

«Det blåser stiv kuling ved Stad,  
men hvor kommer vinden fra?»

Tverrfaglige idéprosesser som grunnlag for utvikling av  
en vindkraftinstallasjon ved vitensenteret ViteMeir

Av Kristin Myhra Sæterdal



© [Kristin Myhra Sæterdal]

[Fakultet for ingeniør og naturvitenskap]

[Institutt for natur- og miljøvitenskap]

Høgskulen på Vestlandet

[2023]

HVL-notat frå Høgskulen på Vestlandet nr. 3- 2023

**ISSN** 2703-710X

**ISBN** 978-82-8461-019-1



Utgjeingar i serien vert publiserte under Creative Commons 4.0. og kan fritt distribuerast, remixast osv. så sant opphavspersonane vert krediterte etter opphavsrettslege reglar.  
<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

## Sammendrag

Gjennom prosjektet *Stiv Kuling ved Stad – En bærekraftig omstilling av Energisystemet* har vi utviklet en interaktiv vindkraftinstallasjon til den nye energiutstillingen ved Vitensenteret i Sogn og Fjordane AS, ViteMeir. En studentgruppe fra studieprogrammet *Bachelor i Fornybar Energi* ved Høgskulen på Vestlandet, HVL, har bidratt til utviklingsprosjektet gjennom en tverrfaglig idéprosess hvor de har arbeidet med å finne gode løsninger for hvordan vi kan formidle forskningsbasert kunnskap om energiomstilling.

I dette notatet presenteres det faglige grunnlaget bak vindkraftinstallasjonen sammen med en oppsummering av idéprosessene som ligger til grunn for utviklingen av installasjonen. Dette inkluderer en oppsummering av undervisningssamarbeidet mellom ViteMeir og HVL. Notatet publiseres for å gi faglig støtte til formidlere og undervisere som skal utvikle læringsopplegg knyttet til vindkraftinstallasjonen, samt for at arbeidet skal kunne gjenbrukes/videreutvikles av andre aktører som ønsker det.

EMNEORD: vindkraft, vitensenter, undervisning, formidling

## Forord

Formålet med samarbeidet mellom ViteMeir og HVL (Høgskulen på Vestlandet, 2022) er å fremme utviklingen av undervisning og formidling innenfor barnehage- og grunnskolelærer- og de teknisk-naturvitenskapelige utdanningene. Min inngang til dette målet har vært å bidra til utvikling av det faglige innholdet ved ViteMeir slik at det blir relevant for bruk i utdanning og forskning ved HVL. Samtidig har min dobbeltrolle som faglig ansvarlig for energiutstillingen ved ViteMeir og studieprogramansvarlig for *Bachelor i Fornybar Energi* ved HVL gitt meg et godt utgangspunkt for å utvikle et arbeidslivsrettet undervisningssamarbeid mellom HVL og ViteMeir.

Prosjektet *Stiv Kuling ved Stad- En bærekraftig utvikling av energisystemet* er finansiert av Norges forskningsråd (Prosjektnummer 338126). HVL har bidratt med ytterligere finansiering. Arbeidet er gjort i samarbeid med prosjektdeltakere Veronica Danielsen og Marit Haugan Hove ved ViteMeir.

Tusen takk til Håvard Nordvik (Sogn og Fjordane Energi) som har bidratt med faglig støtte til utviklingen av vindkraftinstallasjonen.



# Innhold

Sammendrag .....	3
Forord .....	4
Innhold .....	5
Innledning .....	6
Faglig bakgrunn .....	7
1. Vind som energiresurs .....	7
2. Produksjon av elektrisk energi .....	8
3. Konsekvenser av vindkraftutbygging .....	10
Utvikling av en vindkraftinstallasjon .....	12
Arbeidslivsrettet undervisning i samarbeid med ViteMeir .....	12
Utvikling av en prototype .....	14
Installasjonen .....	16
Litteratur .....	19

## Innledning

Verdenssamfunnets bruk av fossile energikilder er drivere for klimaendringer (Deb et al., 2019), og en av de viktigste utfordringene verdenssamfunnet nå står overfor er å finne løsninger for hvordan vi kan sikre tilstrekkelig tilgang til energi samtidig som vi reduserer klimagassutslippene, som formulert i FNs bærekraftsmål 7 - Ren energi til alle.

