



Høgskulen
på Vestlandet

BACHELOROPPGAVE

Airborne Wind Energy

Luftbåren Vindenergi

Petter Amble, Jon Kastdalen, William Wilde Andersen

Fornybar Energi

Fakultet for Ingeniør og Naturfag

Veileder August Hubert Wierling

Innleveringsdato: 17. Juni 2020

Vi bekrefter at arbeidet er selvstendig utarbeidet, og at referanser/kildehenvisninger til alle kilder som er brukt i arbeidet er oppgitt, jf. Forskrift om studium og eksamen ved Høgskulen på Vestlandet, § 12-1.

Forord

Denne oppgaven er skrevet av Jon Kastdalen, Petter Amble, og William Wilde Andersen. Vi er studenter ved Høgskulen på Vestlandet, på fakultetet for Ingeniør og Naturfag. Denne oppgaven er vår bacheloroppgave innenfor studieområdet Fornybar Energi.

Første planlagte valg av gjennomføring var å kontakte det norske selskapet Kitemill for å høre om et samarbeid. Det hadde gitt et innblikk i hvordan de arbeider med utvikling av luftbåren vindenergi. Grunnet Covid-19 pandemien ble planen ikke mulig å gjennomføre. Denne utfordringen sørget for endringer i oppgaven, men vi endte opp med en problemstilling vi ble fornøyd med.

Vi vil takke vår veileder August Hubert Wierling for hans støtte, råd, tid, tålmodighet og bidrag for å gjøre oppgaven til en helhet. Vi vil også takke Høgskolen på Vestlandet campus Sogndal for tre spennende år i Sogndal. Fornybar energistudiet har tilbudt mye interessant læring, samt mange gode opplevelser.

Vi vil også takke Leif Kastdalen og Randi Storaas for deres synspunkter på oppgaven.

Abstract

Airborne Wind Energy

Airborne Wind Energy systems is a concept where a kite or glider is used to harness energy from the wind at high altitudes. The wind velocity increases a couple of meters per second from ground level to 500 meters. The energy density in the wind increase to the power of three with increasing windspeeds. The energy that can be harvested at higher altitudes will therefore be a lot higher than on the ground.

The last 15 years has seen a growth of new start-up projects for Airborne Wind Energy technology. This is partially due to the more advanced computer systems that have been developed during these times. In 1980 *Miles L. Loyd* published a paper at the Lawrence Livermore national laboratory explaining the potential for kite driven wind power production [16]. There are two different systems that are ideal for AWE production. The first is based on a crosswind motion to harvest energy, by pulling a tether from a generator. The second method is a kite where turbines are connected to generators onboard the kite. When the blades rotate, they generate electricity, as a normal wind turbine would.

This bachelor thesis gives an overview over the basic concepts of AWEs, the current development, the overall potential, and the challenges surrounding the development of said systems. This research concludes that AWE projects for electricity production, on larger scales, are currently in a development phase. This means companies are designing and testing prototypes for kites/gliders and continuing the development of computer systems used for flight-control. The biggest challenge is to make the system work autonomously during all phases of flight. Considering the wind velocities are never constant makes this a challenge.

The thesis also investigates other challenges with AWE, such as economic, ecologic, and the area required for AWEs. Considering that there are no commercial AWE systems so far is an indicator that these challenges still have no clear answers.

Sammendrag

Luftbåren vindenergi

Luftbåren vindenergi er systemer der en kite eller glider brukes til å utnytte energi fra vinden på store høyder. Vindhastigheten øker med høyde. Fra bakken til 500 meters høyde kan vindhastigheten øke med flere meter per sekund. Energitettheten i vinden øker opphøyd i tredje ved økning av vindhastighet. Energien som kan høstes i større høyder vil derfor være mye høyere enn på bakkenivå.

I løpet av de siste 15 årene har det kommet mange nye prosjekter innenfor Luftbåren vindteknologi grunnet utvikling av mer avanserte datasystemer. I en publikasjon på Lawrence Livermore national laboratory i 1980 forklarte *Miles L. Loyd* potensialet for hvordan kiter kan høste energi fra vinden [16]. Det finnes to systemer som er ideelle for å utnytte luftbåren vindenergi. Det første systemet er basert på kryssvind bevegelse for å høste energi, ved å trekke en line fra en generator. Den andre metoden er en kite som beveger seg i kryssvind. Kiten utnytter et ekstra drag fra propeller til å genere strøm i selve kiten.

Bacheloroppgaven gir en oversikt over grunnleggende konsepter for AWE, utviklingen, potensialet og utfordringer. Studiet i oppgaven har konkludert med at alle AWE-prosjekter for strømproduksjon av større skala er i en utviklingsfase som omhandler planlegging av design, utvikling av datasystemer og testing av kite-design. Den største utfordringen innenfor AWE er å holde kiten i konstant flyging over lengre tidsperioder. Dette er ganske utfordrende siden vindhastighetene aldri er konstante og alltid endrer seg.

Opgaven undersøker også utfordringer om økonomi, økologi og areal som kreves for AWE produksjon. At det ikke finnes kommersielle AWE systemer per dags dato kan gi en indikasjon om at det fortsatt ikke er et klart svar på disse utfordringene.

Innhold

Forord	1
Abstract	2
Airborne Wind Energy.....	2
Sammendrag.....	3
Luftbåren vindenergi.....	3
Figur liste.....	6
Tabell Liste.....	7
Forklaringer.....	8
Akronymer	8
Begrep	8
Symboler	9
1. Introduksjon	10
1.1 Problemstilling.....	13
2. Bakgrunn	14
2.1 Hvorfor AWE?.....	14
2.2 Teoribakgrunn for energi fra en kite.....	19
2.2.1 Vanlig kite	20
2.2.2 Kryssvind kite.....	22
3. Metode.....	26
3.1 Hva som undersøkes	26
4. Kunnskapsgrunnlag	27
4.1 Kort om vindenergi og vinder.....	27
4.2 Vindkraft	27
4.2.1 Produksjon av elektrisk energi i Norge	27
4.2.2 Utfordringene ved videre utvikling av vindkraft på land	28
4.3 Airborne Wind Energy.....	30
4.3.1 AWE mot det grønne skifte	30
4.3.2 Historie	31
4.4 Teknologier	32
4.4.1 Kiter med elektrisitetsproduksjon på bakken	35
4.4.2 Kiter med innebygde generatorer	36
4.4.3 Hva påvirker effekten til en kite	37
4.4.4 Kobling til bakken og generator	38

5. AWE Selskaper Nasjonalt/Internasjonalt	39
5.1 Amerikanske Selskaper	39
5.1.1 Makani	39
5.1.2 Windlift	40
5.1.3 eWind Solutions	41
5.2 Europeiske selskaper	41
5.2.1 Brainwhere	41
5.2.2 KiteGen	42
5.2.3 KiteX	43
5.2.4 Ampyx	44
5.2.5 EnerKite	45
5.2.6 Skysails	46
5.3 Norge	47
5.3.1 Kitemill	47
6. Utfordringer ved Utbygging og etablering	48
6.1 Økonomiske utfordringer	48
6.2 Sikkerhet og arealbruk	49
6.3 Automatisering og kontinuerlig drift	50
7. Dagens Situasjon for Airborne Wind Energy	51
7.1 AWE og HAWP mot fremtiden	51
7.2 Løsninger på utfordringer	52
7.2.1 Økonomiske utfordringer	52
7.2.3 Sikkerhet og arealbruk	52
7.2.4 Automatisering og kontinuerlig drift	53
7.3 Sammendrag	54
Litteraturliste	55
Vedlegg	59

Figur liste

Figur 1.1 Beregnet vindhastighet på ulike høyder 1.januar.2012. Egen figur, data fra [4]. ...	11
Figur 1.2 Vindhastigheter på 10m, 49m og 500m Uke 1 2012. Selvlaget figur, data fra [4]...	12
Figur 1.3 Gjennomsnittlig vindhastighet i 2012 for 49 meter over bakken. Selvlaget figur, data fra [4].	12
Figur 1.4 Illustrasjon til endring i vindhastigheter på store høyder i Nederland, Figur adaptert fra [5].	13
Figur 2.1 Veksten av institusjoner involvert i AWE (Adaptert fra [7]).	15
Figur 2.2 AWE publikasjoner gitt årlig siden 2000 [8]. Selvlaget figur.	15
Figur 2.3 energiforbruk verden, farger skiller mellom ulike hoved energiproduksjonsmetoder (Adaptert fra Our World in Data, 2017, [10] data fra [11]).	16
Figur 2.4 Verden forventede energiforbruk mot 2050, (Adaptert fra IEA, 2019, [8]).	17
Figur 2.5 Fra venstre vindhastigheter på 10 og 500 meters, topp er 01.01.2011 bunn er 01.06.2011. Data fra [14]	18
Figur 2.6 Fra venstre vindhastigheter på 10 og 500 meters, topp er 01.01.2017 bunn er 01.06.2017. Data fra [14]	19
Figur 2.7 krefter og hastigheter på en vektløs simpel kite [16].	20
Figur 2.8 krefter og hastigheter på en vektløs kryssvind kite [16].	22
Figur 2.9 Funksjon F_s til en enkel kite for ulike verdier av L/D_K . Egen figur adaptert fra [16].	24
Figur 2.10 Funksjon F som viser energieffektiviteten for tre ulike scenario i forhold til V_L/V_w med $L/D_K = 10$. Egen figur adaptert fra [16].	25
Figur 4.1. Andelen energi som ble dekket av vind året 2018. (Adaptert fra [17])	28
Figur 4.2. Arealet som kreves for lik mengde energiproduksjon per år. (adaptert fra [22])	29
Figur 4.3 Oversikt over ulike selskap og forskjellene deres på AWE systemer (adaptert fra [7]).	33
Figur 4.4 standard vindturbin sammenlignet med en drag kite. Selvlaget figur	34
Figur 4.5 myk kryssvindkite i en produksjons syklus. Selvlaget figur. Adapter fra [7]	36
Figur 4.6 Kryssvind kite med innebygd generator i en produksjonsyklus. Selvlaget figur adaptert fra [16]	37
Figur 4.7 Effekt for kryssvindkite ved ulike løft drag ratioer. Selvlaget figur.	37
Tabell 4.1 parametere for en kryssvindkite og en C-5 kite	37

Figur 4.8 Effekt til en kite med samme størrelse som et C-5A fly med løft drag ratio 20. selvlaget figur.....	38
Figur 5.1 Makani M600 [36].....	40
Figur 5.2 Windlift APG [37].....	40
Figur 5.3 eWind TED [38].....	41
Figur 5.4 Brainwhere [39].....	42
Figur 5.5 KiteGen Carousel [34].....	42
Figur 5.6 KiteX KX4 [40].....	43
Figur 5.7 Ampyx AP3, exploded view [41].....	45
Figur 5.8 EnerKite EK200 [33].....	45
Figur 5.9 Skysail sin visjon om en flytende off-shore vindpark drevet av AWEs [42]	46
Figur 5.10 Kitemill KM1 [29].....	47

Dersom Figurer ikke er markert med kilder er de selvlaget.

Tabell Liste

Tabell 4.1 sammenligning mellom kryssvindkite og C-5 kite	37
---	----

Forklaringer

Akronymer

HAWEs:	High Altitude Wind Energy systems - Høyde-vind energisystemer
HAWP:	High Altitude Wind Power - Høyde vindkraft
HAWT:	Horizontal Axis Wind Turbine - Horisontal akse vindturbin
AWP:	Airborne Wind Power – Svevende vind turbiner/kraft
AWEs:	Airborne Wind Energy systems – luftbårne vind energi systemer
Tether:	linen mellom kite/glider/Flyvende vindturbin og bakkestasjonen.
EIA:	US Energy Information Administration.
EASA:	European union Aviation Safety Administration
FAA:	Federal Aviation Administration
ICAO:	International Civil Aviation Organization
RWE:	Rheinisch-Westfälisches Elektrizitätswerk, Tysk Energiprodusent.

Begrep

Vinddrone/kite:	Airborne wind energy system. En vanlig eller simpel kite defineres som følgende: En kite som utnytter løft i samme retning som vinden uten å ta i bruk en kryssvindbane.
En kryssvindkite	defineres som en kite som utnytter løft fra en kryssvindbevegelse til å generere elektrisitet.
En dragkite	er definert som en kite som produserer elektrisitet ved et ekstra drag på kiten fra rotorblader, og generatorer på selve kiten.

Symboler

kg:	Kilogram
W:	Watt
kW:	Kilowatt
MW:	Megawatt
GW:	Gigawatt
m:	Meter
mm:	Millimeter
N:	Newton
EJ:	Exajoule
P:	Effect
Dp:	Kraft produksjons drag
Fc:	Kryssvind kite sin relative løftekraft
Fcmax:	Maksimum verdi for Funksjonen til en kryssvind kite
Fs:	Vanlig kite sin relative bremsenekraft
Fsmax:	Maksimum verdi for Funksjonen til en vanlig kite
FDmax:	Maksverdi for Funksjonen til en drag kite
Pw:	Energitetthet i vind
T:	Trekkraft
Va:	Kites relative hastighet gjennom luften
Vc:	Hastighet kryssvind
VL:	Lasthastighet
Vw:	Vindhastighet
ρ :	Lufttetthet
L:	Løft
L/D:	Løft til dra-forhold
L/Dk:	Løft til dra-forhold kite
A:	Areal til kite

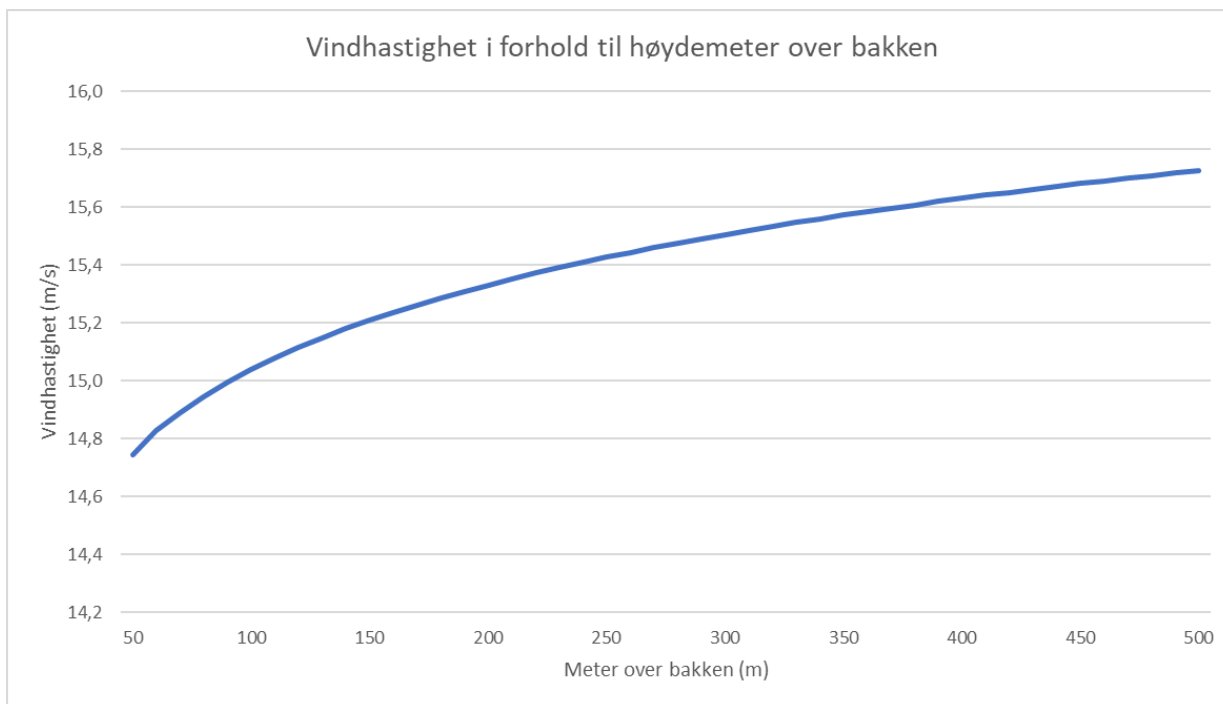
1. Introduksjon

I 2015 vedtok FNs medlemsland 17 bærekraftsmål som skal gjennomføres til 2030 [1]. målene er laget som en pekepinn til hvordan folk skal kunne leve i harmoni med hverandre og naturen uten store ødeleggelser. Mål nummer 13 handler om å stoppe klimaendringene før det er for sent. For å nå et slikt mål må verdens energiproduksjon over til fornybar produksjon. Skal dette kunne gjennomføres må det samarbeides mellom nasjoner, bedrifter og lokalbefolkning [2]. Dette er i samsvar med mål nummer 7 som skal gi ren energi til alle for overkommelige priser. Dersom målene skal nås må sektorer som transport, industri og matproduksjon forbedres slik at utslippene reduseres. Dette

I tillegg må FNs medlemsland i langt større grad utnytte seg av grønn energi fremfor tradisjonell fossil energiproduksjon. Energietterspørselen i verden er stadig økende i tillegg til at kull, gass og olje skal fases ut. Dette vil kreve en stor økning i fornybar energiproduksjon. Utbyggingen av vannkraft, solcellepanel og tradisjonell vindkraft er allerede godt på vei. Det forsøkes også på andre utvinningsmetoder for fornybar energi, slik som bølgekraft, tidevannskraft og luftbåren vindenergi (Airborne Wind energy).

