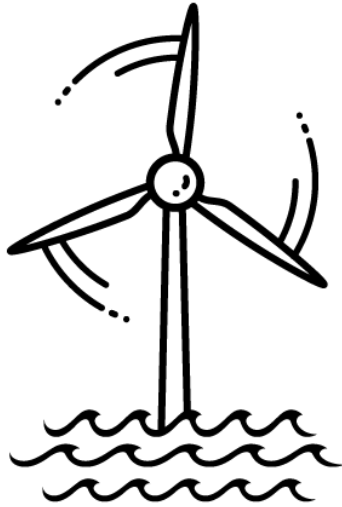


# Havvind - enkelt forklart



Bergen Offshore Wind Centre

Universitetet i Bergen

Forfatter:

Thomas Hansen

Revidert 15-05-2020

# Innhold

<b>1</b>	<b>Innledning</b>	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>Vindturbiner og aerodynamikk</b>	<b>3</b>
2.1	Vindenergi generelt, hva er prinsippet? . . . . .	3
2.2	Vingeprofiler, løft og drag . . . . .	4
2.3	Bruk av vingeprofiler på vindturbiner . . . . .	5
2.4	Forkanterosjon på rotorblader . . . . .	6
2.5	Størrelse på turbiner . . . . .	6
2.6	Vindturbinparker . . . . .	7
2.7	Bunnfast og flytende havvind . . . . .	8
2.8	Kapasitetsfaktor . . . . .	10
2.9	Hvor mange turbiner behøves for å dekke Norges energiforbruk? . . . . .	10
<b>3</b>	<b>Meteorologi og turbiners plassering til havs</b>	<b>11</b>
<b>4</b>	<b>Regelverk og juridisk hensyn for havvind</b>	<b>11</b>
	<b>Referanser</b>	<b>12</b>

# 1 Innledning

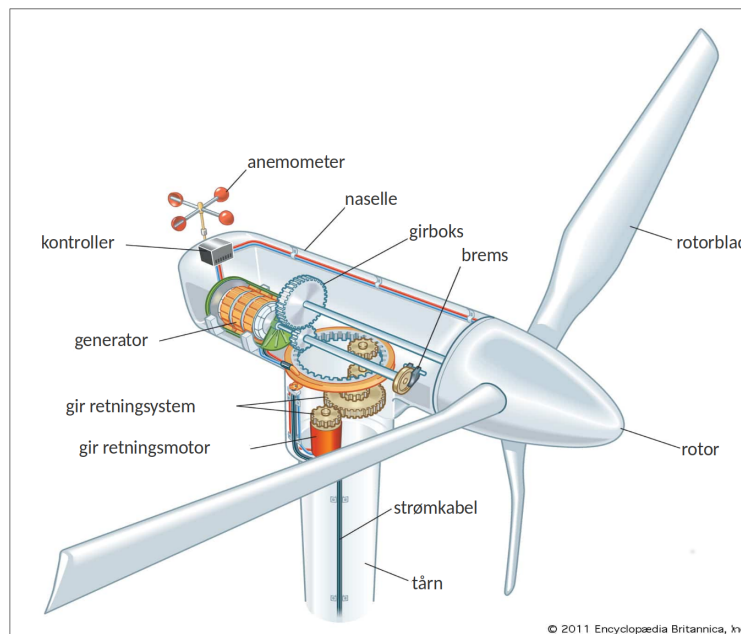
Formålet med dette dokumentet er å belyse og forklare sammenhengene som havvind baserer seg på med enkle ord, slik at det blir forståelig for alle. Dokumentet sammenfatter problemstillingene det forskes på internasjonalt og ved Bergen Offshore Wind Centre (BOW), og har som ambisjon å tydeliggjøre hvordan de forskjellige forskningutfordringene påvirker potensialet til havvind i et større bilde. Dokumentet er ment å være til hjelp for politikere, studenter og andre som ønsker å forstå hvordan havvind fungerer på et fundamentalt nivå. Dokumentet er dynamisk og vil oppdateres fortløpende.

## 2 Vindturbiner og aerodynamikk

I dette avsnittet forklares de fundamentale aerodynamiske sammenhengene som gir føringer for vindturbinene sin utforming, plassering og energiproduksjons-potensiale.

