



# Lufttemperaturens påvirkning på vindturbiners strømproduksjon

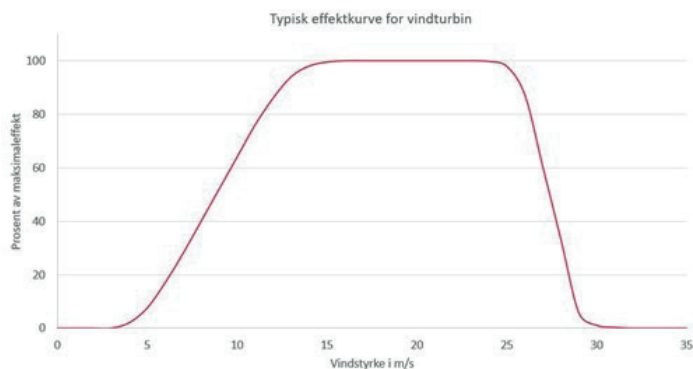
Forfatter: Camilla Alice Mikkelsen, Rjukan videregående skole

*Vindturbiner er i dag en viktig fornybar energikilde. Denne studien undersøker temperaturens påvirkning på strømproduksjonen til vindturbiner, med fokus på forskjeller mellom kaldt og varmt vær. Å forstå hvordan temperatur påvirker strømproduksjonen til vindturbiner er viktig for å optimalisere energiproduksjonen og forleng levetiden til vindturbiner. Studien bruker produksjonsdata fra Tonstad Vindpark for kaldt og varmt vær. Analysen av forskjellene på kaldt og varmt vær ble gjort på tre måter, først grafisk sammenligning av gjennomsnittlig produksjonseffekt, deretter grafisk sammenligning av maksimal produksjonseffekt, og til slutt t-tester av korte intervaller av utvalgte vindhastigheter. Resultatene indikerer at det er forskjeller i strømproduksjonen under kalde og varme temperaturforhold for like vindhastigheter.*

## Introduksjon

Vindturbiner fungerer ved å utnytte energi fra luft i bevegelse, og omdanner kinetisk energi til elektrisk energi. Den kinetiske energien til en gjenstand kan beregnes ved formelen  $E_k = \frac{1}{2}mv^2$ , m er massen til gjenstanden og v er hastigheten (UngEnergi, 2021). For luft vil massen være vekten av luften som er i bevegelse, og v vil være vindhastigheten. Lufttemperatur påvirker lufttettheten, ettersom kald luft har høyere tetthet enn varm luft. For eksempel, vil en varmluftballong stige oppover av varm luft, fordi den varme luften inni ballongen er lettere enn den omkringliggende luften på grunn av sin lavere tetthet. Den høyere lufttettheten for kald luft vil da ha en høyere kinetisk energi når den treffer vindturbinen, og dermed en mulig økning i produksjonen av elektrisk energi.

En effektkurve (power curve) representerer den forventede elektriske effekten generert av en vindturbin som funksjon av vindhastighet. Effekten som er brukt i effektkurvene henger direkte sammen med strømproduksjonen til en vindturbin. Et eksempel på en slik effektkurve er vist i Figur 1 (NVE, 2023). En effektkurve er viktig for å optimalisere energiproduksjonen og tilpasse turbinens respons under ulike værforhold (Cole, 2022). Derfor er det viktig å ha en god forståelse av temperaturens påvirkning på effektkurven. Dette muliggjør optimalisert salg av energi og gir bedre økonomisk avkastning, hvor det kan være en «flaskehals» for energiselskapene i dag (Frandsen, et al., 2000, s. 81). Ved å tilpasse effektkurver til kaldere temperaturer, kan man også redusere belastningen på vindturbinene, noe som kan forleng levetiden deres. Tilpasning i produksjon basert på lufttemperaturen vil derfor gi både høyere strømproduksjon og økt levetid for vindturbinen.



Figur 1: Eksempel på effektkurve for en vindturbin (NVE, 2023)

Et sentralt begrep for vindparker er nedregulering (*curtailment*). Nedregulering er bevisste nedjusteringer av vindturbiner, motivert av ulike faktorer. Blant annet kan netteier (f.eks Statnett) diktere nedregulering for å balansere strømmnettets belastning, ellers så kan negativ strømpris føre til at man stenger ned eller reduserer produksjon i vindparken. Videre kan ting som skader eller hendelser som begrenser turbinens kapasitet være grunn til å nedregulere.