I Norge har vi stor tilgang på fornybare energiresurser som vann og vind. Det norske kraftsystemet har den høyeste fornybarandelen i Europa, men vindkraftproduksjon utgjorde bare rundt 11 % av den norske produksjonskapasiteten i 2022 (Olje- og energidepartementet, 2022). Verdenssamfunnet står i klima- og naturkriser som gjør at vi må øke produksjonen av fornybar energi, og utbygging av mer vindkraft på land er en av de mest aktuelle energikildene for å øke den fornybare energiproduksjon i Norge (Miljødirektoratet, 2023).

For å forstå hvordan vi kan utnytte bevegelsesenergien i vind best mulig, må vi ha kunnskap om hvor og når vi kan forvente vindforhold som egner seg for kraftproduksjon. Samtidig må vi ha kunnskap om hvilke konsekvenser utbygging av kraftsystemet har for ulike natur- og samfunnsinteresser. Gjennom å bruke utstillingsområdet ved Vitensenteret i Sogn og Fjordane AS, ViteMeir, som formidlingsarena vil vi bidra til å formidle kunnskap om samspillet mellom naturressurser, teknologi og de sosiale aspektene som påvirker omstillingen til et bærekraftig energisystem.

I de påfølgende avsnittene introduseres den faglige bakgrunnen som ligger til grunn for utviklingen av vindkraftinstallasjonen. Deretter følger en oppsummering av veien fra idéprosess til ferdig vitensenterinstallasjon.

# Faglig bakgrunn

Vindkraftinstallasjonen er utformet med utgangspunkt i tre læringsmål

## 1. Vind som energiresurs

*Læringsmål:* Vind er luft i bevegelse. Luften beveger seg for å utjevne trykkforskjellene som oppstår fordi jordoverflaten blir ujevnt oppvarmet av solinnstråling.

## 2. Energooverganger og produksjon av elektrisk energi

*Læringsmål:* Bevegelsesenergien i vind er en naturressurs som kan omformes til elektrisk energi i et vindkraftverk.

## 3. Konsekvenser av vindkraftutbygging på land

*Læringsmål:* Vindkraftutbygging på land har konsekvenser for natur og samfunn.

## 1. Vind som energiresurs

Vind er luft i bevegelse. Når solen skinner på jorda, blir jordoverflaten ujevnt oppvarmet fordi solen skinner med ulik intensitet på ulike steder. Aller varmest er det ved Ekvator og så blir det gradvis kaldere nord- og sørover på jordkloden. Når solen varmer opp jordoverflaten, varmes også luften opp. Varm luft er lettere enn kald luft. Når den varme luften ved Ekvator stiger oppover i atmosfæren, fylles den "ledige plassen" ved jordoverflaten med kaldere luft for å unngå at det blir tomrom. Samtidig vil den varme luften som stiger oppover strømme videre nord- og sørover på jordkloden til den blir så kald at den synker ned igjen til jordoverflaten. Disse prosessene fører til en sirkulær bevegelse av luft som vi kjenner som det globale vindsystemet.

De lokale vindsystemene oppstår fordi land og vann har ulik evne til å holde på varme. Når solen skinner på dagtid, varmes luften over bakken opp og stiger oppover i atmosfæren. Samtidig fylles den "ledige plassen" ved bakken opp med kaldere luft fra sjøen. Når solen har gått ned på kveldstid, er vannet varmere enn

land fordi vann holder godt på varmen. Da er det luften over sjøen som er lettest og som stiger oppover i atmosfæren. Samtidig fylles den “ledige plassen” med kaldere luftstrømmer fra land. Vi kjenner disse sirkulære vindfenomenene som pålandsvind og fralandsvind.