### 2.1 Vindenergi generelt, hva er prinsippet?

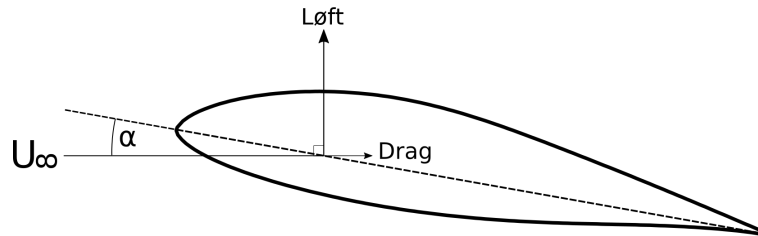
Vindenergi er fornybar energiproduksjon hvor vindens bevegelsesenergi omdannes til elektrisitet. Den mest vanlige måten å produsere vindenergi på i dag er ved bruk av vindturbiner. På moderne vindturbiner genereres det løft på rotorbladene, tilsvarende som på en flyvinge, og det er løftkraften som gjør at turbinene roterer. En generator inne i vindturbinene omdanner så rotasjonbevegelsen til elektrisk effekt. Ved å utnytte løftkraften får moderne vindturbiner utnyttet over halvparten av den tilgjengelige energien i vinden, og har derfor en virkningsgrad rundt 50 %. Dette er en svært god virkningsgrad i forhold til andre typer fornybar energi. Den høye virkningsgraden er mulig siden vindturbinrotasjonen drives av den aerodynamiske løftkraften, samtidig som motstandskraften til rotorbladene holdes lav. Dette er i kontrast til eldre vindmøller, hvor rotasjonen hovedsaklig genereres ved at luften presser mot de roterende flatene. Man kan derfor si at rotorbladene på moderne vindturbiner har mer til felles med vingene på fly enn de har med sine eldre roterende slektinger. I Figur 1 er hovedkomponentene som benyttes i en moderne vindturbin illustrert.



Figur 1: Skjematisk beskrivelse av vindturbin.

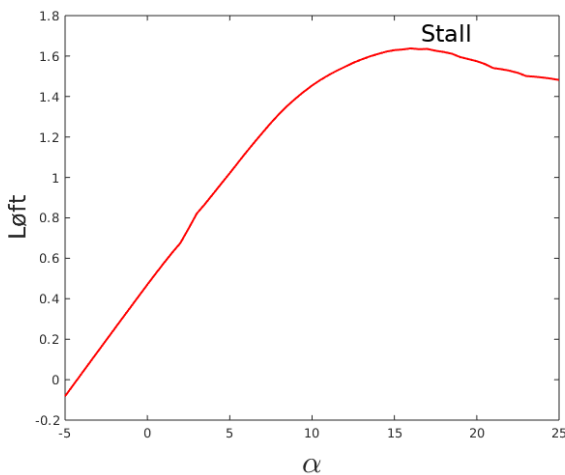
## 2.2 Vingeprofiler, løft og drag

Vingeprofiler er formen vinger og rotorblader har ved forskjellige tverrsnitt. Et typisk vingeprofil som benyttes mot tippen av rotorblader er illustrert i Figur 2. Som figuren viser er løft definert normalt på innkommende vind,  $U_\infty$ , og drag definert parallelt med innkommende vind. Angrepsvinkelen,  $\alpha$ , bestemmer hvor mye løft vingeprofilet produserer, og for økende

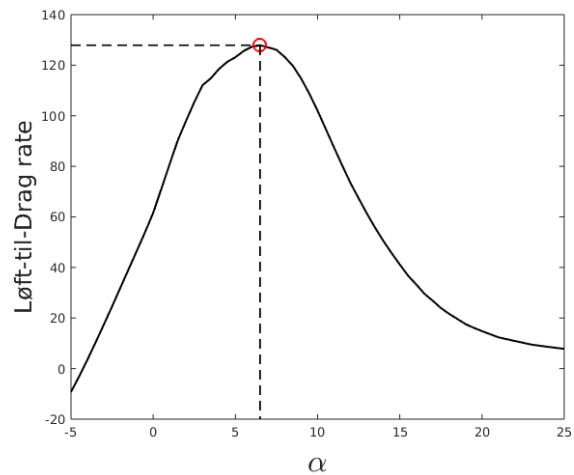


Figur 2: Vingeprofil med løft og drag.