Artikkelen skal undersøke hvilken påvirkning temperatur har på effektkurven til en vindturbin. Temperaturendringer påvirker lufttetthet og dermed kinetisk energi i vinden, det er derfor grunn til å tro at det vil ha påvirkning på effektkurven til en vindturbin også. Ved sammenligning av strømproduksjonen under kalde temperaturforhold med produksjonen under varme temperaturforhold vil det gi et bilde av hvorvidt temperaturen har innvirkning på strømproduksjon. Denne informasjonen vil være viktig for vindenergi-produksjonen gjennom de ulike årstidene. Siden temperaturen og vinden er varierende så er det vanskelig å lage et teoretisk eksempel som er likt faktiske forhold i en vindpark. Derfor er det valgt å fokusere på de praktiske forskjellene mellom det kalde og varme været.

## Metode

Tonstad Vindpark, som ligger i Sirdal og Flekkefjord kommune, er en vindpark med 51 vindturbiner. Datagrunnlaget er basert på data herifra, som ble gjort tilgjengelig gjennom Tore Totland Skjerdal i Norsk Hydro. Disse dataene er gitt i Excel-format, og inneholder informasjon om vindturbinens strømproduksjon, lufttemperaturen, vindhastigheten og vindretningen. Datasettene er fra tre ulike vindturbiner, alle med data fra to kalde måneder (januar og februar) og tre varme måneder (juni, juli og august). Datasettene er vist i Figur 2.

For videre analyse og bearbeiding av data er Excel og Python brukt. Excel er brukt for enklere tallanalyse og visualisering. For mer komplekse analyser er Python tatt i bruk, og har gitt mer avanserte beregninger og modellering. ChatGPT er blitt brukt for å gi innspill til konkret kode, for å enklere kunne utføre dataanalysen (OpenAI, 2023). Eksempelkode er gitt i Vedlegg 1.

For å skape et klart bilde av vindturbinenes strømproduksjon var det nødvendig med finjustering og datavasking. Datavasken ble gjennomført i Python, og disse kriteriene ble integrert i koden som lagde effektkurver:

- Vindhastigheter som er under 1 m/s ble ekskludert. For så lave vindhastigheter skal det ikke være produksjon.
- Produksjonsverdier under 1 kW ble ekskludert for å kun bruke data som er relevant for produksjon.
- For kalde temperaturforhold ble datapunkter med temperaturer over  $-1$  °C ekskludert, mens for varme temperaturforhold ble verdier under  $10$  °C ekskludert. Etter å ha prøvd forskjellige temperaturgrensere så ble disse valgt for å ha nok datapunkter i analysen, men allikevel ha et skille mellom kalde og varme temperaturforhold.

Under dataanalyseprosessen ble det anvendt ulike metoder for å undersøke strømproduksjonen under ulike værforhold. Det finnes standarder for hvordan dette kan gjøres (IEC, 2022), men i denne artikkelen er det valgt å bruke litt enklere metoder. Først ble det lagd grafer i Excel som representerte alle datapunktene fra dataene til Norsk Hydro. Det ble lagd to figurer for hver vindturbin, en for varme temperaturer og en for kalde temperaturer. Allerede her kunne man se visse forskjeller mellom figurene for kalde og varme temperaturer. Etter en gjennomgang av grafene fra alle tre vindturbinene som vist i Figur 2, ble det besluttet å fokusere spesifikt på vindturbinen *WT28*. Dette valget var drevet av oppgavens tidsramme, og at *WT28* hadde mer stabile vindverdier.

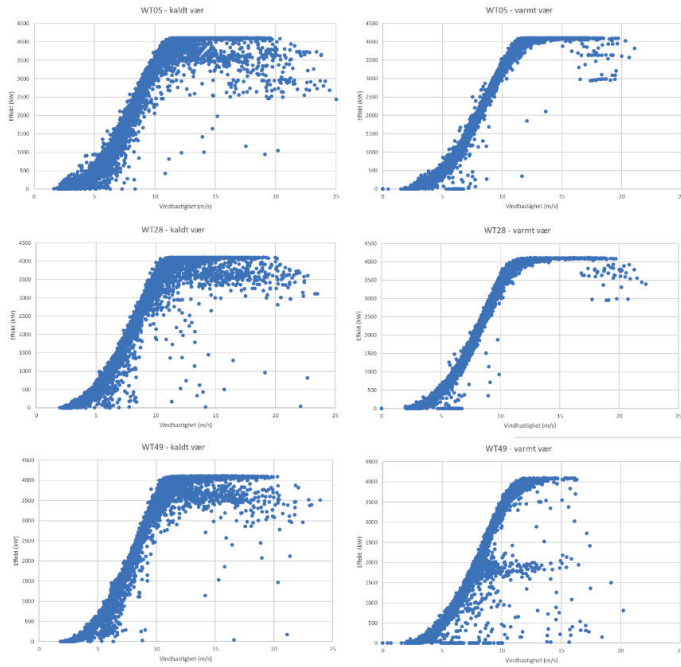
For å tydeliggjøre sammenhengene mellom variablene ble dataene undersøkt i Python. I Python ble dataene først vasket og deretter puttet i intervaller, kalt bins, på 1m/s, og gjennomsnittet for datapunktene innenfor hver bin ble funnet. Det ga en gjennomsnittslinje gjennom datapunktene. Denne visualiseringen antydte også mulige forskjeller.