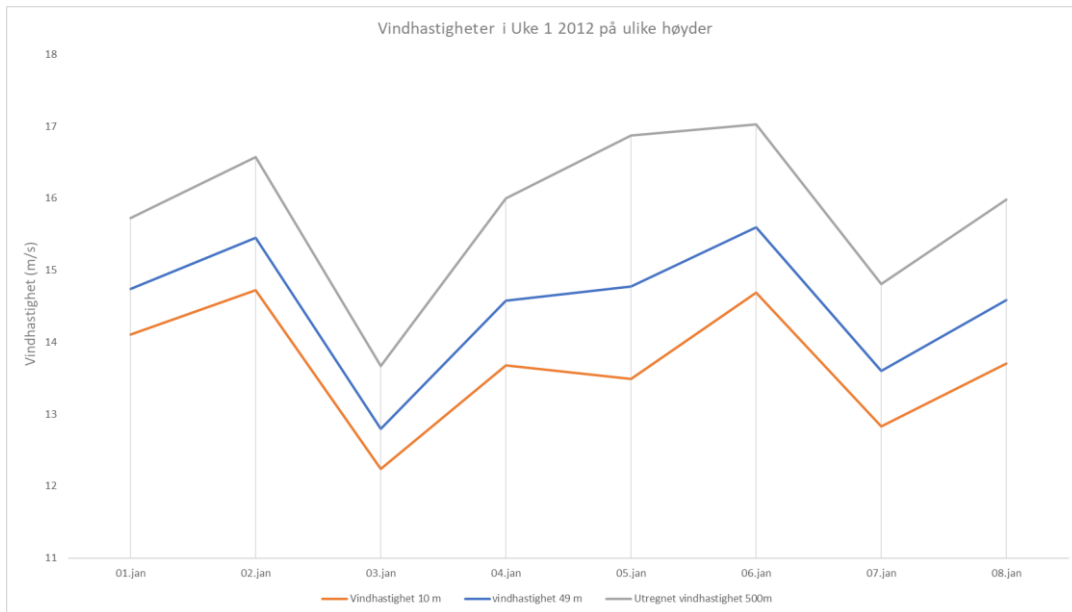
Det siste årene har det vært en stor vekst på fornybar energi-markedet. Produsenter utvikler større og mer energigivende prosjekter innenfor Solenergi, vannkraft, bioenergi, varmeenergi, i tillegg til land og sjøbasert vindkraft. Etterspørsel, teknologi og markedsøking innenfor feltet har åpnet for utvikling av en ny metode til produksjon av elektrisk energi fra vind kalt Airborne wind energy systems (AWEs) [3].

Bacheloppøpgaven gir et innblikk i hvorfor det er aktuelt med AWE teknologi. Det forklares hvordan energien fra vinden utnyttes ved hjelp av ulike kite-systemer. I kapittel 2.1 viser vi at det har økt med publikasjoner og antall institusjoner som utvikler AWE de siste årene. Vi viser vindkart for å bevise at det er høyere vindhastigheter på 500 meters høyde enn på bakkenivå. Kapittel 2.2 viser enkle utregninger for ulike kite-systemer for å vise hvilket som er mest effektivt. Kapittel 3 viser hvordan oppgaven er gjennomført. Kapittel 4 inneholder historie om AWE samt en oversikt over selskaper som jobber med feltet. Det gis også en mer detaljert beskrivelse av forskjellene på systemer som er under utvikling, som flybaner, design og styringssystem. I kapittel 5 informeres det mer detaljert om ulike selskaper. Kapittel 6 forteller om utfordringer ved AWE systemer, utvikling og sikkerhet. Kapittel 7 forklarer muligheter for AWE i fremtiden, eventuelle løsninger på utfordringer fra kapittel 6.



Figur 1.1 Logaritmisk profil der vindhastighet vises for ulike høyder over bakken 1.januar.2012. Data er fra målinger på 10m og 49m over bakken, gjort av Vestavind AS på et udefinert område i Norge [4].

Tradisjonell vindkraft utnytter vanligvis vind på høyder fra 50-200 meter i områder med sterk konstant vind. I løpet av året 2012 gjorde Vestavind AS målinger på et område egnet for tradisjonell vindkraft på 10 og 49 meter over bakken. En logaritmisk profil er antatt å beskrive forandring i vindhastighet over høyde. Ved å bruke Twidell & Wiers formler på målingene fra 2012 får vi frem hvordan vindhastigheten øker med høyde over bakken (Figur 1.1). Metoden er beskrevet i Twidell & Wier formel 7,2 s.243 [5]. Fra 50 meter til 500 ligger stigningen på rundt 2 m/s.



Figur 1.2 Gjennomsnitt for vindhastigheter gjennom Uke 1 i 2012. Målinger er for 10m og 49m over bakken. Hastighetene på 500 meter er regnet ut fra de andre målingene. Data er fra Vestavind AS på et udefinert område i Norge [4].

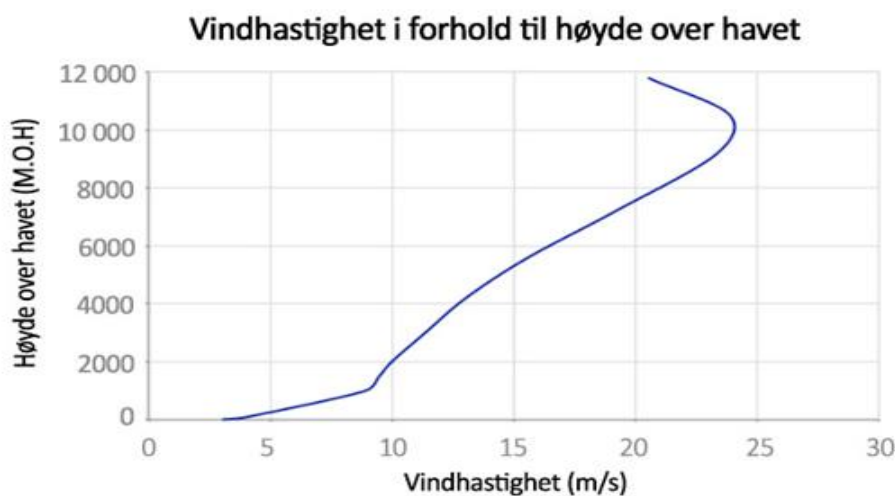
Vind er aldri helt konstant og vil fluktuere over tid. I løpet av timer kan vindhastigheten endre seg med flere meter per sekund (Figur 1.2). Årstidene har også innvirkning på vinden der vintermånedene har høyest vindhastighet. Ved å undersøke målingene vises det at gjennomsnittlig vindhastighet i Norge for februar kan være det dobbelte av i august (Figur 1.3) [4].



Figur 1.3 Gjennomsnittlig vindhastighet i 2012 for 49 meter over bakken. Data er fra Vestavind AS på et udefinert område i Norge [4].

Vinder høyere over bakken er sterkere og mer konsistente. Siden nominell effekt fra vind øker i tredje med vindhastighet er det mye å hente dersom vindene kan utnyttes til elektrisitetsproduksjon [6]. Loyd viser effekttetthet til vind P_w ved hjelp av lufttetthet ρ og vindhastighet V_w i formel

$$P_w = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_w^3 \quad (1)$$



Figur 1.4 Illustrasjon til endring i vindhastigheter på store høyder i Nederland, Figur modifisert fra [5]

Ifølge Figur 1.4 vises det stor økning i vindhastigheter dersom en når opp i store høyder. Som vist ved formel (3) er lufttettheten lavere på slike høyder. Høyere vindhastighet vil fra formel (1) gi en større økning i effekttetthet P_w enn reduksjonen fra den lavere vindtettheten ρ . Dersom teknologier kan utvikles til å nå høyder opp mot 2000m vil en kunne bygge veldig energieffektive system da energitettheten i vinden er høyere.

1.1 Problemstilling

Formålet med denne bacheloroppgave er å gi en oversikt over Airborne Wind Energy som et konsept, samt et innblikk i hvordan AWE kan bidra til fornybar energiproduksjon og det grønne skiftet. Det er utarbeidet en oversikt over etablerte selskaper og forskjellene på deres AWEs konsepter, samt mer detaljert om progresjon og eventuelle fremtidsplaner for 10 interessante selskaper. I tillegg vises utfordringer og mulige løsninger rundt teknologiene.

2. Bakgrunn

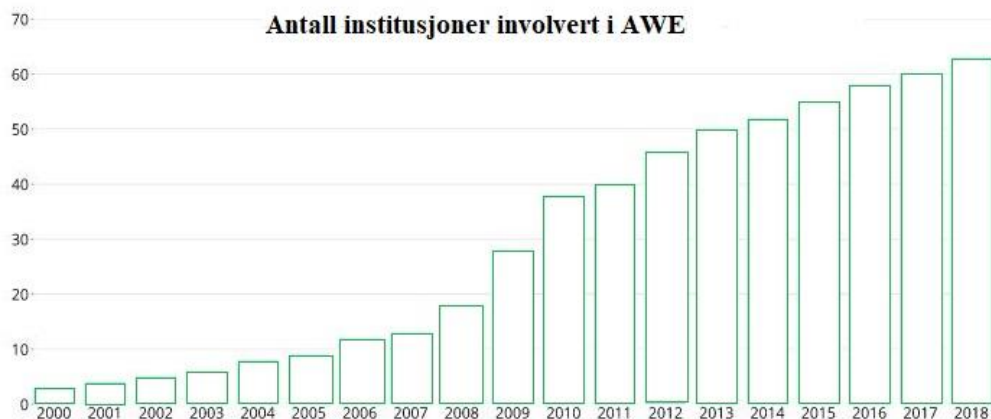
2.1 Hvorfor AWE?

Som bacheloroppgave har vi blitt gitt muligheten til å ta et “Deep dive” inn i hva man fra energisektoren kan se på som et nyere forskningsfelt. Men hva er det egentlig som gjør “Airborne Wind Energy systems” så interessant? I dette kapitlet skal vi prøve å gi en forklaring på hva som gjør AWEs til en aktuell kilde for fornybar energi, samt gi et innblikk i hvorfor noe så nymotens burde utforskes nærmere. En ledende forsker i AWE feltet, Roland Schmehl kommenterer forskjellen mellom konvensjonell vindkraft og AWE slik;

“For conventional wind turbines the tower and foundation transfer the bending moment of the resultant aerodynamic load to the ground. Airborne wind energy systems, on the other hand, are designed as tensile structures and thus require far less material to transfer forces of similar magnitude. As consequence, the system costs can be lower and the environmental footprint can be reduced substantially” ([3] s. XI).

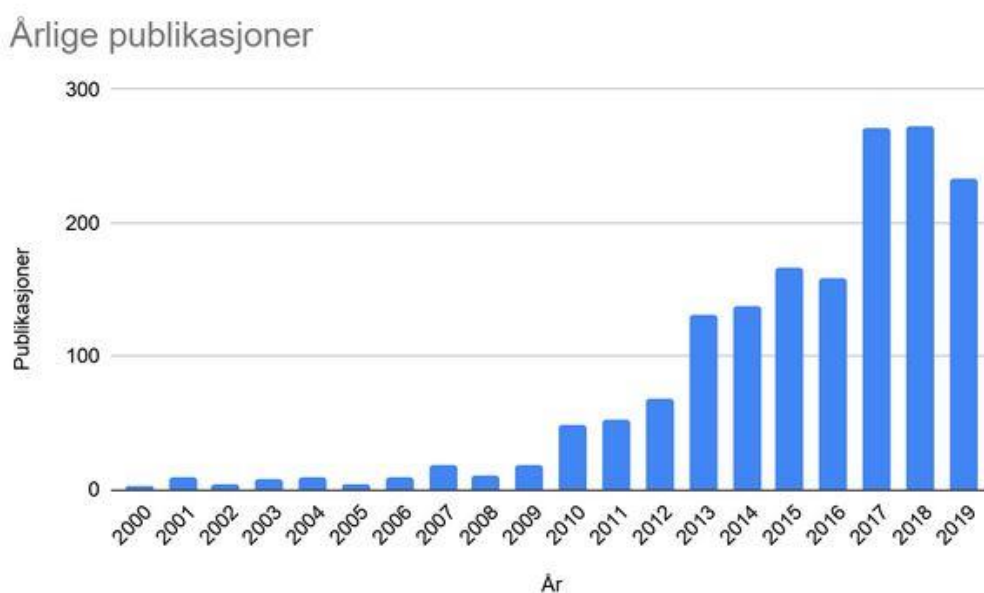
I 1975 ble AWE introdusert som en ny energikilde av verdensrom-pioner *Hermann Oberth*, og ikke mer enn fire år senere ble første eksperimentelle demonstrasjon gjennomført av *Bryan Roberts* i Australia. Året etter (1980) publiserte *Miles L. Loyd* sitt kapittel ***Crosswind Kite Power***, noe som er blitt et fundament for videre forskning på AWEs [3].

“Not much more than a decade ago this subject was pursued by only a few visionary pioneers, but it has since become a rapidly evolving field of activity of a global community of scientists, researchers, developers and investors” ([3] s. XI).

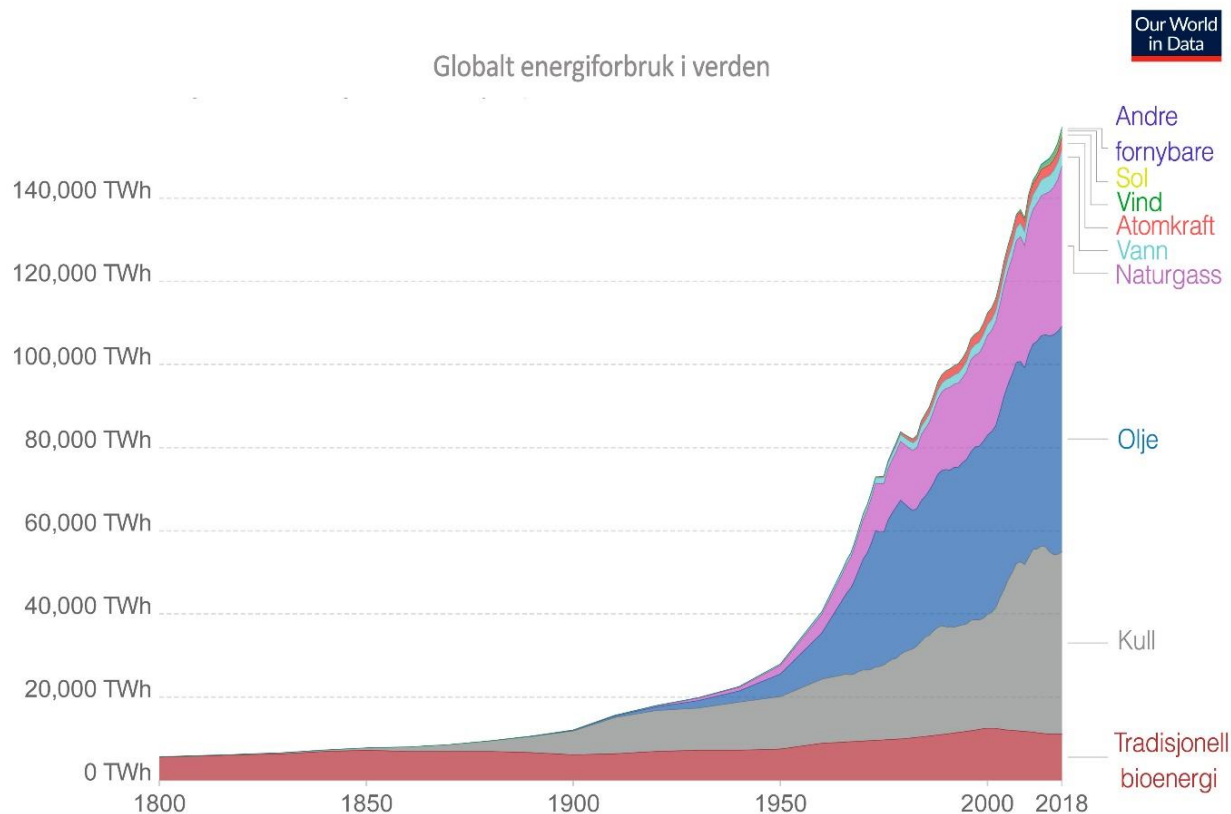


Figur 2.1 Vekst av institusjoner involvert i AWE fra 2000 til 2018. Modifisert fra [7].

Frem til årtusensskiftet hadde AWEs en relativt lav utviklingskurve. Dette endret seg etter at astronaut og professor *Wubbo Ockels* startet opp en forskningsgruppe ved *Delft University of technology, Nederland*. I året 2001 utviklet det tyske selskapet *Skysails* det første kommersielle AWE systemet for skipstrekk ([3] s. 667). Fra den tid til nå kan man se hvordan en rolig utvikling på slutten av 1900 - tallet har vokst drastisk ved åpningen av det nye årtusen (Figur 2.1). Som sett på figuren nedenfor, er AWE av stadig større interesse fra et vitenskapelig synspunkt. Antallet artikler som er publisert har skutt i været siden 2010. Dette er trolig grunnet den store veksten av regnekraft som gir en mulighet for utvikling av kompliserte AWE systemer.