angrepsvinkel øker også løftet, som vist på koeffisient-form i Figur 3. Hvis angrepsvinkelen til vingeprofilet blir for stor reduseres løftet igjen, og vi sier da at vingeprofilet staller. Også draget vingeprofilet produserer øker når angrepsvinkelen blir større, og ved å kombinere løft og drag kurvene kan vi regne ut angrepsvinkelen hvor vingeprofilets løft-til-drag raten er maksimert. Denne angrepsvinkelen beskriver den optimale operasjonsvinkelen til vingeprofilet, se Figur 4.



Figur 3: Løft kurve.



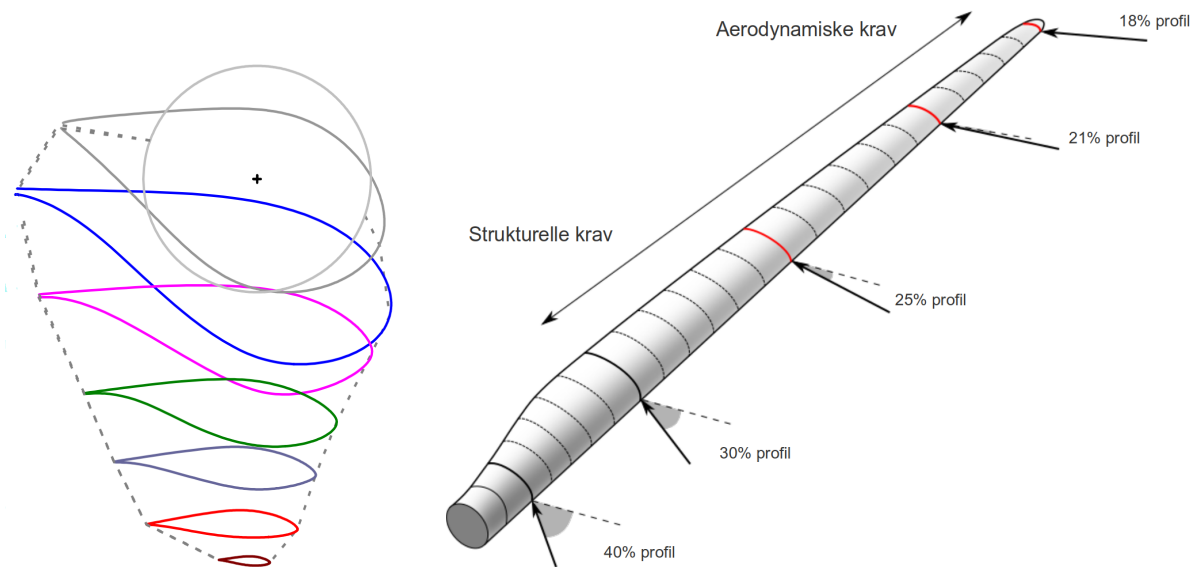
Figur 4: Løft-til-drag kurve.

På et rotorblad er innkommende vind resultanten av hastigheten til vinden og hastigheten til vindturbinens rotasjon. For at vingeprofilet skal operere ved sin optimale operasjonsvinkel er derfor forholdstallet mellom hastigheten til vinden og vindturbinens rotasjonshastighet viktig. Dette forholdstallet kalles på engelsk for Tip-Speed-Ratio (TSR) og definerer hvor fort

rotorbladene roterer i forhold til vindhastigheten. Det betyr at hvis hastigheten til vinden er 10 m/s, og vindturbinen er konstruert for TSR 10, er hastigheten på tippen av vindturbinens rotorblader 100 m/s. For moderne vindturbiner er TSR typisk mellom 7-10.