For å forbedre synligheten i forskjell mellom varmt og kaldt, ble en ny graf laget med de høyeste verdiene innen hver vindhastighet. At grafen kun har med de høyeste punktene innen hver vindhastighet, vil også kunne vise forskjell under optimale produksjonsforhold (Albers, 2009, ss. avsnitt 3-2). Noen punkter på linjen ble beholdt for å lettere se forskjeller.

Deretter ble rådata fra *WT28* tatt over i Excel, hvor det ble sett på noen utvalgte intervall. Datavasken for hvert intervall skjedde manuelt, hvor negative produksjonsverdier og temperaturer utenfor grensa ble ekskludert. Etterpå ble det laget boksdiagram som vist i Figur 5. I disse diagrammene ligger det noen punkter utenfor som Excel anser som avvikende verdier. Avvikende punkter ble dermed fjernet, antall punkter som ble fjernet står i Tabell 1.

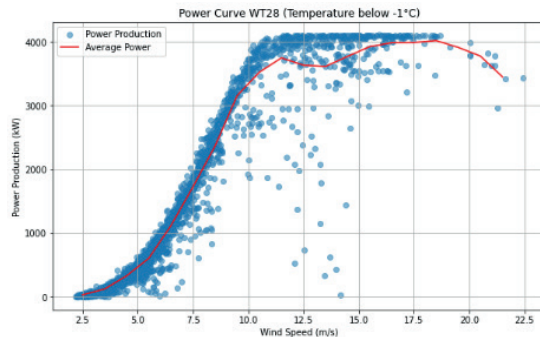
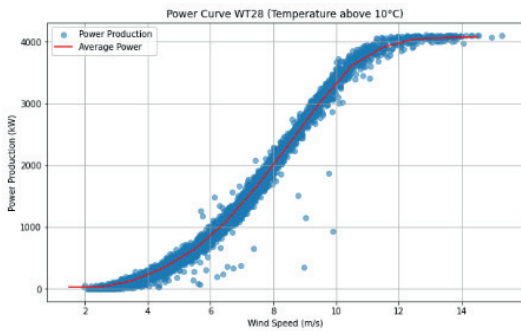
Dataene ble brukt i t-test for å evaluere forskjeller i strømproduksjonen under varme og kalde forhold. Å utføre en t-test på hele effektkurven går ikke på grunn av forutsetningen om tilfeldig normalfordelte uavhengige variabler i t-testen. Effektkurven har en avhengighet mellom variablene langs x-aksen (vindhastighet) og y-aksen (produksjonseffekt). Det er antatt at å velge ut korte vindhastighetsintervaller og utføre t-test på produksjonsverdiene innen disse intervallene vil være mulig, fordi verdiene kan være normalfordelt her. Derfor ble det valgt ut fire forskjellige intervaller og utført t-test på disse, med et signifikansnivå på 5%. Nullhypotesen som ble brukt var at gjennomsnittsverdien for produksjonsverdiene er lik for varmt og kaldt vær.