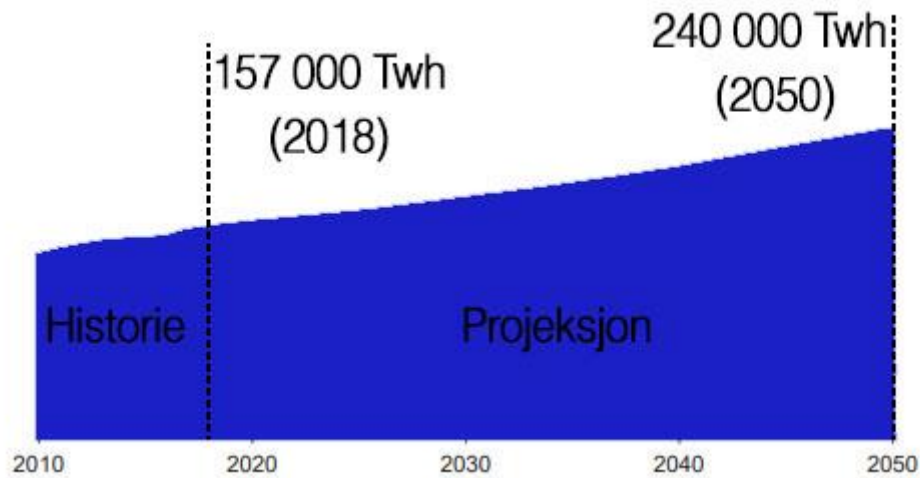
Figur 2.2 AWE publikasjoner gitt årlig siden 2000 [8].



Figur 2.3 energiforbruk verden, farger skiller mellom ulike hoved energiproduksjonsmetoder. Modifisert fra Our World in Data, 2017, [10] data fra [11].

Det er en økende etterspørsel etter ren energi. En årsak er at mange utviklingsland begynner å nærme seg høyere levestandarder, noe som medfører høyere energietterspørsel, samtidig som industrielle land bruker langt mer energi enn det som er bærekraftig [9]. En annen årsak er strengere krav om reduisering. Dermed er etterspørselen på ren energi blitt høyere enn bygging og utvikling av nye anlegg for produksjon av fornybar energi. Veksten av fornybar energiproduksjon i 2018 var på 7,9%. I forhold til verdens totale energietterspørsel (157 000 TWh, figur 2.3) er dette for lavt til å kunne stoppe bruk av ikke fornybare energikilder [10].

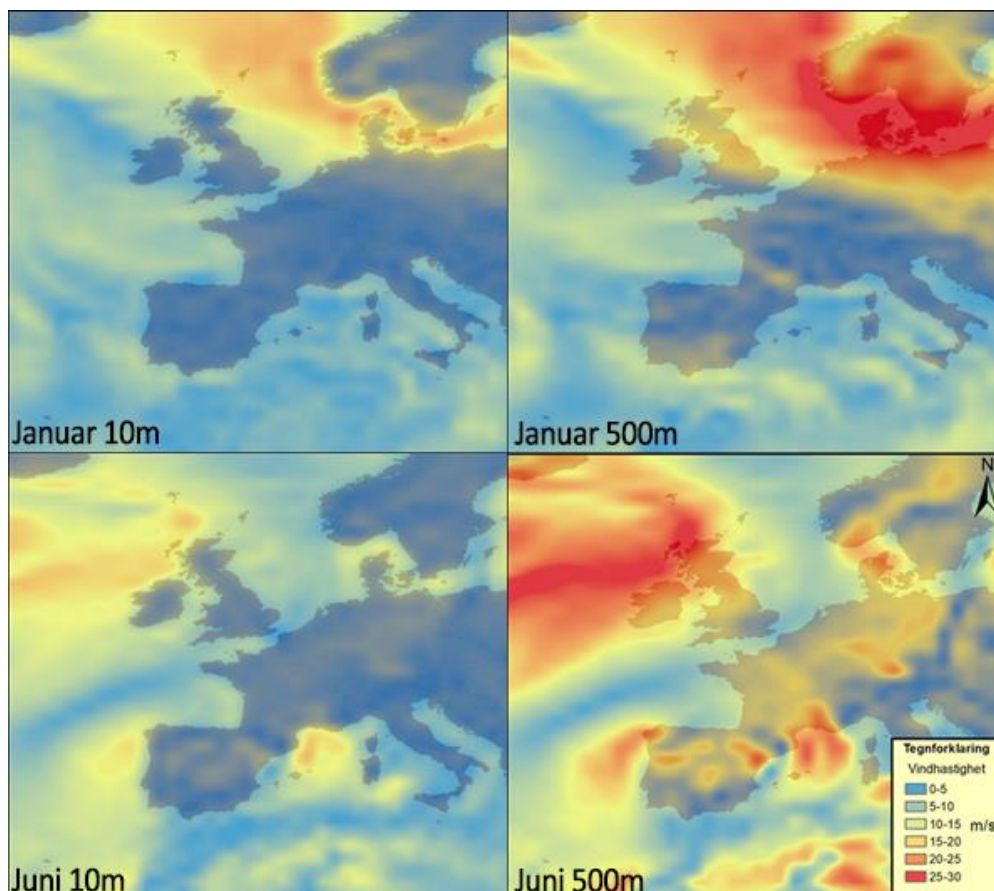
EIA (US Energy Information Administration) har beregnet den globale økingen i energibruk frem til 2050 (Figur 2.4). De forventer en øking på rundt 50% fra 2018 til 2050. Globalt vil dette gi en større etterspørsel av fornybar energi [9]. Ulike beregninger er også laget for Norge. I de mest ideelle senarioer vil energiforbruket synke med rundt 10 TWh. I det mest energikrevende senarioet vil det bli en stigning i forbruk på rundt 15 TWh [12].



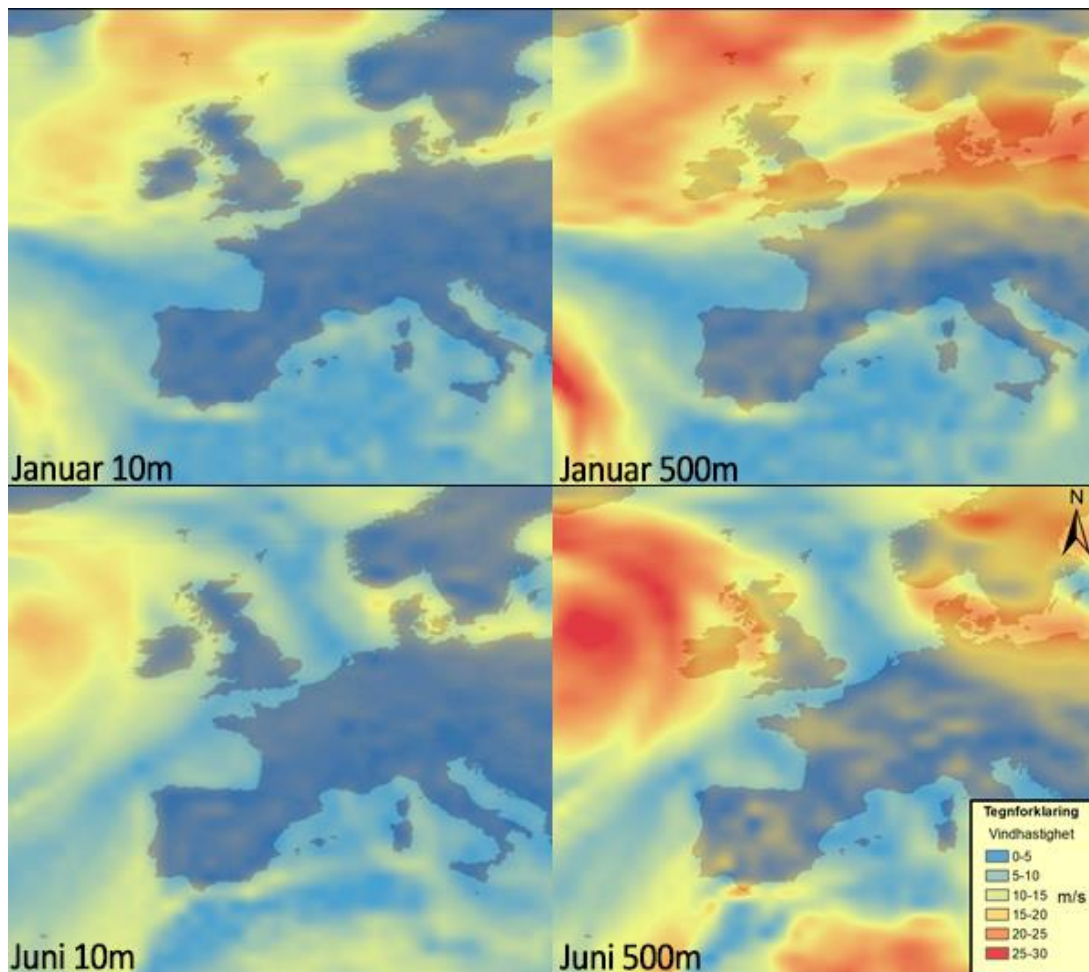
Figur 2.4 Forventet energiforbruk mot 2050 for hele verden, Modifisert fra IEA, 2019, [8].

Da de første ideene om AWEs ble lagt frem kunne systemene i teorien bygges, men de manglet en vital del. De trengte en måte å styre/kontrollere kiten på. Problemet er at kiten må kunne gå i en stabil bane over lengre tidsrom. Grunnet de skiftende vindhastighetene er dette et veldig krevende hinder å overkomme. Da de første planene om AWE kom eksisterte ingen slike styringssystemer. I 1965 publiserte ekspertene *Gordon E. Moore* en artikkel om at datakraft kom til å vokse eksponentielt fremover [13]. Han mente at regnekraft kom til å doubles hvert andre år. 35 år senere er datakraften økt betraktelig. Regnkraftveksten medførte en voldsom økning i teknologi innenfor programvare, droner og datasystemer. Som følge av dette begynte en rekke universitet og firma forskning på denne måten å utnytte vind på store høyder. En av fordelene med AWE er at de utnytter høye og jevne vindhastighetene der en turbin ikke vil kunne gjøre det samme.

Et samarbeid kalt Airborne Wind Energy System modelling, Controll and Optimisation (*AWESCO*) mellom Europeiske AWE selskap og universitet har samlet inn vinddata fra satellittmålinger over en periode på 6 år på størrelser av 11*11 km ruter i Europa [14]. Målingene er gjort i ulike høyder n som sammenlignes med meter over havet i en atmosfærisk trykkskala vist av *European Centre for Medium-Range Weather Forcast* [15]. Formålet med dataene er å kunne bidra til utviklingen av AWE samt tradisjonell vindkraft i tillegg til å gi et overblikk for vindpotensialet [14]. I Figur 2.5 og 2.6 vises vindkart for Europa som viser vindhastighet som endrer seg mellom områder og ved ulike høyder. Kartene gir et overblikk av hvordan vindhastighetene kan endre seg mellom sesonger og år, ved høyder på 10 og 500 meter over havet. På kartene vises store endringer i vindhastighet fra 10 til 500 meter på alle 4 dagene. På bunn av figur 2.6 kan det se ut til at en syklon formes da høye vindhastigheter ser ut til å gå i sirkler. Fra figur 2.5 og 2.6 vises høye vindhastigheter i et belte øst-vest i nord i januar. Samtidig vises et annet vindmønster i juni, med sterke luftstrømmer vest for Storbritannia. Ut fra kartene kan det argumenteres for at Nord-Europa er ideelt egnet for vindkraft, men dypere undersøkelser må gjennomføres før en kan dra en slik konklusjon.



Figur 2.5 Fra venstre vindhastigheter på 10 og 500 meters høyde, øverst er dato 01.01.2011 bunn er dato 01.06.2011. Data fra [14].



Figur 2.6 Fra venstre vindhastigheter på 10 og 500 meters høyde, øverst er dato 01.01.2017 bunn er dato 01.06.2017. Data fra [14].

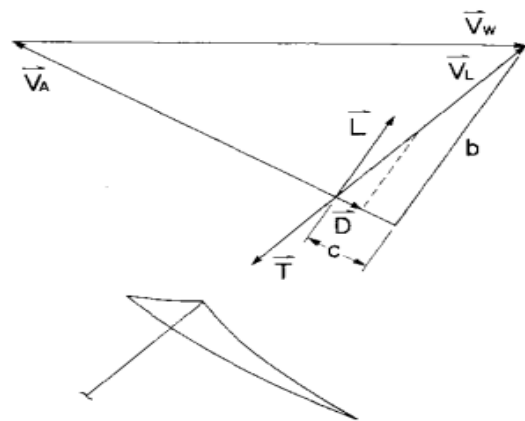
2.2 Teoribakgrunn for energi fra en kite

For å få et innblikk i hvordan et AWE system fungerer må en undersøke kitens bevegelse i ulike vindhastigheter. Dette er grunnleggende for å kunne utvikle et kite system for å produsere elektisitet. Kitens bevegelser kan forstås ved hjelp av aerodynamikk. En delvis realistisk beskrivelse av dette kan gjennomføres med en fly simulator. Det er også mulig å gjennomføre en simplifisert analyse slik som i Loyd [16]. I dette kapittel følges hans utregninger og gir et innblikk for å forstå en kites bevegelser i tre ulike senario.

2.2.1 Vanlig kite

Det første scenarioet er en vanlig eller simpel kite som utnytter energi fra et løft i samme retning som vinden. For å få et innblikk i systemet brukes en enkel kite der det ses bort fra vekten og vaiereens påvirkning på kiten. Det antas at kiten har en konstant hastighet og at den opererer under ideelle forhold. Den genererte effekten er uttrykt ved arealet av kiten A , løft koeffisienten for kiten C_L , effekttetthet for Vind P_w og en funksjon F som representerer den spesifikke modellen for kiten [16].

Det endelige resultatet vil ha følgende form



Figur 2.7 krefter og hastigheter på en vektløs simpel kite [16].

$$P = P_w \cdot A \cdot C_L \cdot F \quad (2)$$

Effekttettheten til vinden er her regnet ut i formel (1). I modellen er funksjonen F regnet ut slik at den gir den øvre grensen for den mulige effekten [16].

Lufttettheten er gitt ved

$$\rho = \rho_0 \exp\left(-\frac{z}{H_\rho}\right) \quad (3)$$

Der $\rho_0 = 1.225 \text{ kg/m}^3$ er standard lufttetthet på havnivå, z er høyden og $H_\rho = 8.55 \text{ km}$ er høydeskalaen for tetthet [14].

En vanlig kite er rettet mot vinden og holder seg statisk dersom snoren er stram. Elektrisitet kan genereres på bakken dersom snoren spinner av en spole som er festet til en generator. Krefte og hastighetene på en vanlig kite er vist i Figur 2.7. Kitens bevegelse viser seg å fortsette fra snoren med en hastighet \vec{V}_L som er på en rett linje med \vec{T} [16].

Effekten til denne enkle kiten er gitt ved

$$P = T \cdot V_L \quad (4)$$

Det totale draget \vec{D} er \vec{D}_K , og siden \vec{L} , \vec{D}_K og \vec{T} former en vinkelrett trekant

$$T = L \sqrt{1 + \frac{1}{\left(\frac{L}{D_K}\right)^2}} \quad (5)$$

der løft er gitt som

$$L = \frac{1}{2} \rho \cdot C_L \cdot A \cdot V_A^2 \quad (6)$$

V_A er funnet ved hjelp av V_w , L/D_K , og V_L/V_w ved analysering av vektordiagrammet i Figur 2.7. \vec{V}_A forlenges med c til det punktet \vec{V}_A står vinkelrett på b og former en vinkelrett trekant [16].

Trekanten gir

$$\frac{b}{V_L} = \frac{L}{T} \quad (7)$$

likning (5) og (7) gir

$$b = \frac{V_L \left(\frac{L}{D_K}\right)}{\sqrt{\left(\frac{L}{D_K}\right)^2 + 1}} \quad (8)$$

i likhet gis

$$c = \frac{V_L}{\sqrt{\left(\frac{L}{D_K}\right)^2 + 1}} \quad (9)$$

fra figur 1,

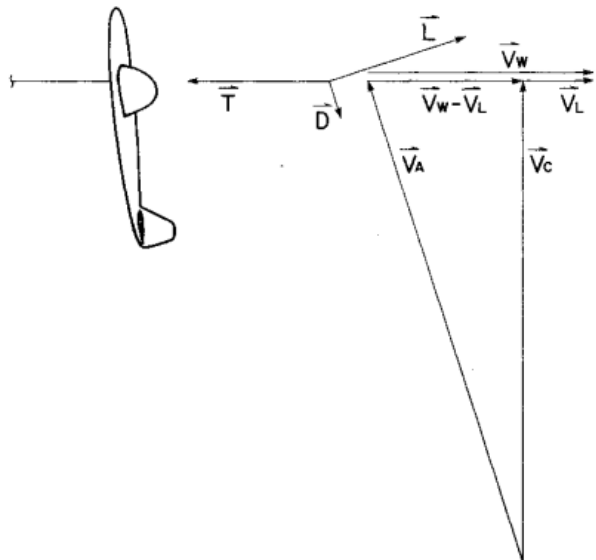
$$V_w = \sqrt{b^2 + (V_A + c)^2} \quad (10)$$

Ved å følge likningene presentert av Loyd [16] får vi en kombinasjon av likning (4-6) og (8-10) der $V_w(V_L/V_w)$ settes inn for V_L gir likning 2, der F blir

$$F_s = V_L/V_w \left[\sqrt{1 + \frac{1}{\left(\frac{L}{D_K}\right)^2} - \left(\frac{V_L}{V_w}\right)^2} - \frac{\frac{V_L}{V_w}}{\frac{L}{D_K}} \right]^2 / \sqrt{1 + \frac{1}{\left(\frac{L}{D_K}\right)^2}} \quad (11)$$

2.2.2 Kryssvind kite

Kryssvindkiter flyr nært vinkelrett på vinden. Hastigheten til kiten blir høyere enn vinden og potensialet for energiproduksjon økes. Krefter og hastigheter er vist i Figur 2.8. Det totale draget F er D_K , V_w og V_A er som for den vanlige kiten, V_L er parallell med V_w . V_C er kite hastighet og står normalt på vinden. Elektrisitet er produsert ved en trekraft medvind V_L , slik at den effektive vindhastigheten blir redusert til $V_w - V_L$. Siden T er parallell med V_w , D_K er parallell med V_A og siden L , D_K er vinkelrette og V_w , V_C er vinkelrette former kreftene og hastighetene vinkelrette trekkanter [16].