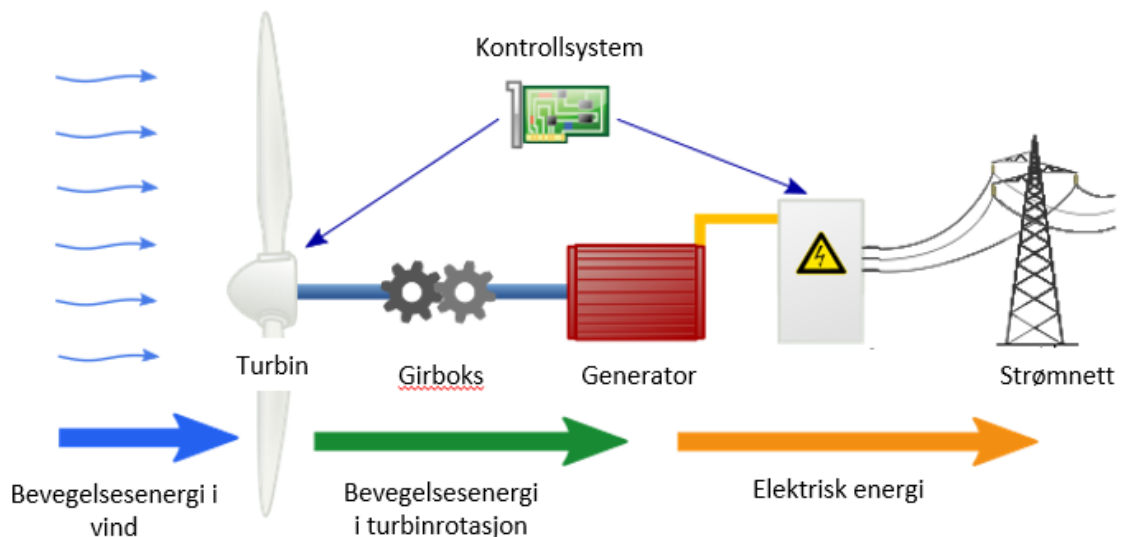
De globale og lokale vindfenomenene oppstår fordi naturen forsøker å utjevne temperatur- og trykkforskjellene som oppstår når solen skinner på jordkloden. Vindstrømmene som beveger seg langs bakken vil også påvirkes av terrenget på jordoverflaten. Vindforholdene høyt over bakken der vindstyrken er høyere og turbulensen mindre er derfor både sterkere og mer stabile enn vindforholdene langs bakken.

## **2. Produksjon av elektrisk energi**

Bevegelsesenergien i vind kan omformes til elektrisk energi i et vindkraftverk (Figur 1), og det er avgjørende at vindkraftverk bygges på steder med gode og stabile vindforhold.

Selve kraftverket består av et tårn og et maskinhus med en turbin, en vekselstrømgenerator og et styringssystem som mottar informasjon om vindstyrke og vindretning fra meteorologiske sensorer. Maskinhuset er plassert på toppen av tårnet og kan vris slik at vindstrømmene alltid treffer vinkelrett på turbinbladene. Lufttrykket fra vinden løfter turbinbladene opp og inn i en langsom rotasjonsbevegelse. Noen vindturbiner har også en girkasse slik at rotasjonshastigheten kan økes før bevegelsesenergien omformes til elektrisk energi i generatoren. Den elektriske energien blir transformert opp til høyspenning før den transporteres ut på strømmettet.





Figur 1 Skjematisk illustrasjon av maskinhuset som er plassert på toppen tårnet i et vindkraftverk. Bevegelsesenergien i vinden løfter turbinbladene inn i en rotasjonsbevegelse som omformes til elektrisk energi i generatoren. Et kontrollsystem sørger for at vindkraftverket utnytter vindressursen på best mulig måte. Skissen er oversatt til norsk ([https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Wind\\_turbine\\_schematic.svg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Wind_turbine_schematic.svg))