## 2.3 Bruk av vingeprofil på vindturbiner

For å skape den løftkraften som trengs for at bladene på en vindturbin skal rotere, benyttes det en rekke vingeprofil med forskjellige og spesialiserte egenskaper utover rotorbladene. Inne ved roten av bladene benyttes det tykke vingeprofil siden de strukturelle kravene fra høye bøyemoment dominerer i denne regionen. Tykke vingeprofil har ikke like gode aerodynamiske egenskaper som tynne vingeprofil, men de gir rotorbladene økt stivhet og reduserer kostnaden siden mindre materialer behøves for å produsere tykke blader med samme stivhet. For å oppnå høy virkningsgrad benyttes det vingeprofil med en gradvis reduksjon i tykkelse ut mot tippen av rotorbladene, hvor de aerodynamiske egenskapene dominerer. Det meste av rotasjonenergien til vindturbinene blir derfor skapt i regionen mot tippen på rotorbladene. I Figur 5 vises et rotorblad til en moderne vindturbin med typiske vingeprofiltykkelser. Figuren viser også at vingeprofilene inne ved roten har en større vinkel enn profilene



Figur 5: Ulike vingeprofiltykkelser og variasjon i angrepsvinkel langs et rotoblad [Kilde: TU Delft].

ute mot tippen av bladene. Ved å vri rotorbladene på denne måten kompenseres endringen i rotasjonshastighet på rotorbladet fra roten mot tippen slik at alle vingeprofilene kan operere ved sin ideelle angrepsvinkel mot luftstrømmen. For de forskjellige vingeprofilene oppstår denne ideelle operasjonsvinkelen når forholdet mellom løftkraften og dragkraften er maksimert.

## 2.4 Forkanterosjon på rotorblader

Under operasjon vil rotorbladenes forkanter være utsatt for luftbåren forurensning som regn, salt, sand og insekter. Denne luftbårne forurensningen kan føre til at vindturbinene produserer mindre effekt siden rotorbladenes aerodynamikk påvirkes når forkantene eroderer. I Figur 6 vises et eksempel på et rotorblad som har vært utsatt for regn i lang tid. Aerodynamisk vil



Figur 6: Rotoblad forkant etter lang tids operasjon i regn [Kilde: Armour EDGE].

rotorblader som får økt ruhet på forkanten endre karakteristikk siden vingeprofilene produserer mindre løftkraft og får økt dragkraft. Dette fører til at løft-til-drag raten blir redusert. Det rapporteres at vindturbiner som er utsatt for forkanterosjon kan få en reduksjon i effektproduksjonen opp mot 10-15%, avhenging av hvilken typer vingeprofiler som er benyttet og hvor mye rotorbladenes forkanter har erodert [1]. Design av nye vingeprofiler som beholder sine aerodynamiske egenskaper bedre når de blir utsatt for forkanterosjon, samt utvikling av mer motstandsdyktige materialer til bruk i forkanten av rotorbladene er derfor viktige forskningsområder for å redusere kostnader innen vindkraft.

## 2.5 Størrelse på turbiner

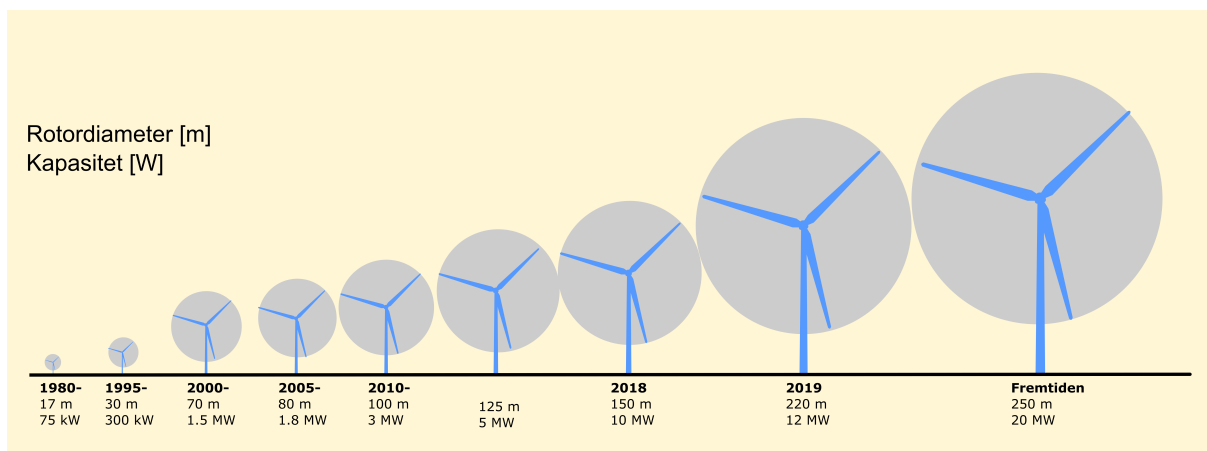
Formelen som beskriver hvor mye effekt en vindturbin kan produsere er gitt ved:

$$P = 0.5\rho A_s U_\infty^3 C_p . \quad (1)$$

Denne formelen viser at effekten  $P$  er avhengig av vindhastighet opphøyd i tredje potens  $U_\infty^3$ , turbinens virkningsgrad  $C_p$ , luftens tetthet  $\rho$  og turbinens sveipeareal  $A_s$ . Siden luftens tetthet

er tilnærmet konstant sier formelen oss at kun høyere vindhastighet, økt sveipeareal (større rotorblader) og økt virkningsgrad gir høyere effekt. Vindhastigheten er lokasjons-avhengig og kan ikke påvirkes, men, siden vindhastighet er opphøyet i tredje potens vil en dobling av vindhastigheten føre til en åttedobling i produsert effekt. Denne sammenhengen gjør havvind attraktiv, siden det blåser sterkere og mer stabile vinder til havs. Virkningsgraden  $C_p$  på moderne vindturbiner lar seg vanskelig forbedre, og det er derfor hovedsaklig ved å øke rotorbladenes lengde at vi kan påvirke kraftproduksjonen mest, dvs. ved å øke sveipearealet  $A_s$ . Størrelsen på vindturbine vil derfor fortsette å øke, og utviklingen vil være styrt av hva som er teknologiske mulig og økonomisk fordelaktig.

Verdens til nå største vindturbine ble ferdigstilt i november 2019 av GE Renewable Energy, og heter Haliade-X. Denne turbinen skal operere til havs og har en rotordiameter på 220 meter og en elektrisk effekt på 12 MW. I Figur 7 er den historiske utviklingen til vindturbinene sin rotordiameter og kapasitet illustrert. Som figuren viser har rotordiameteren på vindturbine økt med nesten 1200% siden 1980-tallet da den moderne vindindustrien startet.



Figur 7: Historisk utvikling i turbiners rotorstørrelse og kapasitet.

## 2.6 Vindturbinparker

For å øke inntjeningen fra vindenergi plasseres ofte vindturbiner tett sammen i områder med gode vindforhold som vist i Figur 8. Ved at turbinene står tett, blir kostnader forbundet med arealbruk, infrastruktur, installasjon og vedlikehold redusert. En viktig del av infrastrukturen er elektrisk kabel for å transportere strømmen fra turbinene. Siden kostanden for elektrisk kabel er direkte knyttet til lengden på kablene er avstanden mellom turbinene i en vindparken



og vindparkens avstand til land viktig. Det er også utfordringer forbundet med å sette vindturbinene tett sammen i parker. Når turbinene tar ut energien i vinden vil vindhastigheten bak turbinene reduseres, og det dannes vaker som vist i Figur 9. Her er bildet tatt en dag de atmosfæriske forholdene bidro til å visualisere vakene. Det betyr at turbinene som opererer i vaker vil oppleve lavere vindhastigheter og dermed produsere mindre effekt. De roterende turbinbladene generer også turbulens som fraktes med vaken, og turbinene som opererer i vaker vil derfor oppleve økt belastning. Dette leder i sin tur til økt behov for inspeksjoner, reparasjoner og redusert levetid for turbinene. Optimering av vindturbiners plassering i vindparker for å maksimere energiproduksjonen, samtidig som vake-effektene reduseres har derfor vært et viktig fokus for forskningen på vindkraft i nyere tid. Typisk avstand mellom turbinene i en vindpark er 5-9 rotordiameter i vindens dominerende retning, og 3-5 rotordiameter mellom turbinene normalt på vindens dominerende retning [2].