Figur 2.8 krefter og hastigheter på en vektløs kryssvind kite [16].

Som gir

$$V_C = (V_w - V_L)L/D_K \quad (12)$$

Dersom forholdet mellom løft og drag er stor blir V_C og V_A tilnærmet like i størrelse

Slik at

$$V_A = (V_w - V_L)L/D_K \quad (13)$$

Løften til kiten er gitt i likning 6 og blir

$$L = \frac{\rho}{2} \cdot C_L \cdot A \cdot (V_w - V_L)^2 \cdot (L - D_K)^2 \quad (14)$$

Siden T er på lik linje med V_L , siden L og T har tilnærmet lik størrelse, resulteres det i effekt produsert

$$P = V_L \cdot L \quad (15)$$

En kombinasjon av likning 1, 14 og 15 og simplificert gir F som blir

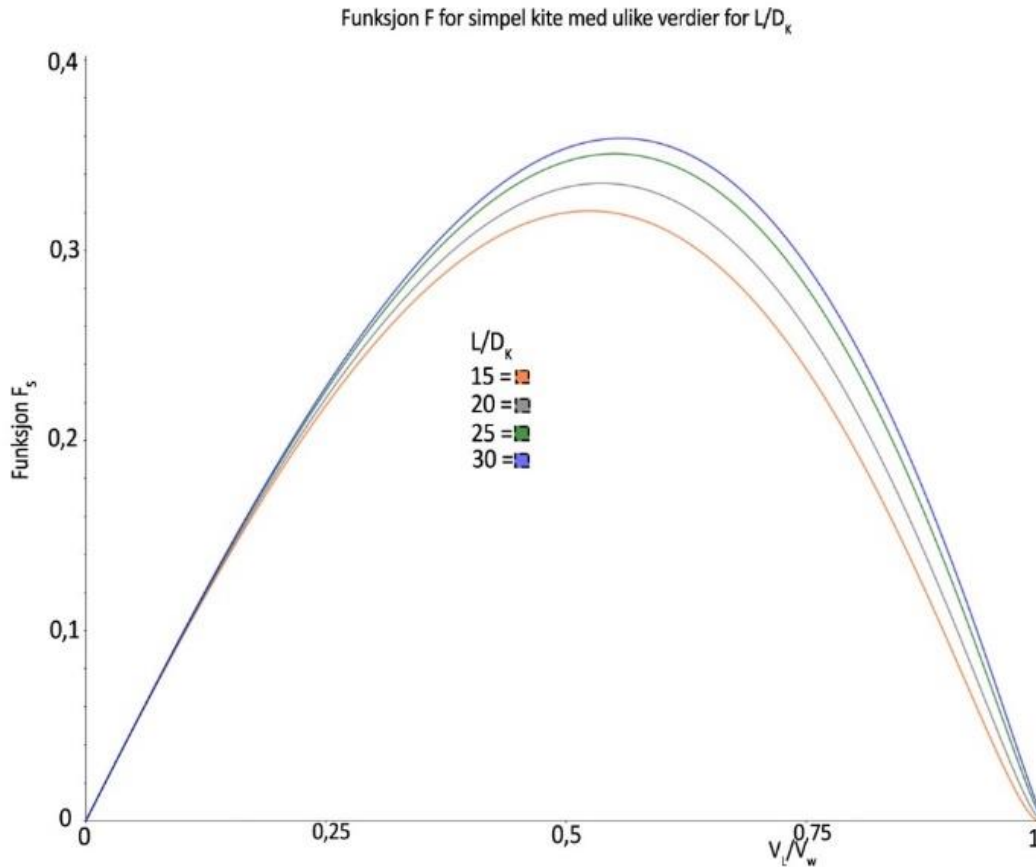
$$F_C = (L/D_K)^2 \cdot (V_L/V_w) \cdot \left(1 - \frac{V_L}{V_w}\right)^2 \quad (16)$$

Maksverdien til F_C er

$$F_{Cmax} = \frac{4}{27} \cdot \left(\frac{L}{D_K}\right)^2 \quad (17)$$

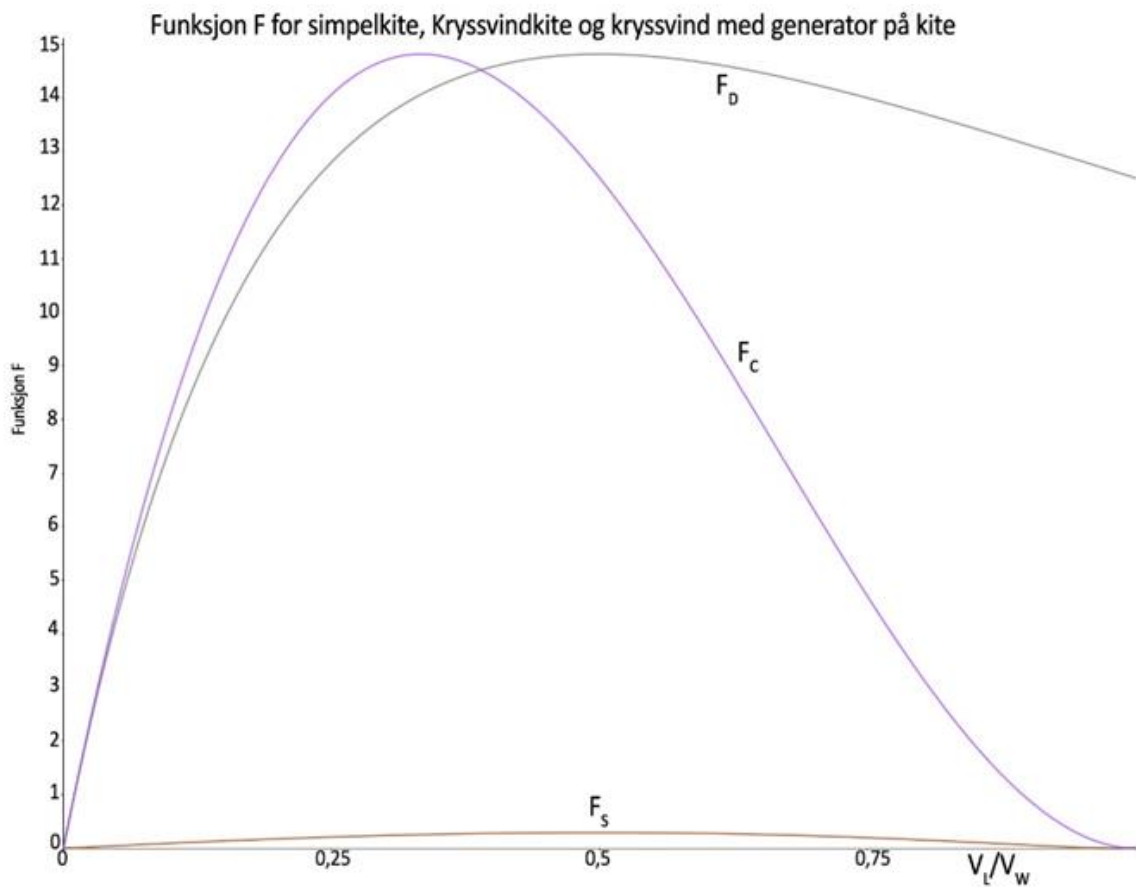
Som skjer for

$$\frac{V_L}{V_w} = \frac{1}{3} \quad (18)$$



Figur 2.9 Effektiviteten til en enkel kite gitt ved F_s med ulike verdier for Løft til drag L/D_k samt last hastighet i forhold til vindhastighet. V_L/V_w . Figur modifisert fra [16].

Som vist i likning (11) viser F_s effektivitet for utnyttning av vindkraften til en enkel kite. I figur 2.9 vises maksverdi av F_s for ulike Løft til drag ratioer og for V_L/V_w fra 0 til 1. For en enkel kite er økningen av F_s liten når L/D_k stiger. Et slikt konsept vil dermed ikke kunne utnytte energien i vinden optimalt. For å få en sammenligning med andre systemer vises det i figur 2.10 maksverdi av Funksjon F for En enkel kite, kryssvind kite og en kite med elektrisitetsproduksjon ombord. Det vises en stor økning i den maksimale energieffektiviteten (F_{max}) for en kryssvindkite (F_C) og en dragkite (F_D) i forhold til den enkle kiten (F_s). Funksjonene er vist for V_L/V_w fra 0 til 1 og med et løft til drag forhold på 10. Kryssvindkitten vil nå høyeste effektivitet når V_L/V_w er ca 1/3. For dragkitten jevnes kurven ut. Dette viser at dragkitten kan produsere for høyere verdier av V_L/V_w enn de to andre systemene. Maksverdien ligger på ca 1/2. Både F_C og F_D kan høste mye energi i forhold til F_s . Det er trolig derfor forskning på AWE hovedsakelig baserer seg på disse to systemene.



Figur 2.10 Energieffektiviteten F_{max} for tre ulike senario i forhold til V_L/V_w med $L/D_K = 10$. Modifisert fra [16].

3. Metode

3.1 Hva som undersøkes

Målet med denne bachelorgrad er ikke de vanlige produksjonsmåtene for fornybar energi, men heller å gjøre en studie på vinddroner/AWEs som et bidrag til grønn energiproduksjon. Vi tar for oss litt om historie, kostnader, størrelser, bruksområder og hvorfor dette kan være et godt alternativ.

Vi startet med planer om å besøke AWE-selskapet Kitemill på Voss. Der skulle vi få se hva de drev med og gjerne gjøre noen intervju. Da tiden nærmet seg kom Covid utbruddet og mulighetene for å reise på besøk var borte.

Våre nye planer ble dermed å lage en simulering av en kites flybaner med ulike variabler som endres. Dette krevde dataprogrammer som vi ikke har lært i Fornybar Energi studiet slik som Matlab. Dersom vi kunne vært på skolen og hatt gjennomgang av hva som skulle gjøres direkte med veileder hadde dette også blitt enklere å gjennomføre. Grunnet mangel kunnskap om bruk av Matlab ble også denne ideen lagt vekk.

Vi endte dermed med å heller lage en Oversiktsoppgave om AWE. Dette ble gjennomført ved å gjøre et bredt internett søk for å finne ut om selskaper som forsker på Airborne Wind Energy systems (AWEs). Grunnen til dette var å få basis kunnskap om utviklingen i feltet, samt finne frem til hvilke prosjekter som kunne være interessant for oppgaven. Boken *“Airborne Wind Energy – Advances in Technology Development and Research”* er satt sammen av over et tiår med forskning innen feltet. Denne boken ble tatt i bruk for å gi en forståelse for av AWE og vindkraft. Informasjon fra de ulike aktørene som driver med dette i dag, er også blitt brukt for å komplimentere informasjonen gitt i oppgaven. AWE er et relativt nytt konsept innenfor kraftproduksjon, derfor er det ingen fasit om hva som er det mest effektive utnyttingsmetoden. Det finnes flere forskjellige designere som er blitt undersøkt i denne oppgaven, både nasjonalt og internasjonalt. Det undersøkes forskjellige selskapers konsepter på AWE og skaper et bredere bilde av dagens situasjon. Det har blitt undersøkt hva som skiller de forskjellige designene, og hvilke konsumer-grupper de ønsker å tilby energi til. Selv om det finnes et stort potensial for AWE, møter utviklere flere utfordringer. Oppgaven gir et innblikk i hvordan dette løses av ulike selskaper. Det har og blitt sett på utfordringer ved tradisjonell vindkraft, og hvorfor AWE kan være et spennende svar på den økende energietterspørselen.

4. Kunnskapsgrunnlag

4.1 Kort om vindenergi og vinder

Solen forsyner jorden med 1360 watt per kvadratmeter per (utenfor atmosfæren) [5].

Kombinert vil denne innstrømmingen av energi kunne dekke energibehovet i verden. Da jorden er kuleformet er det ikke alle steder på overflaten som får like mye solenergi. Ekvator får mest, mens polene får minst. Vind og havstrømmer transporterer solenergien for å oppnå en balanse. Dette er grunnet temperaturendringer og trykkforskjeller mellom områder [17].

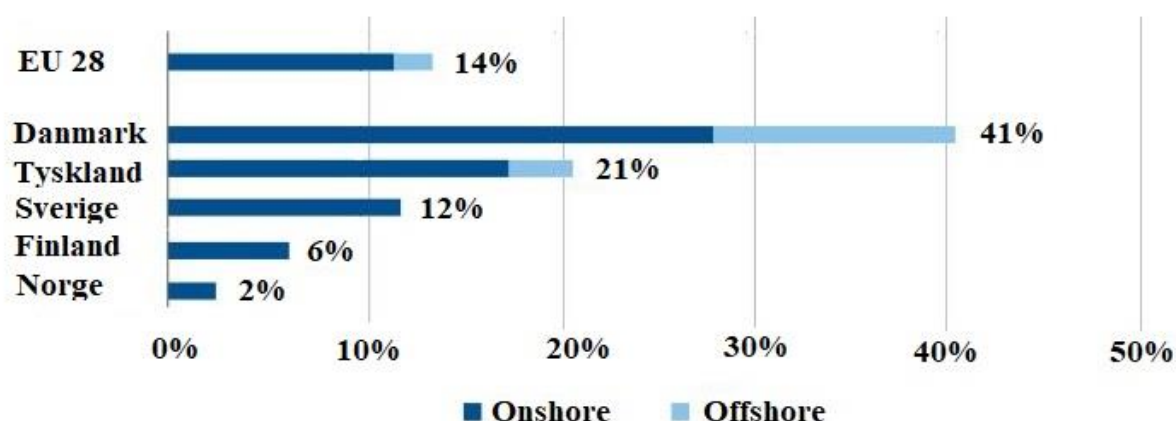
Rundt 2% av solenergien som treffer jorden på daglig basis blir transformert til kinetisk vindenergi [18]. Dette vil si 8,2 EJ. Det er da et massivt potensial for kraftproduksjon fra vind, noe som har blitt utnyttet både til kornkverning, vannpumping og transport samt i senere tid for å produsere elektrisitet.

4.2 Vindkraft

4.2.1 Produksjon av elektrisk energi i Norge

I 1916 ble Norges første vindturbin beregnet for produksjon av elektrisk energi satt opp av *Dahles Vindkraftverk* på Andøya. Turbinen leverte strøm til 16 abonnenter. Likevel var det ikke før 1983 at moderne utnyttelse av vindenergi startet som forsknings- og forsøksprogram. Etterfulgt av det første norske vindkraftverket på Titran i Trøndelag [19]. I et land med så stort vindpotensiale for uthenting av ren energi, er det grunn til å lure på hvorfor en ikke har bygd ut mer. Trolig kommer det av vår rike tilgang til vannkraft. Det kan i senere tid også ha å gjøre med utviklingen av størrelsene på turbiner og anlegg. Størrelsen på vindturbiner har gått fra hva en da ville nevnt som stor, til hva man nå ville beskrevet som “enorm”.

Etterspørselen av grønn energi gjør at vindparker stadig bygges med flere turbiner og for å øke effekten må vindturbinene bygges større. Dette medfører tårn med over 200 meter til turbinfestet (*GE Haliade X* er verdens største vindturbin med sine 260 meter opp til tuppen av turbinbladet). Den økende størrelsen på turbiner utgjør en trussel mot natur og dyrefauna. I samsvar med dette har motstand fra lokal og nasjonal natur- og miljøforkjemping fått mer oppslutning.