Vi kan bruke matematikk som verktøy til å sette sammen ligninger som kan justeres og omformuleres for å forstå hvordan naturlover påvirker kraftproduksjon. I utviklingen av vindkraftinstallasjonen ved ViteMeir, har vi tatt utgangspunkt i en matematisk sammenheng mellom vindstyrken  $v$  [ $m/s$ ] og effekten  $P$  [ $W$ ] som produseres i et vindkraftverk

$$P = \frac{1}{2} \rho A v^3 C_p$$

der  $\rho$  er lufttetthet [ $kg/m^3$ ],  $A$  er sveipearealet til rotoren [ $m^2$ ] og  $v$  er vindstyrken [ $m/s$ ]. Sveipearealet,  $A = \pi r^2$ , er definert som det området som turbinbladene sveiper over i rotasjonsbevegelsen, og det er lengden på turbinbladet som bestemmer radiusen på sveipearealet.  $C_p$  er en effektkoeffisient som angir hvor mye av bevegelsesenergien i vinden som omformes til elektrisk energi. I den matematiske sammenhengen er det gitt at effekten,  $P$ , er avhengig av vindstyrke i tredjepotens og bladlengde i andrepotens. Det betyr at hvis faktorene vindstyrke og bladlengde endres, vil det ha stor påvirkning på den

beregnete effekten. Vi kaller derfor vindstyrke og bladlengde for drivende faktorer i beregningen av hvor mye elektrisk energi som blir produsert i kraftverket. Hvor stor del av bevegelsesenergien i vinden som kan utnyttes til produksjon av elektrisk energi, er begrenset av bevegelseslovene fra klassisk mekanikk. Betz's lov (Rosvold & Hofstad, 2023) angir at et vindkraftverk teoretisk sett kan utnytte maksimalt 59,3 % av bevegelsesenergien i vinden. I tillegg vil noe energi gå tapt i omformingene fra bevegelsesenergi til elektrisk energi.

Vindkraftverk designes for å utnytte energien i vinden på best mulig måte. Hvor godt vinden utnyttes kan vurderes ved hjelp av effektkurver som angir hvor mye elektrisk energi ulike vindturbiner kan produsere ved ulike vindstyrker. Før vindstyrken når en oppgitt "cut-in speed" er vinden for svak til at det genereres noe elektrisk energi. Tilsvarende representerer vindturbinens "cut-out speed" vindstyrken hvor vindturbinen automatisk vil bremse opp av sikkerhetsmessige årsaker.

### **3. Konsekvenser av vindkraftutbygging**

Behovet for økt produksjon av fornybar energi har ført til at vind utgjør en stadig mer relevant kilde til elektrisk energi i Norge, men kraftutbygging har store konsekvenser for natur og samfunn. Dilemmaene som oppstår i møtet mellom behovet for utbygging av fornybar energi og hensyn til klima og natur har ført til politiske konflikter helt fra store vannkraftutbygginger som Altavassdraget på 70-tallet (Berg-Nordlie, 2023) til nyere vindkraftutbyggingsprosjekter (Tomasgard, 2021).

For å utnytte energien i vinden best mulig, bør vindkraftverkene plasseres i åpent landskap og gjerne på høydedrag. Dette gjør at vindturbinene blir synlige på lang avstand og mange beskriver derfor vindkraftparker som visuell forurensning. I tillegg kan roterende turbinblader skape støy og drepe eller skade fugl.

En vindkraftpark består ofte av en samling med vindkraftverk som sammen med infrastruktur som veier, kraftnett og koblingsstasjoner legger beslag på store arealer. Konsekvensene av vindkraftutbygging er derfor nært knyttet til hvilket

naturmiljø og hvilke samfunnsstrukturer som påvirkes i de ulike utbyggingsprosjektene. Derfor må alle kraft- eller utviklingsselskaper som vil bygge ut nye vindkraftparker søke om tillatelse, konsesjon, fra Norges Vassdrags- og Energidirektorat, NVE. Gjennom søknadsbehandlingen vurderer NVE samfunnsnyttene av prosjektet opp mot de konsekvensene prosjektet har for natur og samfunn.