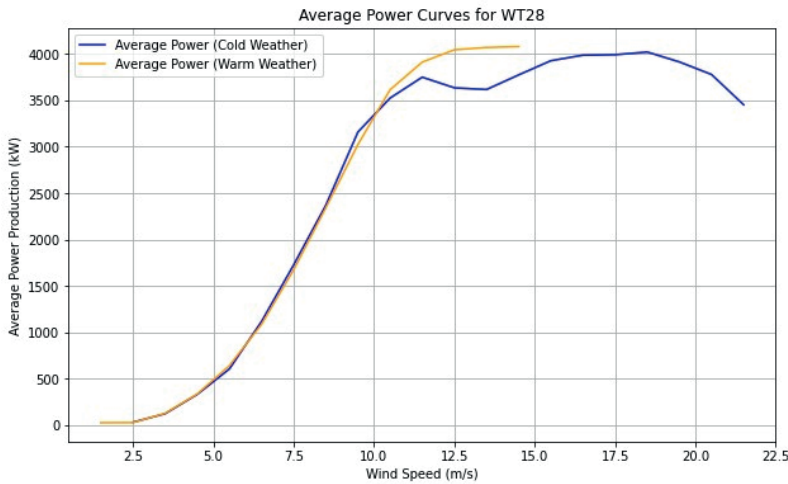
Resultat



Figur 2: Samlet oversikt over for alle vindturbinene for kaldt og varmt vær

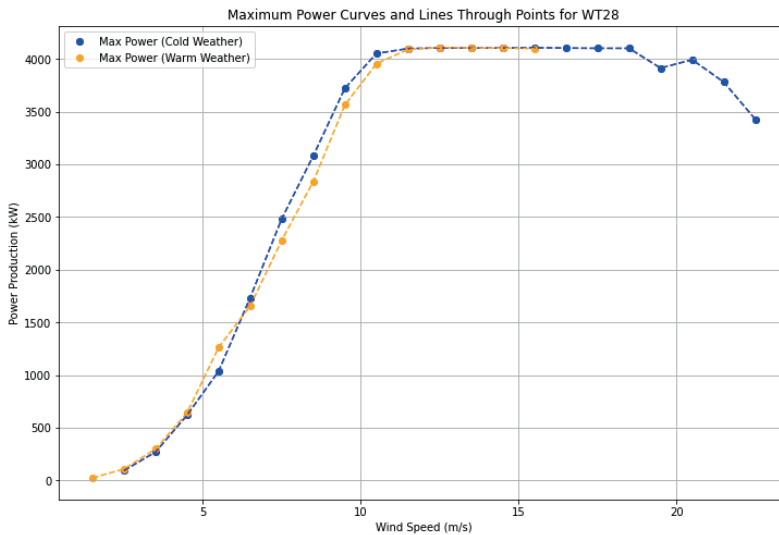
Ved å se på dataene fra vindturbinen WT49 i Figur 2, så finner man en spesiell lagdeling. Den tydelige flatningen i grafen ved 2000 kW, selv under gunstige vindforhold, indikerer at det mest sannsynlig er nedregulering (2023, Korrespondanse med Hydro).





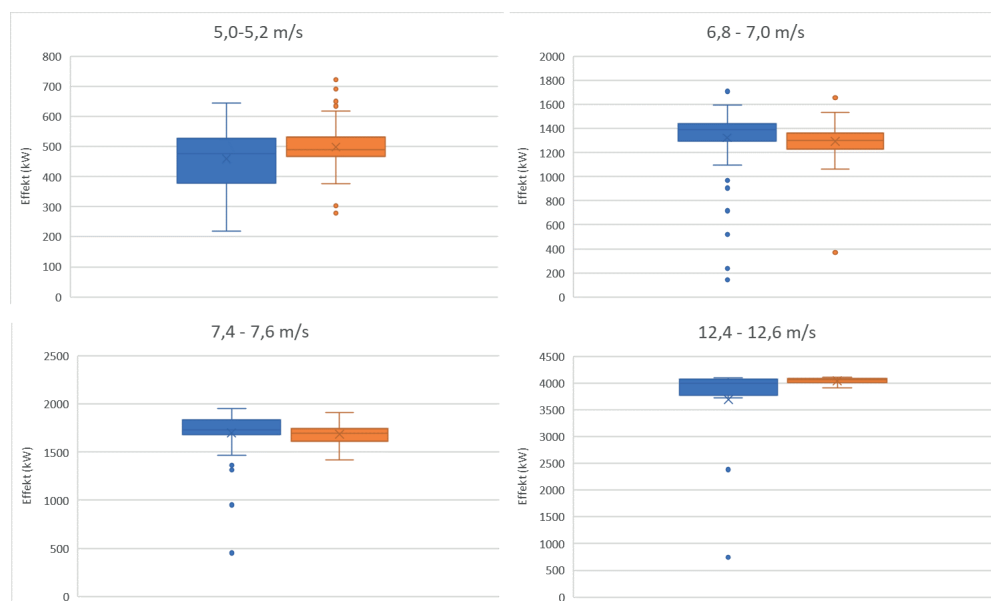
Figur 3: Sammenligninger av effektkurver basert på gjennomsnittlige produksjonsverdier for kaldt og varmt vær

Figur 3 viser de gjennomsnittlige effektkurvene fra analysen gjort i Python. De to øvre grafene viser hver kurve i sin tilhørende sky av datapunkter, mens i den store figuren vises de to kurvene oppå hverandre, slik at de kan sammenlignes. Man kan observere en bøy i kurven rundt 12,5 m/s for kaldt vær, og at figuren slutter for ca 15 m/s for varmt vær.