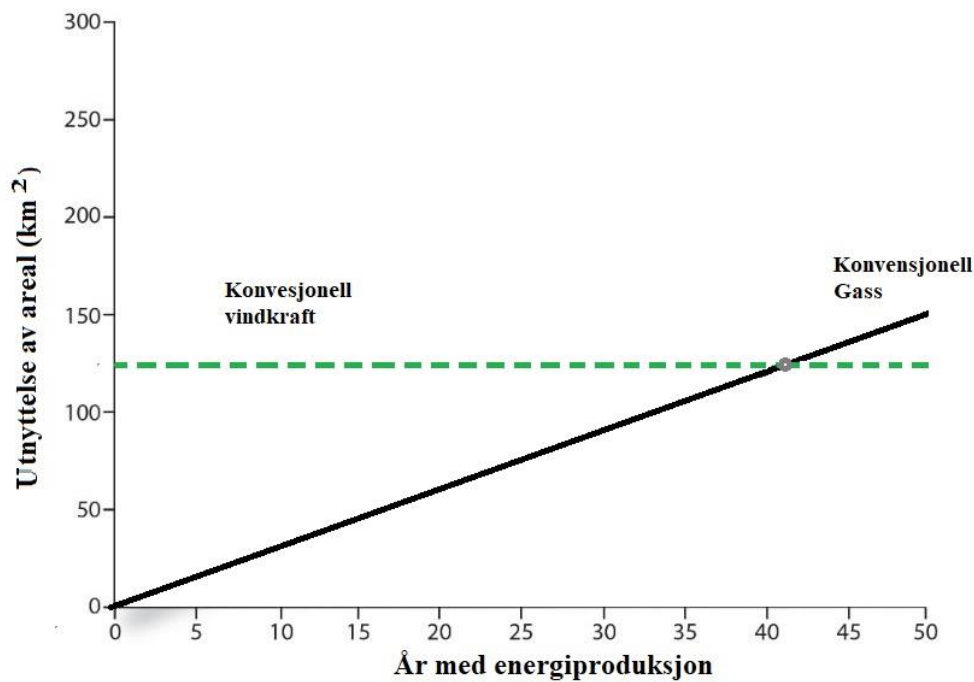


Figur 4.1. Andelen energi som ble dekket av vind året 2018. (Adaptert fra [17].)

På figur 4.1 kan man se hvor stor del av strømforbruket i året 2018 som ble dekket av energi fra vind. Her har vi valgt å sammenligne med våre nærmeste naboer, og Tyskland grunnet deres raske utbygging av vindkraft. Samlet strømforbruk i Europa og hvor mye som ble dekket av vind er beskrevet med EU28 [20]. Vi ser at Norge har en tydelig lavere andel utbygd vindenergi enn våre naboer. Som nevnt er dette trolig et resultat av at vi har hatt rikelig tilgang til vannkraft [21].

4.2.2 Utfordringene ved videre utvikling av vindkraft på land

Tradisjonell vindkraft utnytter vinden på høyder mellom 100 og 200 meter. Snitt vindhastighet på denne høyden er antatt å være under 5 m/s, noe som sørger for at vindturbiner må bygges i egnede områder med høy vindgaranti [6]. Dette kan ofte være et problem da områdene kan ha store bestander av fugl og dyr. Vindparkene trenger store, ubebodde arealer. Dette kan gi tap av habitat og hekkeområder for fugler og ville dyr. I en studie gjort av NINA på Smøla fortelles det om stor påvirkning på rovfugl i området. Årlig dør mellom 5 og 10 havørn grunnet vindparken i tillegg til mellom 10 og 20 ryper [50]. Et håp er at AWE systemer vil ha mindre innvirkning på fugler og annet dyreliv enn tradisjonelle vindparker. Vindparker blir ofte plassert i populære naturområder, noe som også kan møte motstand fra lokalbefolkningen.



Figur 4.2. Arealet som kreves for lik mengde energiproduksjon per år. Modifisert fra [22].

På figur 4.2 kan man se hvor mye areal som kreves per år med produksjon av 1TWh energi. Dette gir et lite innblikk i både positive og negative sider ved vindkraft, sammenlignet med andre former for energi. Til sin fordel vil ikke en vindpark kreve mer areal hvert år for å utvinne samme mengde energi, noe som fremstår veldig positivt sammenlignet med for eksempel konvensjonell naturgass. Til gjengjeld kan en se at vindenergi krever store areal allerede fra starten av, noe andre energiformer ikke gjør i samme grad. Dette gjør at konvensjonell naturgass bruker omtrent 42 år for å nå samme utnyttet areal [22].

Norge har vestliggende kystlinje og høyder som er spesielt interessante for utbygging [23].

“Nature across most of the globe has now been significantly altered by multiple human drivers, with the great majority of indicators of ecosystems and biodiversity showing rapid decline. Seventy-five per cent of the land surface is significantly altered, 66 per cent of the ocean area is experiencing increasing cumulative impacts, and over 85 per cent of wetlands (area) has been lost.” ([24]. s. 11)

En storskala vindturbin slik som *MHI Vestas V164* 8 MW består av en turbin som er satt sammen av et hoved tårn (~700 tonn stål), naselle (~100 tonn stål), 3 blader (~100 tonn glassfiber) og opp mot 4000 tonn betong (tilsvarende 521,7 tonn CO₂ [25]) som fundament.

Det er forståelig hvorfor prisen av materialene som skal til for å bygge en slik vindturbin dominerer den samlede kostnaden for vindenergi ([3] s.7). En annen utfordring for økt størrelse av vindturbiner på land er flaskehals i infrastruktur og transport [26].

Det er her AWEs kommer inn i bilde som en aktuell løsning på mange av problemene dagens vindenergiproduksjon har.

4.3 Airborne Wind Energy

4.3.1 AWE mot det grønne skifte

En viktig side ved AWEs er at en utelukker nedetid på grunn av vindstrømmer som endrer seg. Solkraft er avhengig av direkte energi fra solen, og tradisjonell vindkraft er avhengig av kraftige nok vinder til å kunne drive produksjon. AWEs påvirkes mindre av dette problemet da vindene på de ønskede høydene er mer stabile, og med en høyere hastighet, som igjen sørger for at det kan drives med en kontinuerlig produksjon ([3] s.10).

En annen interessant faktor en kan utnytte med AWEs er muligheten å variere høyder hvor det samles vindenergi. I motsetning til tradisjonelle vindturbiner, som er satt til en bestemt høyde, kan AWEs regulere høyden på produksjonsområdet til der det oppnås best effekt. Dette gjør at AWEs kan utnytte et større område til å produsere energi. Ved å kunne regulere høyde og produksjonsområde kan AWEs tilby en jevnere produksjon enn tradisjonelle vindturbiner, som er et interessant argument for AWE ([3] s.16).

Eksempel: en vindpark har produsert på maksimal effekt en hel dag. De neste tre dagene er produksjonen lavere enn etterspørsel. Ingen effektive lagringssystem finnes og dermed vil ikke vindparken kunne supplere etterspørselen de følgende dagene. I slike tilfeller trengs produksjon som kan supplere den resterende etterspørselen av energi. Som regel brukes olje, kull, gass og atom eller vannkraft til dette. Vinddroner har potensiale for å supplere deler av denne etterspørselen siden de kan produsere der vindforholdene er mest ideelle ([3] s.10).

4.3.2 Historie

Ønsket å utnytte vindstrømmer som befinner seg på høyder over bakkeplan er ingen ny og revolusjonerende ide. Det kan derfor være viktig å se på hvordan dette ønsket startet, og hva slags innovasjoner som har blitt gjort for at AWEs har kommet seg dit de er i dag.

- 1826: Briten *Georg Pocock* patent på et fartøy med navn *Charvolant*. Dette var en hesteløs vogn som ble trukket av kiter, og som klarte å oppnå en hastighet på 32 km/t. Selv om dette ikke erstattet hest og vogn, eller forbrenningsmotoren, så var det bevist at det var mulig å utnytte den kinetiske energien i vind ved hjelp av en kite [27].
- 1935: Dette var året en så første patent på AWEs som en måte å produsere elektrisk energi. Nederlenderen *Aloys Van Gries* designet et system som bestod av vindturbiner som var holdt oppe ved hjelp av kiter [28].
- 1979: Professoren *Bryan Roberts* begynte å designe og teste en flyvende vindturbin, som var bundet til bakken. *Roberts* håpte at prosjektet *Giromill* skulle tilfredsstille en økt energietterspørsel [29].
- 1980: *Miles L. Loyd* publiserer en artikkel om *Crosswind Kite Power*, med mål om å gi en forståelse for kryssvindkiter til energiproduksjon. Publikasjonen gir et innblikk i krefter, hastigheter og effekt. [16].
- 2006: Selskapet *Makani* grunnlegges, et amerikansk selskap lagd av kitesurfere som ville se om de kunne utnytte samme vindenergi de brukte til surfing, til å produsere elektrisk energi. Selskapet fikk støtte av *Google* og *Shell* for å utvikle deres glider konsept [30].
- 2008: *Kitemill* ble grunnlagt som første norske AWE selskap [31].
- 2009: *Skysails Marine* utvikler et system som utnytter store kiter til å trekke skip ([3] s. 667).
- 2013: *Ampyx* er første AWE selskap som registrerer turbinen sin i et nasjonalt luftfartøy register som et «fjernstyrt fartøy» [32].
- 2013: Publikasjonen *Airborne Wind Energy, Advances in Technology Development and Research* av Roland Schmell gir en forståelse for AWEs og mulighetene for AWE.
- 2015: I januar ble samarbeidet *AWESCO*, som står for *Airborne Wind Energy System Modelling, Control, and Optimisation*, inngått. Selskapet ble støttet av EUs forskning- og innovasjonsprogram Horizon 2020. Målet med dette selskapet er å sammen løse de vitenskapelige og tekniske utfordringene med AWE [33].

2018: Ny versjon av *Airborne Wind Energy, Advances in Technology Development and Research* publiseres i ny utgave siden den raske utviklingen av AWE systemer medførte at den første publikasjonen i 2013 ble utdatert ([3] s. XI)

4.4 Teknologier

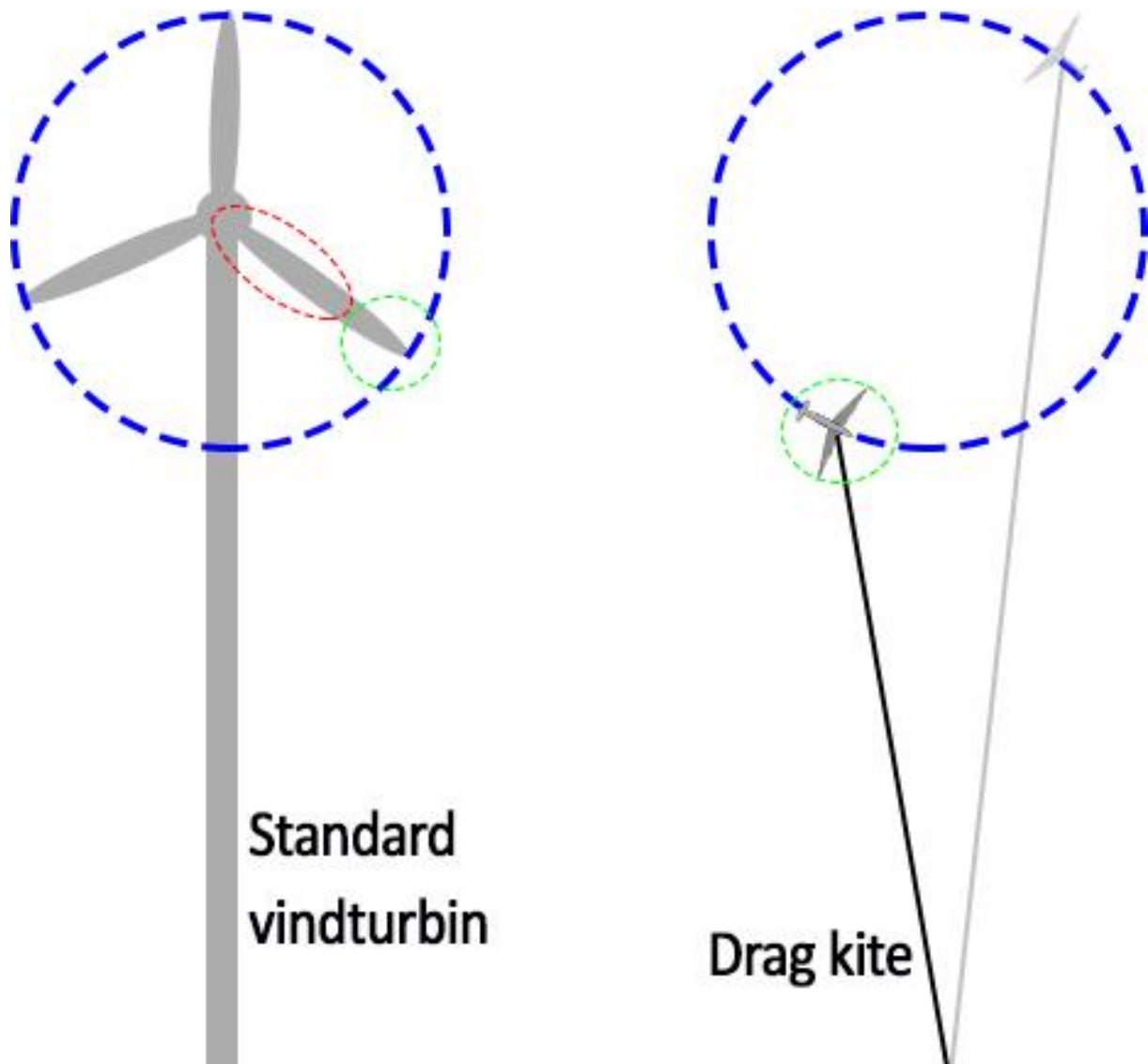
I dette kapitlet undersøkes generelle AWE systemer og hvordan de fungerer. Optimalisering av et kitesystem avhenger av forskjellige faktorer som kontroll systemer, aerodynamikk, metrologi og materialoppbygging. Detaljerte undersøkelser av de nevnte temaer er ikke innenfor målene med denne bachelorgrad. I kapittel 4.4.1 og 4.4.2 beskriver vi systemene for kryssvind energiproduksjon og produksjon fra drag. Kapitlene gir et generelt innblikk for systemene fra oppbygging, baner samt ulikhetene mellom de to.

Utnytting av vind på store høyder kan være krevende da den kinetiske energien i vinden er høyere. Det er også en fare for lynnedslag, påvirkning av flytrafikk samt større temperaturendringer sammenlignet med vanlige vindturbiner. AWE systemer kan også brukes på båter til framdrift eller til å generere elektrisitet ([3] s. 667). Da teknologien er i utviklingsfase er det usikkert hvordan et AWE system bør se ut og det finnes mange varianter som testes. AWE systemene skiller seg først og fremst i hvor den elektriske energien blir produsert. Den vanligste måten er elektrisitetens generering av løften fra en kite på en line. Andre metoder som *KiteGen Carousel* har en stasjon på bakken som snurrer rundt ved løftekraft fra kiter, stasjonene kan være på over 1 km i diameter og er foreløpig bare et mål for fremtiden [34]. En tredje måte er å ha generatorer direkte på kiten og strøm blir transportert gjennom kabel til bakken. Videre splittes systemene i hvordan de utnytter vinden. De fleste bruker system der kiten er tilnærmet vinkelrett på vinden. Da er det bare trekraften fra kiten som blir overført til bakken. Det finnes også tilfeller der kraft blir ført til bakken som rotasjonsmoment. Systemene har mange ulike lette- og landefunksjoner. Det kan brukes rotorblader, fleksible materialer, eller at kiten er lettere en luft. Det finnes også systemer, slik som *EnerKite*, der de svinger kiten rundt i sirkler for å få den til å lette [35]. De fleste prosjekter er enten under planlegging eller under test og utviklingsfase. Dermed er det vanskelig å vite hvilket system som er det mest effektive. I fremtiden vil en trolig, på lik linje med tradisjonell vindkraft, se at det utvikler seg en standard for AWEs.

	Elektrisitetsproduksjon	Flysystem	Løft og landefunksjon	Antall kiter	Navn	
AWE systemer	Fastmontert bakkestasjon	Vinkelrett på vind	vertikal	1	KiteMill Skypull	
			horisontal		Twingtec E-kite EnerKite Ampyx	
			flerkits letting	4	Kiteswarms	
			fleksibel kite	1	Kitepower Sky sails Power KiteGen stem Kiteenergy	
		roterende kitesystemer	fleksibel kite	7	Windswept	
				1	Kitewinder	
		bevegelse på bakkestasjon	Vinkelrett på vind	under utvikling	uvist	KiteGen Carousel X-Wind
	Montert på kite	Vinkelrett på vind	Vertikal	1	Makani Windlift Kitekraft	
			flerkites letting	2	Kite X	
		roterende kitesystemer	Lettere enn luft	1	Altaeros	
			fleksibel kite	1	Bladetips Sky WindPower Brainwhere	
	Prosjekt fase					
	Planlegging					
testing og utvikling						
under salg						

Figur 4.3 Oversikt over ulike selskap og forskjellene deres på AWE systemer. Adaptert fra [7].

Figur 4.3 viser en større oppslutning av selskap som har valgt å utnytte løftet fra kryssvind fremfor å generere elektrisitet på kiten. Det er tydelig at de fleste velger et system der kiten flyr vinkelrett på vinden grunnet den høyere effektiviteten som kan oppnås vist til i figur 2.4. Løft- og landefunksjon er varierende da de som regel er laget ulikt for hvert enkelt kitesystem. De fleste selskap er nå i et stadium der kitedesign planlegges. Flere har begynt med tester, simuleringer og programvare som kan gi kiten konstant flyging over lenger tid.