## Utvikling av en vindkraftinstallasjon

Som en del av prosjektet *Stiv Kuling ved Stad* har vi utviklet en prototype på en vindkraftinstallasjon. I utviklingsprosessen har vi arbeidet etter prinsippene i den brukerorienterte innovasjonsmetoden Design Thinking (f.eks. Handelshøyskolen NMBU, 2023), og vi har valgt å inkludere studenter fra *Bachelor i Fornybar Energi* ved HVL i idéprosessen. Dette har gitt oss verdifulle innspill i utviklingsprosessen samtidig som studentene har fått mulighet til engasjere seg i et samarbeid med regionalt næringsliv.

## Arbeidslivsrettet undervisning i samarbeid med ViteMeir

I den nasjonale studentundersøkelsen *Studiebarometeret* (<https://www.studiebarometeret.no>), uttrykker studentene ved studieprogrammet *Bachelor i Fornybar Energi* at de i stor grad er fornøyde med studiekvaliteten. Samtidig gir studentene tilbakemelding om at de i mindre grad opplever at studieprogrammet har relevant tilknytning til arbeidslivet. Gjennom *Studiebarometeret* indikerer studentene også at de ønsker flere gjesteforelesere og arbeidslivsrettede prosjekter. Med utgangspunkt i studentenes tilbakemeldinger, ønsket jeg å utvikle et undervisningsopplegg for å styrke studentenes formidlingskompetanse og gi dem erfaring med et arbeidslivsrettet tverrfaglig prosjektarbeid. Fordi formålet med samarbeidet mellom HVL og ViteMeir (Høgskulen på Vestlandet, 2022) er å fremme utvikling av undervisning og formidling ved HVL, ble det naturlig å bruke samarbeidsprosjektet med ViteMeir som utgangspunkt for utvikling av et arbeidslivsrettet undervisningsopplegg.

For å gjøre læringsopplegget mest mulig arbeidslivsrettet, tok jeg utgangspunkt i et idémyldringsverksted som ViteMeir allerede hadde gjennomført i forbindelse med videreutvikling av utstillingsområdet. Til dette verkstedet inviterte ViteMeir partnere, fagpersoner og andre interesserte fra næringslivet i regionen til å bidra inn i en tverrfaglig idéprosess ved ViteMeir. Våren 2022 gjennomførte vi en pilotering av undervisningsopplegget innrettet som en to-dagers workshop hvor en utvalgt studentgruppe fikk i oppdrag å finne løsninger for hvordan vi kan

formidle forskningsbasert kunnskap om bærekraftig omstilling av energisystemet. Studentene fikk en faglig innføring i produktutvikling og idéprosesser før de ble utfordret til å benytte den brukerorienterte innovasjonsmetodikken Design Thinking (f.eks. Handelshøyskolen NMBU, 2023) til å utvikle prototyper på nye vitensenterinstallasjoner knyttet til omstilling av energisystemet (Figur 3).



*Figur 3. Studenter i arbeid med å utvikle prototyper på nye vitensenterinstallasjoner ved ViteMeir. Studentene brukte innovasjonsmetodikken Design Thinking i kombinasjon med den flerfaglige kompetansen de har oppnådd gjennom studiet Bachelor i Fornybar Energi.*

## Utvikling av en prototype

Brukerorienterte problemløsningsprosesser, som Design Thinking, innebærer at utviklingsprosessen er tett knyttet til brukerens ønsker og behov. Brukerne av vindkraftinstallasjonen er et bredt publikum som inkluderer skoleelever, studenter og fritidsgjester som kommer til ViteMeir for å lære og bli underholdt. Kunnskap om bærekraftig utvikling av samfunnet står sentralt i skolens nye læreplanverk (Utdanningsdirektoratet, 2023), og brukergruppen omfatter derfor også lærere og formidlere som vil bruke installasjonen til å oppnå mål fra det norske læreplanverket. Fordi brukergruppen er stor, har vi valgt å utvikle en interaktiv vitensenterinstallasjon rettet mot jenter og gutter i alderen 12- 14 år.

