	10179	ukendt
Lysegrund*	ukendt	500	7500	1200	8700	ukendt
Hirtshals Havn Syd*	2028	320	4800	768	5568	2063
Sønderbjerg	2029	495	7425	1188	8613	2064
Guldborgssund Syd*	2028	300	4500	720	5220	2063
Odin Offshore Wind Farm i Nordsøen*	2027	1700	25500	4080	29580	2062
Bornholm Bassin Syd	2027	1500	22500	3600	26100	2062
Bornholm Bassin Øst	2027	1500	22500	3600	26100	2062
Jyske Banke Nord	2027	1050	15750	2520	18270	2062
Vikinge Banke	2027	1140	17100	2736	19836	2062
Bøchers Banke	2029	1100	16500	2640	19140	2064
Samlet		21.459	321.885	51.502	373.387	

**Statslige udbud (2). Øvrige er åben-dør ansøgninger (32), **Cirka MW, ikke fast endnu.

Bilag 3. Vingekomposit fra afmeldte anlæg 1987-2021

TABEL 10. Estimeret komposit i ton fra vindmøllevinger i 1987-2021. Kilde: Ricard (2023).

År	Landmøller kW	Landmøllevinger Komposit (ton)	Havmøller kW	Havmøllevinger Komposit (ton)
1987	11	0		
1988-1996	0	0		
1997	22	0,2		
1998	115	1,2		
1999	5.541	55,4		
2000	8.565	85,7		
2001	5.322	53,2		
2002	110.521	1105,2		
2003	22.224	222,2		
2004	7.312	73,1		
2005	18.091	180,9		
2006	3.723	37,2		
2007	14.315	143,1		
2008	39.228	392,3		
2009	34.454	344,5		
2010	44.413	444,1		
2011	56.250	562,5		
2012	14.044	140,4		
2013	47.592	475,9		
2014	39.072	390,7		
2015	49.956	499,6		
2016	60.734	607,3		
2017	97.678	976,8	7.250	87
2018	20.696	207,0		
2019	39.967	399,7		
2020	64.181	641,8		
2021	26.203	262,0		
Samlet		8302,2		87

Figur 10 viser at der har været mindst 8400 ton potentielt kompositaffald fra vindmøllevinger i perioden 1987-2021. Datagrundlag er fra afmeldte anlæg hos Energistyrelsen. Dvs. vindmøller, som tidligere har været tilsluttet elnettet i Danmark. Danmarks første havmøllepark blev afmeldt elnettet i 2017 og den første landvindmølle i 1987. Producentåret er ikke præcis angivet for de mange små landmøller, derfor er der regnet med 10 tons glasfiberkomposit pr. MW i gennemsnit for landvindmøller og 12 tons pr. MW for havvindmøller.

Bilag 4. Eksempel på affaldskode for transport til Tyskland

Bilag 4 er et eksempel på affaldskoder, oplyst af nedtagningsfirma for transport af vinger nedtaget i Danmark til Tyskland, typisk til medforbrænding i cementproduktion. Figur 17 viser udklip fra det originale bilag, mens teksten herunder er en oversættelse af bilag fra tysk til dansk. Det er plastikaffald, som EAK-koderne henviser til.

8. Gendannelsesproces (eller, hvor det er relevant, bortskaffelsesprocedurer som omhandlet i artikel 3, stk. 4 for nævnte affald)

R-Code / C-Code: R5

9. Sædvanlig betegnelse for affaldet

Plastikaffald

10. Affaldsidentifikation (relevante koder angivet)

- i) Basel kode IX: B3011
- ii) OECD (hvis forskellig fra i): GH 011
- iii) Tilknytning IIIA (4):
- iv) Tilknytning IIIB (5):
- v) EU-affaldsliste: 07 02 13 (EAK-kode: Plastaffald)
- vi) National kode: 07 02 13 (EAK-kode: Plastaffald).

8. Verwertungsverfahren (oder gegebenenfalls Beseitigungsverfahren bei in Artikel 3 Absatz 4 genannten Abfällen):
R-Code / D-Code : R5

9. Übliche Bezeichnung der Abfälle:
Kunststoffabfälle

10. Abfallidentifizierung (einschlägige Codes angeben):

- i) Basel Anlage IX : B3011
- ii) OECD (falls abweichend von i)): GH 011
- iii) Anhang IIIA (4):
- iv) Anhang IIIB (5):
- v) EU-Abfallverzeichnis: 070213
- vi) NationalerCode: 070213

FIGUR 17. Originalt materiale af affaldskoder for transport af udtjente vindmøllevinger fra Danmark til Tyskland, typisk til medforbrænding i cementproduktion. Kilde: Ricard (2023)

Kortlægning af mængder og behandlingsmuligheder for vindmøllevinger

I dag nyttiggøres op til 85-90 procent af materialerne i vindmøller. Udfordringen er møllevingerne og møllehuse, som består af hovedkomponenterne glasfiber og hærdplast, der er smeltet sammen til et let og stærkt kompositmateriale, og som derfor er vanskeligt at genanvende. Danmark kommer over de næste 25-30 år til at stå med mindst 121.000 ton kompositaffald fra udtjente vindmøllevinger og møllehuse. Prognosen er beregnet ud fra levetidsscenerier for henholdsvis landvindmøller af 25 år og 30 år, og 25 år for en levetid for havvindmøller, som er tilsluttet elnettet i 2022. Der er i prognosen ikke medtaget produktions- og serviceaffald. Tager man de fremtidige havvindmølleparker, som er i pipeline, vil det betyde en firedobling af potentielle ikke-genanvendelige kompositaffaldsmængder på mindst 500.000 ton fra vindmøllevinger om 35-40 år i Danmark.

Hidtil har det været en bortskaffelsesløsning at sende udtjente vindmøllevinger til deponeringsanlæg i Danmark. På baggrund af nabo tjek og dialog med branchen konkluderer rapportens forfatter, at et forbud mod deponering af affaldstypen har haft en fremmede effekt på affaldshåndteringen af vindmøllevinger i. f.eks. Tyskland.

Der findes allerede en del forskellige genanvendelsesteknologier. De markedsmodne teknologier er de simpleste, hvor kompositaffaldet knuses mekanisk og bruges som fyldstoffer f.eks. i byggematerialer, eller kan medforbrændes i cementproduktion. Nye genanvendelsesprocesser, som kan adskille glasfibre fra epoxy-resin, er på vej - og vindmøllevinger designet til genanvendelse er fremtiden om 30 år.



Miljøstyrelsen
Tolderlundsvej 5
5000 Odense C

www.mst.dk