Figur 4.4 Standard vindturbin sammenlignet med en kite med energiproduksjon på selve kiten. Grønn sirkel er høy rotasjonshastighet på turbinblad/kite, rød sirkel er lav rotasjonshastighet for turbinblad.

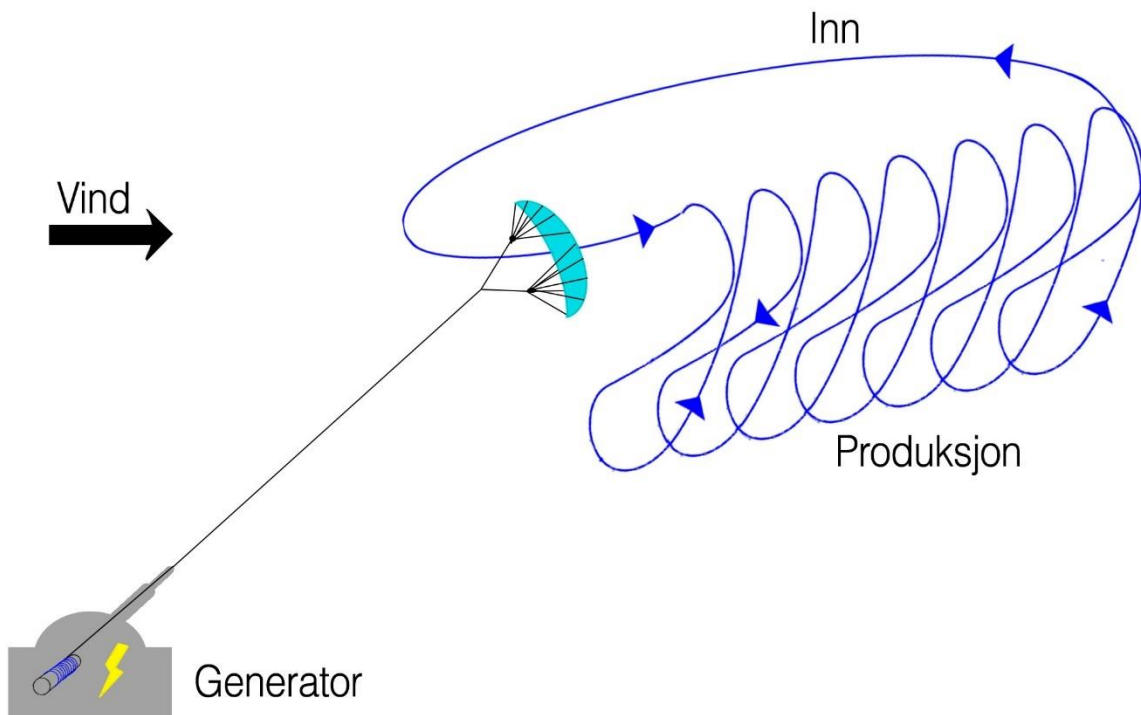
I Figur 4.4 vises en tradisjonell vindturbin i forhold til en kryssvindkite som produserer elektrisitet fra ekstra drag. En av de interessante sidene av AWEs er at det utnytter rotasjon der som ellers ville vert tuppen på et turbinblad (grønn sirkel) som vist i Figur 4.4. Fra Twidell & Wier har en turbin lavere hastighet innerst (rød sirkel) på et turbinblad og høyere ytterst (grønn sirkel) [5]. Det vil si at kiten jobber på det mest ideelle område fra turbinen (grønn sirkel). En slik sammenligning er ikke helt nøyaktig, men fungerer for å gi et innblikk i hvordan en kite utnytter vinden i forhold til en tradisjonell vindturbin. I praksis vil også kiten jobbe på større høyder enn turbiner.

4.4.1 Kiter med elektrisitetsproduksjon på bakken

En kryssvindkite er som regel separert mellom faste (glider) og myke kitekropper. Prinsippet er det samme for begge, men det er ulike fordeler og ulemper med hver av dem. En myk kite vil være mindre robust enn en fast kite, men enklere å lette/lande. Den myke kiten vil også være mindre kostbar, dermed er det som regel disse som brukes i oppstartsfasen for nye AWE prosjekter. Kontrollsystemene er ulike; der en myk kite blir styrt av slakking og stramming i liner og en fast kite som regel styres ved å bevege mekaniske deler av selve kiten [7]. Et AWE system for kryssvind består av bakkestasjon/generator, kontrollsystem, liner og en glider/kite. En glider består av kropp, hoved vinge, haleror og elevator-vinger. En myk kryssvindkite består av et seil med oppblåsbare flottører.

Ved hjelp av en aerofoil designet vinge beveger luften seg raskere på oppsiden noe som ifølge *Bernoullis likning* gir en trykkforskjell som løfter vingen oppover slik som på et fly [5]. En kryssvindkite har som mål å stå vinkelrett på vinden da mer vind beveges seg over vingen og trykkforskjellen blir større. Dette kan ikke oppnås fordi kiten er festet til bakken og vinden endrer retninger. Ved å komme nærmere vinkelrett på vinden blir mest mulig vind dyttet over vingene som resulterer i et høyere løft. Mer kraft overføres til bakken som videre gir en høyere effekt [5]. I motsetning til en vanlig flykropp er vingene på et AWE system designet slik at den skal gi mest mulig løft istedenfor fremdrift [7].

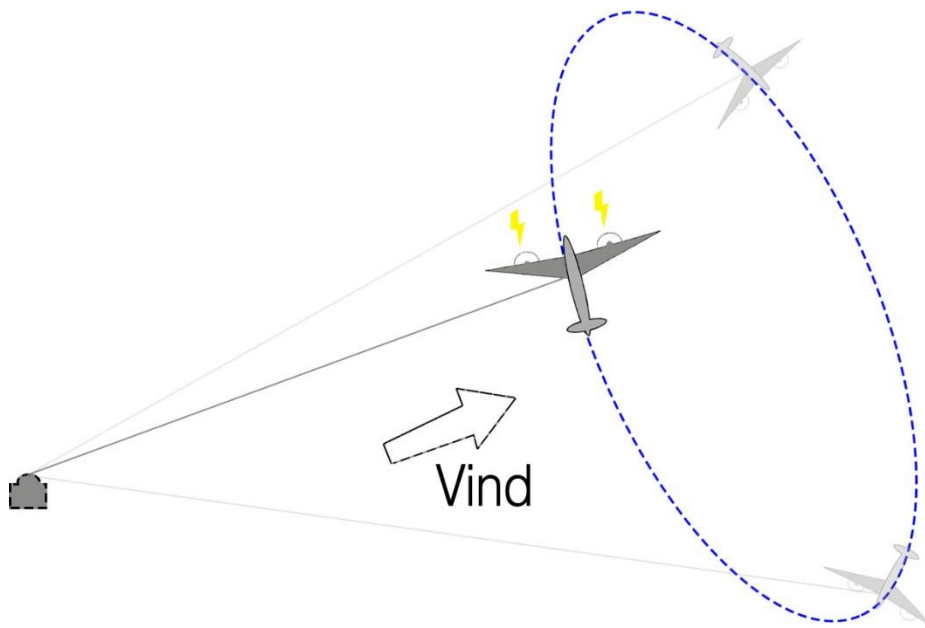
Kryssvindkiter har enn innrulling og en utrullingsfase. Når kiten løftes fra bakkestasjonen vil den gå i en 8-talls bane som drar kiten ut som i Figur 4.5. Kiten er festet til en line som drar ut en spole festet til en generator. Den mekaniske energien fra at spolen blir dratt ut blir konvertert til elektrisitet. Når kiten når en viss lengde fra bakkestasjonen begynner innrullingsfasen. Her brukes små mengder elektrisitet for å snøre spolen inn igjen. Myke kiter slakkes for å redusere luftmotstand og sendes i en bane tilbake som vist i Figur 4.5). En fast kryssvindkite har som regel mulighet til å sendes mot bakkestasjonen ved å bøye mekaniske deler slik at kiten rettes med fronten mot starten av banen. Banen til en kite kan forstås ved å bruke en kitesimulator. Figur 4.5 viser banen til en kryssvind kite fra en simulering gjennomført av *AWESCO* [7].



Figur 4.5 Myk kryssvindkite i en produksjons syklus. Selvlaget figur. Adapter fra [7].

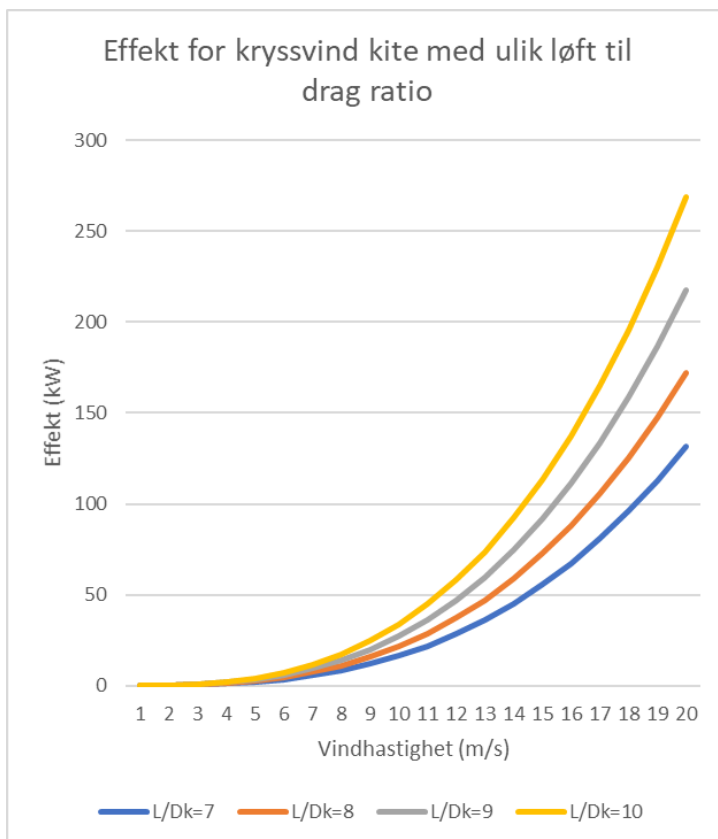
4.4.2 Kiter med innebygde generatorer

En annen måte å utnytte den kinetiske kryssvindenergien er en kite med rotorer festet på hver vinge. I kiten er det innebygde generatorer som produserer elektrisitet. Kiten går i en bane regnet ut for å passe kiten og vindforholdene (Figur 4.6). Kiten lager et ekstra drag ved at turbinene gir en ekstra motstand mot luften. Det ekstra draget dytter rotorene rundt. I motsetning til kryssvindkiter er det ikke løft (\vec{L} i Figur 2.8) som gir effekt, men det ekstra draget (\vec{D} i Figur 2.8) på rotorene. En slik kite genererer hele driftstiden siden den ikke trenger enn innspolingsfase [7].



Figur 4.6 Kryssvind kite med innebygd generator i en produksjonsyklus. Adaptert fra [16].

4.4.3 Hva påvirker effekten til en kite

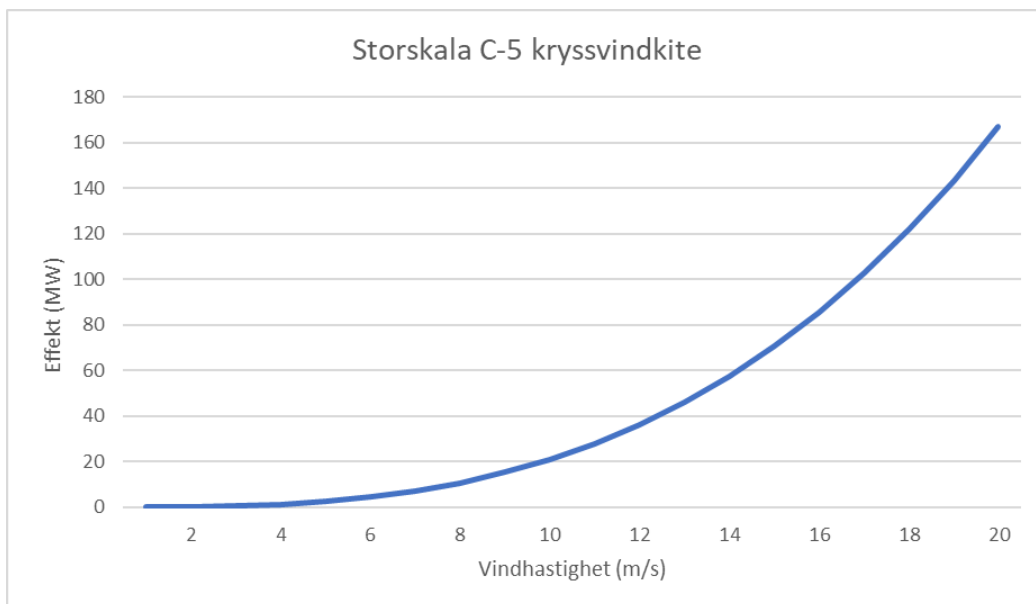


Tabell 4.1 Parametere til Figur 4.8 og 4.9, for en mindre kryssvindkite sammenlignet med en C-5 kite

Parametere	kryssvindkite	C-5 kite
Vindtetthet ρ	1,299 kg/m ³	1,299 kg/m ³
Areal	3,7 m ²	576 m ²
CL	1	1
L/DK	9	20

Figur 4.7 Effekt for en kryssvindkite med løft til drag forhold fra 7 til 10. Parametere gitt i Tabell 4.1.

Faktorer som vindhastighet, løft til drag og areal virker på effektiviteten til kiten. For en kryssvind kite er det en fordel med høye løft til drag forhold da energiproduksjonen er avhengig av løftkraften til kiten. Ifølge Loyds modell gir formel (2) effekten til en kryssvindkite [16]. Formlene er laget for et spesifikt design med spesifikke parametere som gis i Tabell 4.1. Figur 4.7 gir et innblikk i hvordan effekten til en kite er påvirket av Løft til drag forholdet. Ved høyere verdier for L/D_K øker effekten på høyere vindhastigheter. Det er dermed ideelt å kunne konstruere systemer med høy L/D_K . I tillegg til løft drag forholdet vil også størrelsen på kiten påvirke energiuttaket. For eksempel kan en kite på størrelse med et C-5A Galaxy fly med parametere fra tabell 4.1 gi opp mot 22 MW effekt ved en vindhastighet på 10 m/s som vist i Figur 4.8 [5]. Dersom enn kan nærme seg flere MW i effekt vil AWEs være veldig gunstige. Det er trolig flere tiår til en slik størrelse kan bli realistisk.



Figur 4.8 Effekt til en kite med samme størrelse som et C-5A fly med løft drag ratio 20.

4.4.4 Kobling til bakken og generator

Kiten er koblet til bakken via en line. Den må tåle løft fra kiten i tillegg til at den må være tynn og lett for å redusere ekstra drag fra selve linen. I tilfeller for elektrisk generering i kiten må linen også ha mulighet til å føre elektrisitet til bakken. Linen er som regel spesiallaget av syntetisk fiber for å kunne nå ideelle verdier for vekt, tykkelse og styrke. Linen er videre koblet til en spole som har en diameter og en vidde som skaleres med diameter på line, lengde og vekt. Generatoren er koblet til spolen som snurres ut når kiten trekker i linen.

5. AWE Selskaper Nasjonalt/Internasjonalt

5.1 Amerikanske Selskaper

5.1.1 Makani

Makani Power er et amerikansk selskap stasjonert i Alameda, California. De forsker på produksjon av energi i stor skala. *Makani* ser det store energipotensialet en kan utnytte ved hjelp av AWEs, og startet dermed forskningen på å kunne utnytte denne kilden i 2008. Deres første prototype var en soft kite med 2 kW kapasitet. Dette systemet utnyttet utstyr veldig likt det en finner hos kitesurfere; En oppblåsbar kite, liner og en basestasjon. Testene viste et potensiale, men de fikk ikke ønsket effektivitet og kontroll med en myk kite. For å øke effektiviteten ble det utnyttet glidere.

I 2010 ble prototypen **Wing 4** med en effektivitet på 10 kW, og vingespenn på 5.5 m testet. Denne viste at en glider er mye mer manøvrerbar enn en kite. **Wing 4** ble også brukt til å teste deres første automatiserte fly-system.

Wing 7 var *Makani* sin første prototype med turbiner påmontert på glideren. Den bestod av en vinge med 8m spenn og 4 turbiner med 20 kW samlet effekt. Denne testen hjalp med å løse overgangen fra lette- og landemodus til produksjon. Løsningen de bruker er å bruke turbinene som motorer, lik en standard drone, for å løfte seg selv til riktig høyde.

Makani sin siste prototype, med navn **M600**, er en større versjon av **Wing 7** modellen. Den ble lansert i 2014 [36].

M600 har et vingespenn på 26_m og består av 8 turbiner, med samlet effekt på 600_kW. Bare én **M600** har nok produksjonskraft til å tilby elektrisitet til 300 hjem. M600 utnytter kryssvinder til å produsere energi, men istedenfor å trekke på en bakkeplassert generator så utnyttes det 8 turbiner som er påmontert på vingen (se figur 16). Egenskapen til å produsere energi ble først testet i 2016, og senere i en offshore test i Norge (Karmøy) i 2019. Sistnevnte test beviste at simuleringen og modelleringen som har blitt gjort fungerte i praksis[36].