Fordi målet med installasjonen er å formidle en faglig begrunnet historie om vindkraftproduksjon, tok vi utgangspunkt i grunnleggende effektteori for å beskrive sammenhengen mellom vindstyrke, lengde på turbinblad og elektrisitetsproduksjon (Figur 4).

# PROTOTYPE VINDKRAFTINSTALLASJON

## Faglig bakgrunn

Vi kan utnytte bevegelsesenergien i vinden til produksjon av elektrisk energi.

Vi kan uttrykke sammenhengen mellom produsert effekt,  $P_w$  [W] og vindstyrken,  $v$  [m/s] ved hjelp av formelen

$$P_w = \frac{1}{2} \rho \pi r^2 v^3 c_p.$$

omformulere for å samle drivende faktorer

$$P_w = \left(\frac{1}{2} \rho \pi c_p\right) v^3 \cdot r^2 \quad \text{og setter } \frac{1}{2} \rho \pi c_p = 1$$

Da får vi formelen  $P_w = v^3 r^2$  som angir at energiproduksjonen styres av faktorene vindstyrke,  $v$  [m/s], og bladlengde  $r$  [m].

Vi lar gjestene styre energiproduksjonen ved hjelp av de to faktorene. Gjestene kan:

1. Styre vinden
2. Endre bladlengde

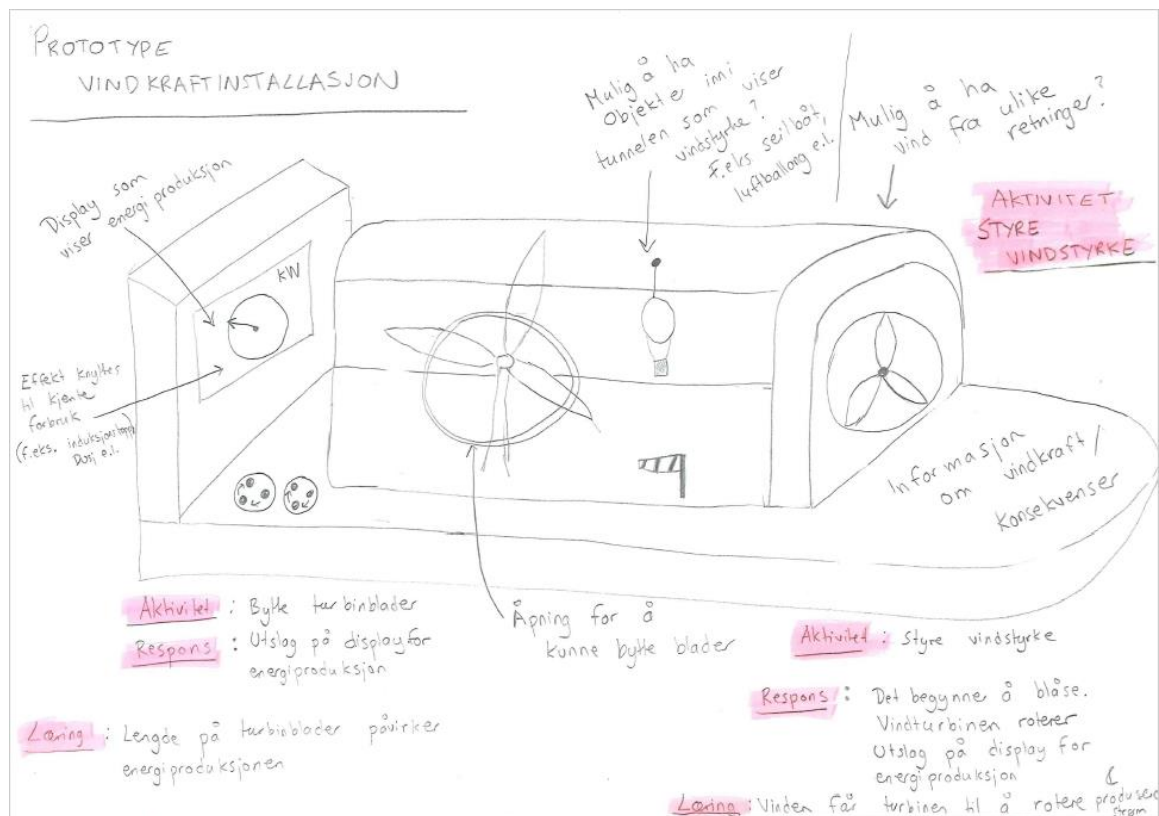
### 1. Styre vinden

Trinn Vindstyrke	Produksjon $P_w$	bladlengde $r$
0	0	1
1	1	1
2	8	1
3	27	1
4	64	1

### 2. Endre bladlengde

Trinn Vindstyrke	Produksjon $P_w$	bladlengde $r$
0	0	0
1	0	0
1	1	1
1	4	2
1	9	3
1	16	4

Figur 4 Notater fra prosessen med å utvikle en faglig begrunnet historie om hvordan naturressursen vind kan utnyttes til produksjon av elektrisk energi. I historien tar vi utgangspunkt i grunnleggende effektteori for å beskrive sammenhengen mellom vindstyrke, lengde på turbinblad og elektrisitetsproduksjon.



Figur 5 Skisse av prototype på en vindkraftinstallasjon utviklet for læring knyttet til utnyttelse av vind til produksjon av elektrisk energi. Prototypen bygger på grunnleggende effektteori og er utviklet for å beskrive sammenhengen mellom vindstyrke, lengde på turbinblad og elektrisitetsproduksjon.

Da vi hadde utarbeidet skisser på prototypen (Figur 5) og sikret finansiering til produksjon av en fullskala installasjon, tok vi kontakt med det tyske selskapet Hüttinger som arbeider med utvikling av interaktive utstillinger. Selskapet ble valgt fordi Hüttinger har lang erfaring med utvikling av vintersenterinstallasjoner og fordi de hadde kapasitet til å ta på seg oppdraget.