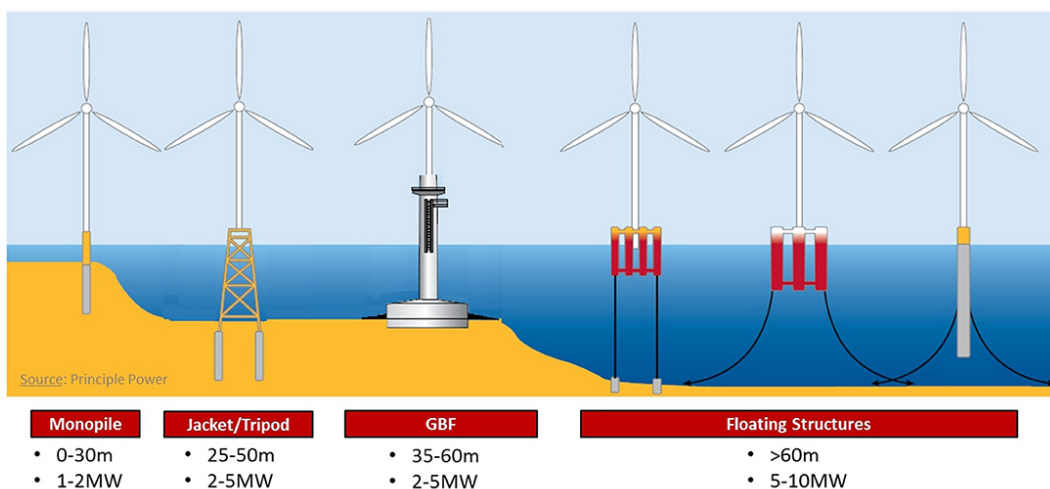
Figur 8: Havvindpark [Kilde: EnBW].



Figur 9: Vaker bak turbiner [Kilde: Vattenfall, CC BY-ND].

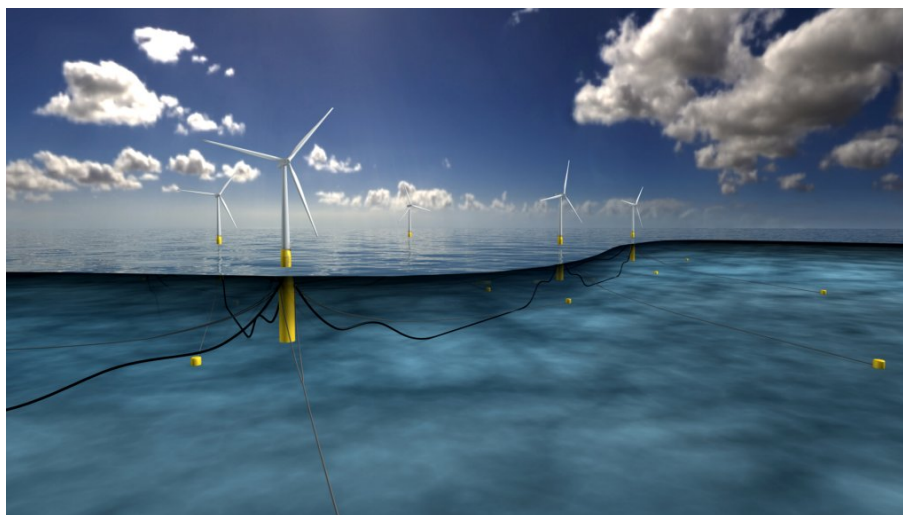
## 2.7 Bunnfast og flytende havvind

De fleste havvindparker er i dag bunnfaste installasjoner hvor turbinene er montert på havbunnen. Ved å bygge ut vindparker på lokasjoner hvor havdypet er grunt (<60 meter), har den relativt unge havbaserte vindindustrien kunnet benytte seg av innovasjonene utviklet for den landbaserte vindindustrien. Dette har gjort det mulig for havvind å utvikle seg svært raskt. Ved utgangen av 2018 var det 4543 nett-tilknyttede havvindturbiner i Europa med en samlet installert effekt på 18 500 MW, og elleve europeiske land har i dag havvindturbiner. I havområdene utenfor mange land i verden er dessverre havdypet for stort for å kunne benytte bunnfaste installasjoner (gjelder for cirka 80% av verdens havdyp), og flytende løsninger er nødvendige, som illustrert i Figur 10.