Tekniske spesifikasjoner *Makani M600*:

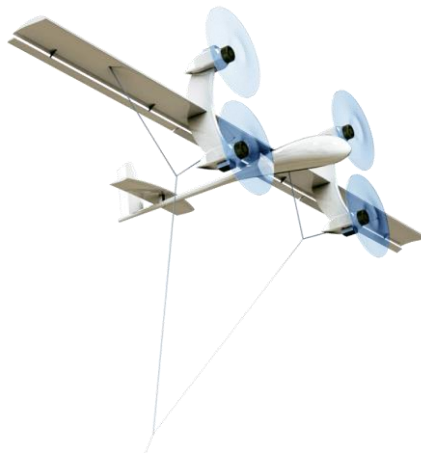
- Materiale, glider: karbonfiber.
- Line: 500_m lang, High density.
- Generator: 8x single propell turbiner, samlet effekt på 600_kW.
- Festepunkter: 2 på vingen, samles til 1 som går til trommel/vinsj.



Figur 5.1 Makani M600 [36].

5.1.2 Windlift

Makani står ikke alene i utviklingen av glidere med ombord-sittende turbiner. North Carolina baserte *Windlift* og deres **APG** system utnytter 4 vindturbiner på deres glider design, på nogenlunde lik måte som *Makani*. Forskjellen på disse selskapene er det ønskede bruksområdet til turbinen. *Windlift* sitt mål er å tilby mobil og pålitelig elektrisk energi til områder uten tilknytning til et strømnett. Eksempler på dette er militære basestasjoner, opprydding etter naturkatastrofer, og avsidesliggende øyer [37].



Figur 5.2 Windlift APG [37].

5.1.3 eWind Solutions

eWind Solutions er et amerikansk selskap med hovedsete i Oregon. Selskapet har utviklet sitt eget AWE system; *Tethered Energy Device* (TED). Systemet består av en Vinddrone, Line, og en trommel til linen. Trommelen er selve generatoren for dette mini-AWE kraftverket. Elektrisk energi produseres når dronen trekker ut linen, som vist i Figur 5.3. *eWind* sin brukergruppe er fokusert på mindre områder som gjerne er plassert avsides fra det nasjonale strømmettet. TED er automatisert, noe som gjør at en slipper å ha en tekniker som alltid er på området. Dronen følger *FAA* (Federal Aviation Administration) sine retningslinjer ved å holde seg under 499 fot, eller 152 meter [38].



Figur 5.3 eWind TED [38].

5.2 Europeiske selskaper

5.2.1 Brainwhere

Brainwhere er et sveitsisk selskap som har designet en form for svevende vindturbin, med en horisontal akse. Turbinen blir satt til en bestemt høyde, og vil ikke bevege seg i en sirkel / 8-talls formasjon, noe som sørger for at turbinen trenger et mindre aktivt område. Turbinen har flere bruksområder, der et av dem er samkjøring med eksisterende vindkraftverk. Årsaken er at vindparker skal kunne produsere en jevnere strøm med energi, og slipper like mye nedetid som turbiner har per dags dato. *Brainwhere* er per nå fortsatt i en designfase, uten en testet prototype [39].



Figur 5.4 Brainwhere [39].

5.2.2 KiteGen

KiteGen er et Italiensk selskap med base i Torino, Italia. Selskapet har designet et konsept de kaller *Carousel*, som er et design på storskala AWE-produksjon. Konseptet er lik en vertikal vindturbin, men kiter opererer slik turbinblader gjør på tradisjonelt vis. Dette designet består av en generator plassert på bakken, med en sirkel av kiter som sitter fastmontert til en ring som er montert perpendikulært til generatoren, som vist på figur 5.5. Den massive konstruksjonen vil ha en omtrentlig diameter på 1,6 km, med en generator med 1 GW effekt. *KiteGen Carousel* utnytter vinder på 800-1000 m. Dette konseptet skal i teorien produsere nok elektrisitet til 5000 husholdninger i året. Denne formen for kraftverk er og gunstig for off-shore vindenergi, spesielt med tanke på arealbruk og kraftigere vinder. Per dags dato er dette prosjektet kun i planleggingsfasen [34].



Figur 5.5 KiteGen Carousel [34].

5.2.3 KiteX

KiteX er et dansk AWE-selskap som ble grunnlagt i juni 2016. Selskapet forsker på å utnytte et 2-kite system til energiproduksjon. Per dags dato er det **KX4** prototypen som brukes, som er en fixed-wing kite. Kiten utnytter et vertikal lette & lande (VTOL) system med 6 propeller til å ta av og lande, samt en vinsj hvor linen til kiten er montert. **KX4** utnytter hver sin separate line, men de sammenkobles til en singel line som er koblet til basestasjonen. Genereringen blir gjort av de 6 turbinene som kiten utnytter som VTOL system, noe av samme sort som *Makani M600* og *Windlift APG*. I januar 2019 gjennomførte de den første testen med et twin-kite system [40].



Figur 5.6 KiteX KX4 [40].

5.2.4 Ampyx

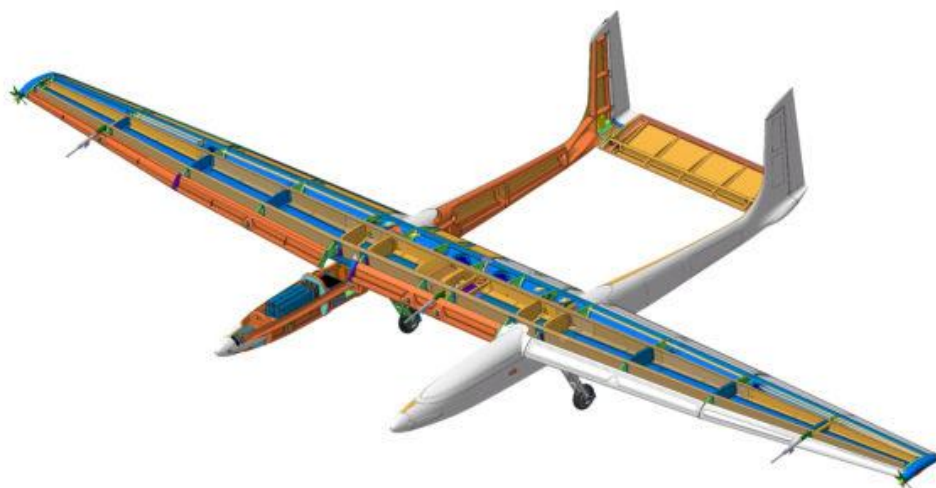
Ampyx ble grunnlagt som et start-up selskap i 2009 av kitesurferen Richard Ruiterkamp. Selskapet er fra Nederland, med kontorer i Haag, NL og Melbourne, AUS. Ruiterkamp og hans kolleger så et stort potensial ved å bruke kiter til å utnytte vindenergien fra 200_m og oppover. De så fort at det å bruke en glider i motsetning til en tradisjonell kite var mye mer effektivt til energiproduksjon. I 2010 beviser *Ampyx* at en kan produsere elektrisk energi ved hjelp av en glider koblet opp med en line, og i 2012 klarte de å produsere energi ved hjelp av et automatisert system. Selskapet er per dags dato det eneste selskapet i AWE-sektoren som har glideren sin registrert i *EASA* (European union Aviation Safety Administration) som en egen klasse farkost; «Remotly piloted aircraft». Deres siste prototype, **Demonstrator AP3**, sin designfase ble startet i 2015, og selve produksjonen startet 2017. I 2017 starter samarbeidet mellom *Ampyx* og *RWE* (Rheinisch-Westfälisches Elektrizitätswerk), og deres realisering av **AP3** og **AP4** (deres kommersielle modell) blir påbegynt. Per dags dato i 2020 så er flykroppen blitt montert, og de har startet installasjonen av data-systemer [32].

Demonstrator AP3.

AP3 kroppen er laget av komposittmaterialer, og består av en hovedvinge, 2 skrog, hale- / høyderor som vist i Figur 5.7. Glideren er koblet til bakkestasjonen/generator med en 750-meter lang line, og utnytter bevegelsene til en kryssvindkite for å produsere elektrisitet. Glideren blir skutt ut fra basestasjonen og ved hjelp av motorer på nesetippene flyr den opp til ønsket høyde. Når produksjonen avsluttes, trekkes glideren inn og lander på samme basestasjon. Turbinen har en effekt på 150 kW [41].

Spesifikasjoner:

- Materiale, Glider: Kompositt.
- Line: 750_m «in-air», 8mm diameter.
- Generator: 150_kW, lokalisert m/trommel & vinsj på basestasjon.
- Festepunkter: 1, festet mellom skrogene, under vingen.



Figur 5.7 Ampyx AP3, exploded view [41].

5.2.5 EnerKite

Tyske *EnerKite* har designet flere forskjellige former for kitebasert AWE-systemer. **EK200** turbinen består av en deltavinge kite, en 600 meter lang line, og en kontainer/basestasjon hvor generatoren befinner seg. Generatorkonseptet er mye likt konseptet *eWind* utnytter på sitt design. *EnerKite* utnytter et kryssvindsystem som vist på figur 4.4. **EK200** har en gitt effekt på 100 kW og et overflateareal på 30 m². *EnerKite* utvikler nå den større glideren; **EK1M**. Den vil ha en effekt på 500 kW og et overflateareal på 125 m². Dette systemet skal konstrueres for storskala energiproduksjon [33].



Figur 5.8 EnerKite EK200 [33].

5.2.6 Skysails

Skysails er et tysk selskap fra Hamburg som ser på storskala offshore energiproduksjon ved hjelp av kiter. Deres visjon er å kunne tilby jevn og stabil energiproduksjon, med et argument at deres AWE systemer bruker kun 10% av materialene i motsetning til en standardisert vindturbin, men kan produsere det dobbelte av en tilsvarende standard vindturbin. *Skysails* bruker mer tradisjonelle kiter enn de andre selskapene vi har sett på i denne oppgaven. Selskapet har også fokus på et selvdrevet system, slik at en slipper «on-site» teknikere som må igangsette/stenge produksjonen. Selskapet har fått 55 millioner euro i investeringer siden deres grunnleggelse. Glideren består av en oppblåsbar kite, line, og stasjon på bakken med vinsj og generator. Glideren har lik flybane som f.eks. *Enerkite*, ved at kiten trekker på linjen som igjen trekker på generatoren. Det kan produseres enheter opp til 500_KW effekt, og de kan monteres på flytende basestasjoner [42].



Figur 5.9 Skysails sin visjon om en flytende off-shore vindpark drevet av AWEs [42].

5.3 Norge

5.3.1 Kitemill

Kitemill er et norsk selskap som er stasjonert på Voss. Selskapet ble grunnlagt i 2008 på Voss av bl.a. tidligere verdensmester i hanggliding; Jon Gjerde. Selskapet bruker Lista flystasjon, Farsund, som deres test område. *Kitemill* prøver å utnytte vinder på høyder opp mot 400 m. De har gjort undersøkelser og testet diverse designere siden oppstarten i 2008, og de samarbeider med Luftfartstilsynet, slik at turbinen blir a jour med reglementet for flygende objekter. I 2015 fikk *Kitemill* en etterspørsel fra deres første kunde på 5 system til Lista i Sør-Norge. Videre utvikles systemet som skal automatisere produksjonen til turbinen. I 2017 greide *Kitemill* å produsere kontinuerlig i flere timer. *Kitemill* fikk tilsagn fra EU i 2018, og deres nye kontrollsystem blir implementert på deres siste prototype; **KM1** [29].

Kitemills siste prototype er en glider som består av hovedvinge, kropp, hale- /høyderor, 4 motorer, line, og basestasjon med vinsj/generator. Glideren har vingespenn på 7.5 meter og bruker 4 motorer, mye likt en standard quadcopter-drone, til å lette fra basestasjonen og komme seg til riktig høyde og til landings-sekvensen. **KM1** utnytter seg av en kryssvinds-flybane som den i Figur 4.5. Basestasjonen befinner seg på taket til en brakke som også utnyttes til datasenter for testingen av glideren. Generatoren har en effekt på 5 kW [29].

- Materiale, glider: karbonfiber.
- Line: Uvisst.
- Generator: 5 kW, bakkemontert.
- Festepunkter: 1, på flyskroget.



Figur 5.10 *Kitemill* KM1 [29].

6. utfordringer ved utbygging og etablering

Airborne Wind Energy er en relativ ny form for utnyttelse av vindkraft, som har et stort potensial. Det kan diskuteres hvorfor ikke flere selskaper begynner å utvikle konsepter til å utnytte det. Et svar på dette er når en teknologi er ny og i en utviklingsfase finnes det mange utfordringer.

Det er og en mulighet at drømmen om AWEs som fornybar energikilde ikke blir mulig. I løpet av utviklingen kan det oppstå nye uoverkommelige hindringer eller så kan det vises at å bygge effektive styringssystemer er for komplisert til å kunne gjennomføres.

6.1 Økonomiske utfordringer

Det er ingen overraskelse at den samlede kostnaden ved å produsere et AWE system er høy, siden det fortsatt er i en utviklingsfase. Dette steget har tradisjonell vindkraft og annen konvensjonell energiproduksjon kommet forbi. Kostnadene er dermed lavere for turbiner og tilhørende utstyr nå, enn de var i utviklingsfasen. Spørsmålet er om det i det lange løp er økonomisk gunstig å fokusere på AWEs kontra tradisjonell vindkraft. Den svake siden ved fornybare energikilder er at det krever spesifikke forhold for produksjon. Fornybar energiproduksjon kan fluktuere på grunn av forholdene. Som nevnt i kapittel 4.3.1 vil energiprisen synke dersom produksjon er høyere enn etterspørsel. AWEs har en mulighet til å tjene på dette, da de kan produsere i jevne luftstrømmer i tider når andre fornybare energikilder ikke er tilgjengelige ([3] s.13).

Et annet spørsmål er hvordan AWEs skal konkurrere mot tradisjonell vindkraft i en markedssammenheng. Det er problemer med å direkte introdusere et nytt produkt til et marked. Mange vet ikke hva AWE er og siden det er en ny teknologi kan investorer synes at det er for risikabelt å investere ([3] s. 667).

6.2 Sikkerhet og arealbruk

Som nevnt tidligere krever tradisjonell vindkraft et stort areal for kraftproduksjon. AWEs har liner på flere hundre meter, noe som medfører et stort sikkerhetsområde (se kap. 5).

Spørsmålet har da blitt om hvordan en kan drive energiproduksjon på en trygg måte. For at AWEs skal bli godkjent til bruk, er det flere faktorer innenfor sikkerhet og regulering som må tas hånd om. Per dags dato opererer flere selskaper på midlertidige godkjenninger fra nasjonale/internasjonale luftfartsmyndigheter. Selv om dagens avtaler er midlertidige forstås det at kommersielle AWEs vil følge nasjonale og internasjonale regelverk for flygende objekter ([3] s.703).

En løsning på dette har vært samarbeidet mellom *Ampyx* og *EASA* (se *Ampyx*, kap. 5.2.4). *EASA* har nevnt bruken av radiokontrollerte luftfartøy som er knyttet til bakken gjennom en line i sin sikkerhetsrapport anno 2014 [43].

Tradisjonell vindkraft møter stor motstand fra befolkning, eksempel på dette var når 100 demonstranter stormet en ferge i Ålesund som skulle transportere utstyr til en ny vindpark [44]. Et spørsmål er om AWEs vil skape samme reaksjoner. Med grunnlag i at AWEs er fortsatt i en tidlig utviklingsfase blir det vanskelig å si hvordan samfunnet vil reagere til dette sammenlignet med tradisjonell vindkraft. En utfordring AWEs har på lik linje med tradisjonell vindkraft er inntrykket en vil sette på det lokale økosystemet der en ønsker å installere turbinen(e). Fugleliv er en viktig del av dette punktet, da det er fugler som er mest utsatt ved vindkraftproduksjon. Ifølge en undersøkelse gjort av Roland Schmehl og hans kolleger i boken *Airborne Wind Energy – Advances in Technology Development and Research*, er det fare for at et AWE system som operer på rundt 500 meters høyde kan ha tilnærmet lik innvirkning på fuglefaunaen som en tradisjonell vindturbin ([3] s.679). Dersom AWE systemer skal bli en ny fornybar energi kilde, må grundigere undersøkelser gjennomføres for å finne ut hvor hardt fugleliv kan bli rammet av teknologien.

6.3 Automatisering og kontinuerlig drift

En av de største utfordringene ved drifting av et AWE-system er det å kunne kontrollere systemet uten en operatør/pilot. En tradisjonell vindturbin kan stoppes og startes ved hjelp av flere metoder (pitch på blader, vridning av naselle, brems), noe som styres av avanserte sensorer og vindmålere på hver turbin. Da tradisjonelle vindturbiner har vært brukt i mange år i en kommersiell skala, har automatisering av kontinuerlig drift blitt vel implementert. Flere av AWE-selskapene som er nevnt i denne oppgaven har utviklet systemer som har kunnet kontrollere kiten over mindre perioder, men det er ikke funnet en løsning som sørger for 100% selvstendig drift.