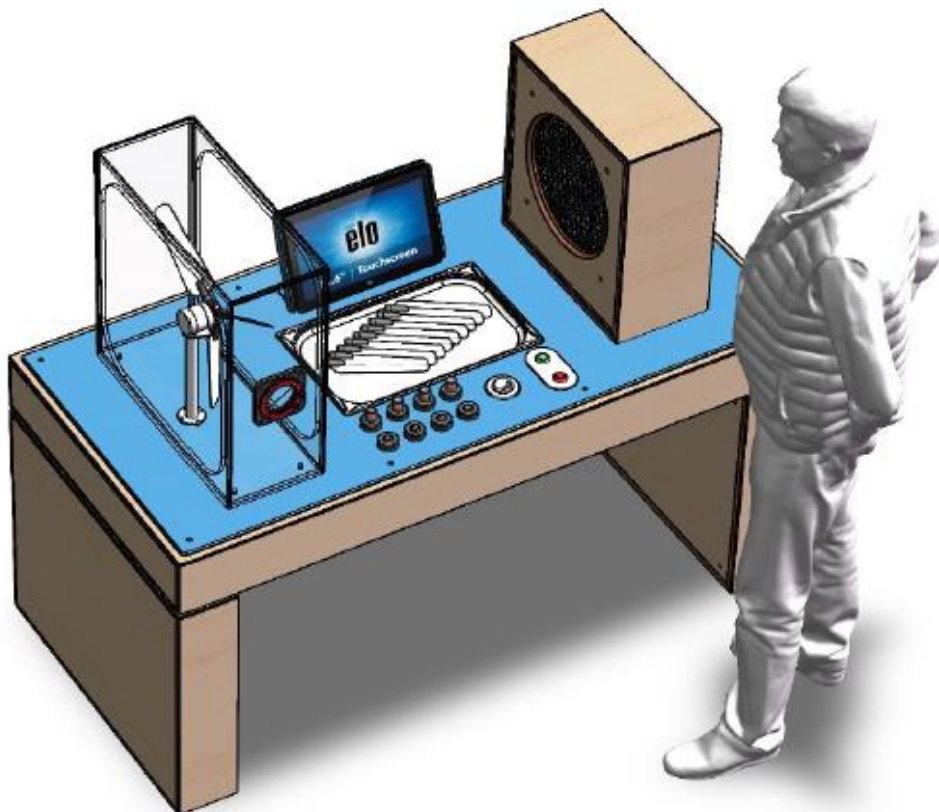
## Installasjonen

Vindkraftinstallasjonen er utviklet med utgangspunkt i prototypen (Figur 5) samt eksisterende vindkraftinstallasjoner som Hüttinger har produsert tidligere. I den ferdige installasjonen (Figur 6) får gjestene i oppdrag å designe et vindkraftverk som utnytter energien i vinden på best mulig måte. Skjermen vil vise informasjon om turbinens effektivitet i et brukerorientert design som minner om en app utviklet for strømforbruk.



Gjestene inviteres til å utforske hvilke design av vindturbin som vil produsere mest mulig elektrisk energi gjennom følgende steg:

1. Velge design på vindturbinen ved å montere turbinblader med ulik lengde og vinkling
2. Trykke på en knapp for å generere vind og styre vindstyrken til ulike nivåer for å undersøke sammenhengen mellom vindstyrke, vindturbindesign og elektrisitetsproduksjon.
3. Endre forutsetningene for strømproduksjon ved å skru på lyspærer og dermed forbruke elektrisk energi samtidig som vindkraftverket produserer elektrisk energi.



*Figur 6 Skisse av vindkraftinstallasjonen som er utviklet i samarbeid med utviklingsselskapet Hüttinger. Vindkraftinstallasjonen er under produksjon og vil inngå i den nye energiutstillingen ved ViteMeir.*

Installasjonen er utviklet for læring om vind som energiressurs (Læringsmål 1) og omforming av bevegelsesenergi til elektrisk energi i et vindkraftverk (Læringsmål 2). I utstillingsområdet vil installasjonens interaktive læringselementer suppleres med infografikk om konsekvenser av vindkraftutbygging på land (Læringsmål 3) og dilemmaet mellom behovet for utbygging av fornybar energi og hensynet til klima og natur.