Figur 4: Sammenligninger av effektkurver basert på maksimale produksjonsverdier for kaldt og varmt vær

Figur 4 viser effektkurver basert på maksimale produksjonsverdier, hvor kurvene for kaldt og varmt vær er lagt oppå hverandre. Her kan man se en litt uvanlig knekk i kurven for varmt vær, for vindhastigheter rundt 5 m/s.



Figur 5: Boksplott for intervallene som er brukt i t-test som også viser punktene som er ekskludert

Tabell 1: Tosidig t-test for utvalgte intervaller for vindhastighet

Intervall	Intervall for vindhastighet (m/s)	Antall datapunkter ekskludert for kaldt/ varmt vær	Gjennomsnitts -effekt for kaldt vær (kW)	Gjennomsnitts-effekt for varmt vær (kW)	Tosidig P-verdi for t-test
1	5,0-5,2	0/7	470	497	$1,2 \cdot 10^{-3}$
2	6,8-7,0	8/2	1383	1295	$2,6 \cdot 10^{-3}$
3	7,4-7,6	4/1	1749	1684	$2,2 \cdot 10^{-3}$
4	12,4-12,6	2/0	3978	4043	0,037

Tabell 1 viser resultatene for t-testen for fire utvalgte intervaller for vindhastigheter. Intervallene ble valgt litt spredt.

## Diskusjon

I effektkurven basert på de gjennomsnittlige produksjonsverdiene i Figur 3 er det tilsynelatende minimal forskjell mellom strømproduksjon under kaldt og varmt vær, med unntak av vindhastighetene over 10 m/s, der det er en merkbar forskjell. Dette kan komme av at flere produksjonsverdier for det kalde været ligger mer spredt og lavt i forhold til vindhastigheten. Disse punktene kan komme av ising på turbinbladene. Det er vanskelig å trekke noen konklusjon ut ifra denne kurven. Derimot viser effektkurven basert på maksimale produksjonsverdier Figur 4 tydeligere forskjeller som antyder at det kan være en forskjell mellom kaldt og varmt vær.

Resultatene for t-testen i Tabell 1 viser at det kan være forskjeller i strømproduksjonen mellom kaldt og varmt vær. Intervall 1, intervall 2 og intervall 3 har P-verdier under signifikansnivået på 5%, noe som gjør at nullhypotesen kan forkastes. I intervall 4 er P-verdien høyere enn i de andre intervallene, men også her

er den lav nok til at nullhypotesen forkastes. Med andre ord er det signifikante forskjeller i strømproduksjonen mellom kaldt og varmt vær innenfor disse intervallene. Samtidig er det viktig å påpeke at for intervall 1 og intervall 4 så har varmt vær høyere gjennomsnittseffekt enn det kaldt vær har. Dette er motsatt av det man forventet utfra teorien.

I intervall 4, der vindhastigheten når toppproduksjon, er det forventet at verdiene for strømproduksjonen under kaldt og varmt vær vil være relativt like, noe som t-testen også viser. Det er fordi vindturbinen opererer ved maksimal effekt. For de midterste verdiene derimot så kan man se tydeligere forskjeller, noe som kan bety at temperatur har en innvirkning på strømproduksjonen. I de lavere vindhastighetsintervallene er det mer usikkerhet rundt eventuelle forskjeller i strømproduksjonen mellom kaldt og varmt vær. En annen ting som kan påvirke effekten er ising på turbinbladene under kalde værforhold, ising gir mer luftmotstand, og kan være en av grunnene til at varmt vær har høyere gjennomsnittseffekt enn kaldt vær i intervall 1 og intervall 4. Det betyr at Figur 3 kan vise en forskjell i strømproduksjon, men at forskjellen er mindre for de høyeste og de laveste vindhastighetene. Dette kan skyldes mengden data som er analysert – ettersom vindparken er designet med en gjennomsnittlig vindhastighet på 8,5m/s (Tonstad Vindpark, 2024), er det derfor forventet at det vil være størst datagrunnlag rundt denne vindhastigheten.