AWESCO ble grunnlagt med mål om å løse utfordringer ved automatisk drift. De ser at om AWEs skal være en direkte konkurrent på det fornybare energimarkedet må drift i realistiske og varierende vær-situasjoner være løst. Det forskes på automatisering av kontinuerlig drift for AWE systemer. For at AWE skal kunne konkurrere mot annen fornybar, spesielt tradisjonell vindkraft, må systemet kunne produsere energi kontinuerlig over lengre tidsintervaller. **AWESCO** jobber med diverse simulatorer for å løse dette problemet. De forsøker å lage en standard for fremtidens AWE systemer [45].

7. Dagens Situasjon for Airborne Wind Energy

7.1 AWE og HAWP mot fremtiden

«High altitude Wind Power» (HAWP) er AWE systemer som skal operere på store høyder. Ifølge undersøkelsen som ble gjennomført av *Archer & Caldeira* [46] regnes «high altitude», som er gunstig for energiproduksjon, fra 500 meter og opp til 12,000 meter. Grunnet kraftigere vinder på større høyder har flere aktører vist sin interesse for å utnytte dette. Som vist tidligere er vindstrømmene mer stabile og kraftigere høyere i luften enn for tradisjonell vindkraft. Om en skulle nådd slike høyder med tradisjonelle vindturbiner må en bruke voldsomme mengder ressurser og arealer.

Det antas å være en samlet effekt 7,5 TW i vindenergi å “høste” på disse høydene [14]. Grunnen til at en ikke utnytter denne antatte energikapasiteten er hovedsakelig mangel på teknologi og kunnskap. Vi forventer at dersom en skal utnytte HAWP må utbygging av AWE på konvensjonell basis kunne gjennomføres. Dette kan gi grunnkunnskap til videre utvikling av systemer innenfor HAWP.

Den generelle usikkerheten rundt AWE er nok en årsak til at antallet selskaper som jobber med utviklingen er lavt. Om en skal se en stor vekst innenfor utvikling og investeringer bør større selskaper vise sin interesse. En større interesse vil medføre en økt konkurranse, som igjen kan føre til raskere utvikling.

Globalt vil utbygging av AWEs være et godt alternativ til å supplere grønn energi til mindre strømnnett uten tilkobling til hovedstrømnettet. Dette er gjerne på mindre øyer, høyt til fjells eller på avsidesliggende lokasjoner. AWEs kan tilby mer mobil kraftproduksjon, slik selskaper som *Windlift* og *Enerkite* tilbyr.

7.2 Løsninger på utfordringer

7.2.1 Økonomiske utfordringer

De økonomiske kostnadene for et AWEs kan løses ved at de kan tilby en jevn energiproduksjon. Det er dog andre utfordringer som må løses før dette blir et faktum (se kap 6). Per dags dato er det nok konkurranse og støtte innenfor utviklingen av AWEs til å sørge for at det fortsatt kan være lønnsomt å fremme utvikling av slike systemer. Det overhengende spørsmålet er om hvor lang tid det vil ta før utfordringen om flykontroll har blitt løst. I februar 2020 trakk Googles *Alphabet* seg fra satsingen på deres AWE-prosjekt, *Makani*. Bakgrunnen for dette var at veien til kommersialisering er lengre enn de hadde håpt. Dette kan stille spørsmål til om AWE kommer til å klare seg i det lengre løp [47].

Som nevnt tidligere kreves det mindre materialer for et AWEs enn en tradisjonell vindturbin. Dette er gunstig for kostnadene om det skal kommersialiseres, noe som gjør at AWE blir konkurransedyktig. Hvordan AWEs skal implementeres i et allerede konkurransedrevet marked er avhengig av flere faktorer. Den mest essensielle er om produktet holder seg relevant og konkurransedyktig i løpet av tidsperioden bestemt av dens livsløpsanalyse. En løsning på dette er å introdusere produktet til et nisje-marked, mye likt på hvordan solar PV ble introdusert til energiproduksjon om bord satellitter før kommersialiseringen for vanlige husstander ([3] s.668). Selskaper som *Windlift* (kap. 5.1.2) ønsker å tilby sitt produkt til slike markeder, eksempelvis militærbaser.

7.2.3 Sikkerhet og arealbruk

EASA og *Ampyx* sitt samarbeid viser at sikkerheten rundt AWEs er en utfordring som undersøkes. Spørsmålet er hvordan en skal registrere et AWEs og hvilke retningslinjer det vil falle under. Da det utvikles flere forskjellige designere, både i bruk og størrelse, må et generelt regelverk til for å unngå uønskede ulykker. Om det skal utvikles et eget regelverk gjennom eksempelvis *EASA* (European Union Aviation Safety Administration), *FAA* (Federal Aviation Administration), eller *ICAO* (International Civil Aviation Organization), vil dette ta flere år. En slik prosess vil bremse utviklingen og testingen av AWEs, noe som sørger for at kommersialiseringen tar lengre tid enn ønsket. Som tidligere nevnt vil dette ha store konsekvenser for det økonomiske aspektet til AWEs (6.2). *Kitemill* har et samarbeidet med *Luftfartstilsynet* om en midlertidig godkjenning angående regelverket for slikt i Norge [31].

En av ulempene med AWE systemer er at de i likhet med tradisjonell vindkraft vil trenge store områder i luften uten flytrafikk. En løsning kan være å flytte produksjon til havs. Havområder har store arealer uten menneskelig aktivitet, i tillegg til mer stabile vinder. *KiteGen*, *Skysails* og *Makani* har sett på dette som et stort potensial for deres design, og det har blitt undersøkt om glideren til norske *Kitemill* kan bli brukt til off-shore applikasjoner [48]. Andre løsninger til denne utfordringen er *Windlift* sitt mobile **APG** system, som har som formål å tilby avsidesliggende områder tilgang til elektrisitet produsert av AWEs.

Hvordan kan AWE-selskaper unngå skade på fuglelivet? Ifølge undersøkelsen gjort i boken *Airborne Wind Energy – Advances in Technology Development and Research* kan fugledødeligheten for et AWE system ligge på 5-15 i løpet av et år. Dette kan stige eller synke med opptil 10 ganger, avhengig av fuglebestanden i området. En viktig faktor som undersøkes for AWEs er skaden linen kan forårsake, og om den kan medføre mindre skade enn en tradisjonell vindturbin ([3] s. 679). Dette er dog fortsatt i en undersøkelsesfase, og med tanke på at det ikke finnes noen storskala AWE-turbinpark kan man bare gjøre antagelser per dags dato. Før AWE systemer kan bygges vil det på lik linje med tradisjonell vindkraft må det undersøkes hvilken påvirkning det kan komme til å få på fugleliv i området.

7.2.4 Automatisering og kontinuerlig drift

Den første utfordringen som må løses er lette- og landefunksjoner i varierende vær; kiten må kunne klare å lette/lande uten hjelp av en operatør. Dagens kommersielle vindturbiner har slike systemer som sørger for automatisk produksjon-start/stop med tanke på “cut in/cut out” vindhastigheter. *AWESCO* ser at assistert letting ved hjelp av et separat multikopter (Myk kite) eller å implementere en lignende løsning på selve konstruksjonen (Glidere) er en løsning på dette. Ved å bruke vinsjen på basestasjonen til landingssekvensen er det mulighet for at landing kan gjøres automatisk. Dette er kun en teori per dags dato [49]. Automatisering er en av nøklene til kommersialisering av AWEs. Da det ikke er funnet et endelig svar på hvordan en skal gjennomføre automatisk kontinuerlig drift, er det fortsatt en stund før en vil se ferdige AWEs på markedet.

7.3 Sammendrag

Det finnes et enormt potensial for utnytting av luftbåren vindenergi. Dersom teknologien videreutvikles, vil AWE kunne bidra med effektiv fornybar energiproduksjon mot det grønne skiftet. Forskningen i feltet har vært sterkt voksende siste årene med over 200 publikasjoner gitt ut årlig, de siste tre årene. Den voksende interessen for AWE har gitt grunnlag for mange nye selskaper med ulike metoder å utnytte energien på. Selskaper som *Kitemill*, *Skysails* og *Apyx* utvikler modeller for å utnytte kryssvindenergi, noe som gir større utbytte enn en vanlig kite. Andre selskaper som *Makani* og *Windlift* utnytter turbiner på selve kiten til produksjon. Selskaper som *Brainwhere* forsker på andre metoder å utnytte vindenergien ved hjelp av Magnus-effekten.

Det finnes et samarbeid (*AWESCO*) mellom ulike institusjoner og selskaper som er til for å forske på kontrollsystemer og utvikling av AWE-teknologi. Data (ERA5) har blitt hentet ut for vindhastigheter i Europa for å kunne gi et overblikk over mulighetene for AWE produksjon. Dataene hjelper selskaper med utviklingen av deres kontrollsystemer. De fleste selskaper har systemer som produserer lav effekt da teknologien fortsatt er i en utviklingsfase. *Makani* har derimot greid å lage et system som kan produsere 600kW effekt.

“Wind drones have the potential to produce at one quarter of the costs, can provide steadier production, and have the ability to be deployed almost anywhere. This means that wind drones do not only compete with wind turbines in their niche, but have a realistic chance of becoming the cheapest source of electricity: cheaper than coal, gas, nuclear and hydro power” ([3] s.17)

Problemet alle selskaper sliter med er å utvikle et kontrollsystem som kan gi kiten kontinuerlig drift gjennom alle forhold. Dette innebærer letting, landing og produksjon syklus. Disse utfordringene gjør at de kan ta tid før en ser kommersiell drift av en vindpark bestående av AWE systemer.

Litteraturliste

- [1] United Nations (2015). United Nations sustainable development goals. Hentet fra: <https://www.un.org>
- [2] TED ideas worth spreading. (2019). *How can we turn the tide on climate?*.
Hentet fra: <https://www.youtube.com>
- [3] Schmehl, R. (2018). *Airborne Wind Energy: Advances in Technology Development and Research (1)*. Singapore: Springer Singapore.
Hentet fra: <https://www.oria.no>
- [4] Vestavindkraft AS (2012). *Tidsseriene Vindmålinger* (data). Vestavindkraft AS, Sandane, Norge
- [5] Twidell, J., & Weir, A. (2015). *Renewable energy resources (3rd ed.)*. London: Routledge.
- [6] Merns Euan (2016). *Energy matters: High altitude windpower reviewed*.
Hentet 26.05.2020 fra: <http://euanmearns.com>
- [7] Schmehl R. (2019). *Airborne Wind Energy: An introduction to an emerging technology*.
Hentet 12.05.2020 fra: <http://awesco.eu>
- [8] Google Scholar (2020). *Antall publikasjoner angående AWE*.
Hentet 28.05.2020 fra: <https://scholar.google.com/>
- [9] U.S. Energy Information Administration (2019). *International Energy Outlook 2019 with projections to 2050*.
Hentet fra: <https://www.eia.gov>
- [10] Ritchie, H & Roser, M (2020). *OurWorldInData: Energy*.
Hentet 29.04.2020 fra: <https://ourworldindata.org>
- [11] Vaclav Smil (2017). *Energy Transitions: Global and National Perspectives*. & *BP Statistical Review of World Energy*.
Hentet 15.05.2020 fra: <https://www.bp.com/>
- [12] Center for Sustainable Energy Studies (2014). *CenSES Energy demand projections towards 2050 - Reference path*.
Hentet 25.05.2020 fra: <https://www.ntnu.edu>
- [13] Moore Gordon (1965). *Cramming more components onto integrated circuits*.
Hentet 24.05.2020 fra: <https://newsroom.intel.com/>
- [14] Bechtel, P., Schelbergen, M., Schmehl, R., Zillmann, U., Watson, S. (2019) **Airborne Wind Energy Resource Analysis**.
Hentet 26.04.2020 fra: <https://arxiv.org>

- [15] European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (2020) *L137 model level definitions*.
Hentet 24.04.2020 fra: <https://www.ecmwf.int/>
- [16] Miles L. L. (1980). *Crosswind Kite Power: Lawrence Livermore National Laboratory*.
Hentet 23.04.2020 fra: <https://homes.esat.kuleuven.be>
- [17] Twang N. (2019) *Energibalansen i atmosfæren*. Nasjonal Digital Læringsarena.
Hentet 20.05.2020 fra: <https://ndla.no>
- [18] University of Michigan (2019) *Wind Energy Fact Sheet*.
Hentet 05.05.2020 fra: <http://css.umich.edu>
- [19] Hofstad, K. (2019). *Vindkraftverk*.
Hentet 19.04.2020 fra:
<https://snl.no/vindkraftverk>
- [20] WindEurope (2019). *Wind energy in Europe in 2018; Trends and statistics*.
Hentet fra: <https://windeurope.org/>
- [21] NVE (2019). *Vannkraft*.
Hentet 13.05.2020 fra: <https://www.nve.no/>
- [22] Trainor A.M, McDonald R.I, Fargione J. (2016) *Energy Sprawl Is the Largest Driver of Land Use Change in United States*.
Hentet fra: <https://journals.plos.org/>
- [23] NVE (2009). Vindkart for Norge. Vindkraft (NVE rapport KVT/ØB/2009/038).
Hentet 29.04.2020 fra: <https://www.nve.no/>
- [24] IPBES. (2019). *The global assessment report on BIODIVERSITY AND ECOSYSTEM SERVICES*.
Hentet 28.04.2020 fra: <https://ipbes.net/>
- [25] La Raskiftet Leve (2020). *La Raskiftet leve!*.
Hentet 06.05.2020 fra: <http://www.laraskiftetleve.com>
- [26] Robert. D (2019). *These huge new wind turbines are a marvel. They're also the future*.
Hentet fra: <https://www.vox.com/>
- [27] Ernest journal (2015) *George Pococks Charvolant*.
Hentet 19.04.2020 fra: <http://www.ernestjournal.co.uk>

- [28] EnergyKiteSystems (2014) *Aloys Van Gries*.
Hentet 19.04.2020 fra: <http://www.energykitesystems.net>
- [29] BBC News (2001) *Professor Plans flying powerstation*.
Hentet 19.04.2020 fra: <http://news.bbc.co.uk>
- [30] Medium (2020) *A long and windy road*.
Hentet 19.04.2020 fra: <https://medium.com>
- [31] Kitemill (2020) *Kitemill, Historie*.
Hentet 20.05.2020 fra: <https://kitemill.no>
- [32] Ampyx (2020) *Ampyx, History*.
Hentet 20.05.2020 fra: <https://www.ampyxpower.com>
- [33] Awesco (2020) *Awesco, summary*.
Hentet 25.05.2020 fra: <http://awesco.eu>
- [34] Kitegen (2009) *KiteGen Carousel*.
Hentet 06.05.2020 fra: <http://www.kitegen.com>
- [35] Enerkite (2020) *Enerkite EK200*.
Hentet 12.05.2020 fra: <https://www.enerkite.de>
- [36] Makani (2020) *Makani Kites, Airborne Wind Energy*.
Hentet 05.05.2020 fra: <https://makanipower.com/>
- [37] Windlift (2020) *Windlift, Airborne Power Generators*.
Hentet 06.05.2020 fra: <https://windlift.com/>
- [38] eWind Solutions (2020) *eWind Solutions, How wind energy works*.
Hentet 12.05.2020 fra: <http://www.ewindsolutions.com/>
- [39] Brainwhere (2020) *Brainwhere*.
Hentet 12.05.2020 fra: <https://www.brainwhere.com/>

- [40] KiteX, (2020) *KiteX, Next Generation Wind Energy*.
Hentet 12.05.2020 fra: <https://kitex.tech/prototypes/>
- [41] Ampyx (2020) *Ampyx, Our technology*.
Hentet 20.05.2020 fra: <https://www.ampyxpower.com/our-technology-explained/>
- [42] Skysails (2020) *Skysails Power*.
Hentet 12.05.2020 fra: <https://skysails-power.com/technology.html>
- [43] EASA (2014) *Transposition of Amendment 43 to Annex 2 to the Chicago Convention on remotely piloted aircraft systems (RPAS) into common rules of the air*.
Hentet 26.05.2020 fra: <https://www.easa.europa.eu>
- [44] VG (2020) *Aksjonister stormet ferge*.
Hentet 27.05.2020 fra: <https://www.vg.no/nyheter/innenriks/i/2GrwEx/aksjonister-stormet-ferge>
- [45] Awesco (2018) *Modelling and Periodic Control of Dynamically Uncertain Aeorofolds*.
Hentet 26.05.2020 fra: <http://awesco.eu>
- [46] Archer, C., & Caldeira, K. (2009). *Global Assessment of High-Altitude Wind Power Energy*.
Hentet 26.04.2020 fra: <https://www.mdpi.com>
- [47] Forbes (2020) *Alphabet Shuttles Its Energy Kite Company, Makani*.
Hentet 26.05.2020 fra: <https://www.forbes.com>
- [48] Universitetet I Stavanger (2019) *Scalability and Compatibility Assessment of Airborne Wind Technology in Maritime Transport, a case of electricity generation on a vessel*.
Hentet 12.05.2020 fra: <https://uis.brage.unit.no>
- [49] Awesco (2018) *Robust Automatic Operation of Airborne Wind Energy Systems*.
Hentet 26.05.2020 fra: <http://awesco.eu>
- [50] Bevanger K, May R. og Stokke B. (2016) *Landbasert vindkraft: Utfordringer for fugl, flaggermus og rein*. NINA.
Hentet 13.06.2020 fra: <https://brage.nina.no>

Vedlegg

Mircosoft excel: Utregninger for bachelorppgave AWE.xlsx