## Litteratur

Berg-Nordlie, Mikkel; Tvedt, Knut Are: *Alta-saken* i *Store norske leksikon* på snl.no. Hentet 3. september 2023 fra <https://snl.no/Alta-saken>

Deb, D., Dixit, A., & Chandra, L. (2019). *Renewable Energy and Climate Change: Proceedings of REC 2019* (Vol. 161). Springer Nature.

Handelshøyskolen NMBU. (2023, 3. September). *Design Thinking*. <https://www.ser-vi-etter.no/designtenkning>),

Høgskulen på Vestlandet. (2022, 17. November). *Samarbeidet mellom HVL og ViteMeir*. <https://www.hvl.no/alu/vitemeir-hvl-prosjektet/>

Miljødirektoratet. (2023, 2. Mai). *Vindkraft*. <https://www.miljodirektoratet.no/ansvarsomrader/klima/fornybar-energi/vindkraft/>

Olje- og energidepartementet. (2022, 13. Mai). *Kraftproduksjon*. Olje- og energidepartementet. <https://energifaktanorge.no/norsk-energiforsyning/kraftforsyningen/#vindkraft>

Rosvold, Knut A.; Hofstad, Knut: *Betz' lov* i *Store norske leksikon* på snl.no. Hentet 3. september 2023 fra [https://snl.no/Betz' lov](https://snl.no/Betz'_lov)

Tomasgard, J.-A. (2021, 17. Mai). *Vindkraftstriden på Haramsøya går på helsa løs*. <https://www.tu.no/artikler/vindkraftstriden-pa-haramsoya-gar-pa-helsa-los/510173>

Utdanningsdirektoratet. (2023, 3. September). *Læreplanverket*. <https://www.udir.no/laring-og-trivsel/lareplanverket>