For en mer omfattende studie er det noen ting man kunne gjort annerledes. Man kunne blant annet ha hatt data fra flere år. En annen ting er at man kunne ha brukt større temperaturforskjeller mellom kaldt og varmt vær. Å ha med data fra flere vindturbiner i analysen ville også gitt et mer helhetlig bilde av strømproduksjonens temperaturavhengighet. Usikkerhet på grunn av ising på vindturbine er en annen faktor som kan påvirke vindturbine, og en metode for å ekskludere disse dataene kunne vært nyttig. I tillegg ville fjerning av datapunkter relatert til nedregulering vært nyttig. Det kunne også vært interessant å bruke minimum eller median produksjonsverdier for sammenligning av effektkurver for kaldt og varmt vær.

Noe som hadde gjort en vesentlig forskjell, hadde vært å bruke en annen metode for å sammenligne effektkurvene. Man kunne ha brukt en metode for å sammenligne hele effektkurver direkte, i stedet for å sammenligne noen intervaller slik som i t-testen. Det ble ikke funnet en metode som passet i denne artikkelen.

## Konklusjon

Resultatene indikerer at det er forskjeller i strømproduksjonen ved lik vindhastighet under kalde og varme temperaturforhold. Det er viktig å påpeke at forskjellene i strømproduksjon mellom kalde og varme temperaturforhold er relativt små, hvorvidt det spiller en økonomisk forskjell krever ytterligere analyser.

## Anerkjennelse

Jeg vil rette en stor takk til Norsk Hydro ASA og Tore Totland Skjerdal for all hjelp med problemstilling og datamateriale for forskningen. Tore Totland Skjerdal har også svart på spørsmål som har dukket opp underveis og hjulpet med bakgrunnsteori om vindturbiner. Det har vært lærerik å få forske på en problemstilling fra virkeligheten som har en betydning for samfunnet.

## Referanser

- Albers, A. (2009). *Turbulence normalisation of wind turbine power curve measurements*. Varel, Germany: WindGuard Consulting GmbH. Retrieved from [https://www.windguard.de/veroeffentlichungen.html?file=files/cto\\_layout/img/unternehmen/veroeffentlichungen/2010/Power%20Curve%20Normalisation.pdf](https://www.windguard.de/veroeffentlichungen.html?file=files/cto_layout/img/unternehmen/veroeffentlichungen/2010/Power%20Curve%20Normalisation.pdf)
- Cole, S. (2022, 08 24). *Wind turbine power curve*. Retrieved 01 05, 2024, from The Roundup: <https://theroundup.org/wind-turbine-power-curve/>
- Frandsen, S., Antoniou, I., Hansen, J., Kristensen, L., Madsen, H., Chaviaropoulos, B., . . . Dunbabin, P. (2000). Redefinition power curve for more accurate performance assessment of wind farms. *Wind Energy*. doi:[https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/1099-1824\(200004/06\)3:2%3C81::AID-WE31%3E3.0.CO;2-4](https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/1099-1824(200004/06)3:2%3C81::AID-WE31%3E3.0.CO;2-4)

- IEC. (2022). *Wind energy generation systems - Part 12-1: Power performance measurements of electricity producing wind turbines (IEC 61400-12-1:2022)*. IEC.
- NVE. (2023, 01 26). NVE. Retrieved 04 30, 2024, from Kraftproduksjon fra vindturbiner: <https://www.nve.no/energi/energisystem/vindkraft/kraftproduksjon-fra-vindturbiner/>
- OpenAI. (2023). ChatGPT. (*November 2023-januar 2024 gratis versjon*). Retrieved from <https://chat.openai.com/>
- Skjerdal, T. T. (2022). *A Study of Wind-Wave Interactions using Offshore High-Frequency Wind and Wave Measurements*. [Masteroppgave]. The University of Bergen. Retrieved from <https://bora.uib.no/bora-xmlui/handle/11250/3000780>
- Tonstad Vindpark. (2024, 04 30). Retrieved 04 30, 2024, from Om vindturbinene: <https://tonstadvindpark.no/om-vindturbinene/>
- UngEnergi. (2021, 07 21). Retrieved 04 30, 2024, from Fysikk: energi og effekt i vinden: <https://ungenergi.no/energikilder/vindkraft/fysikk-energi-og-effekt-i-vinden/>