Figur 10: Fundamentteknologier som benyttes for økende havvdyp.

Innen utviklingen av flytende vindkraft har Norge vært en ledende innovatør, og Equinor sjøsatte i 2009 verdens første flytende fullskala vindturbin med navnet Hywind demo. Equinor har i nyere tid utviklet Hywind-konseptet videre, og bygget i 2017 den første kommersielle havvindparken Hywind Skottland, 30 km utenfor kysten av Skottland. Figur 11 illustrerer denne flytende vindurbinparken, som består av 5 flytende 6 MW turbiner, og har en kapasitet på 30 MW. Den første havvindparken på norsk sokkel blir Equinors Hywind Tampen, som



Figur 11: Illustrasjon av Hywind Skottland [Kilde: Equinor].

skal settes i drift i 2022. Denne vindparken vil bestå av 11 flytende 8 MW vindturbiner med en samlet kapasitet på 88 MW. Hywind Tampen vil bli benyttet til både å elektrifisere norske oljeplattformen (reduere CO<sub>2</sub> utslipp), og til å akselerere utviklingen av et norsk hjemmemarked innen havvind [3].

## 2.8 Kapasitetsfaktor

Mengden strøm en turbin (eller vindpark) kan produsere i løpet av et år kan beregnes ut fra turbinens kapasitetsfaktor. Kapasitetsfaktor beskriver energien som faktisk produseres i løpet av et år i forhold til det som ville bli produsert dersom turbinen gikk for full effekt i alle av årets 8760 timer. Moderne landbaserte vindparker har typisk en kapasitetsfaktor rundt 35%, mens nye moderne havvindparker har en kapasitetsfaktor opp mot 55%, [4]. En vindturbin som har en kapasitetsfaktor på 55% vil med andre ord produsere energi med full kapasitet i 55% av årets 8760 timer = 4818 timer. En turbin med 12 MW kapasitet vil da kunne produsere  $12 \text{ MW} \times 4818 \text{ timer} = 57816 \text{ MWh}$  per år.

## 2.9 Hvor mange turbiner behøves for å dekke Norges energiforbruk?

En vanlig norsk husstand forbruker omtrent 20 000 kWh per år, eller 20 MWh. En 12 MW vindturbin, med en kapasitetsfaktor på 55% vil derfor kunne produsere nok energi til å dekke omtrent 3000 norske husstander hvert år. En vindpark med 8 stykk 12 MW turbiner vil med samme kapasitetsfaktor produsere nok fornybar energi årlig til å dekke behovet til 24 000 norske husstander. I 2018 var Norges totale energiforbruk på 135 TWh. Antall turbiner som trengs for å dekke dette energibehovet er gitt i Tabell 1. Som tabellen indikerer er det stort økonomisk potensiale i å øke turbinenes kapasitet (størrelse), og plassere turbinene til havs, siden det da ikke er behov for å installere og vedlikeholde like mange vindturbiner.

Effekt per turbin MW	Antall landbaserte turbiner (35%)	Antall havvind- turbiner (55%)
3	14700	9300
12	3700	2300
25	1800	1100

Tabell 1: Antall vindturbiner som trengs for å dekke Norges energiforbruk (avrundet til nærmeste hundre).

### **3 Meteorologi og turbiners plassering til havs**

Kapittel er under utvikling.

### **4 Regelverk og juridisk hensyn for havvind**

Kapittel er under utvikling.

## Referanser

- [1] R. S. Ehrmann and E. B. White, et al. Realistic leading-edge roughness effects on airfoil performance. *In 31st AIAA Applied Aerodynamic Conference, San Diego, CA USA*, pages 177–208, 24-27 June 2013.
- [2] Danish wind industry association. *Park effect*. Accessed May 2020. <http://xn--drmstrre-64ad.dk/wp-content/wind/miller/windpower%20web/en/tour/wres/park.htm>.
- [3] Equinor. *The future of offshore wind is afloat*. Accessed May 2020. <https://www.equinor.com/en/what-we-do/floating-wind.html>.
- [4] Wind Europe. *Wind energy today*. Accessed May 2020. <https://windeurope.org/about-wind/wind-energy-today>.