



Norges miljø- og
biovitenskapelige
universitet

Masteroppgave 2021 30 stp.
Fakultetet for realfag og teknologi

Småskala vindenergi, teknologi- og løsningsutvikling

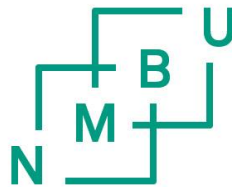
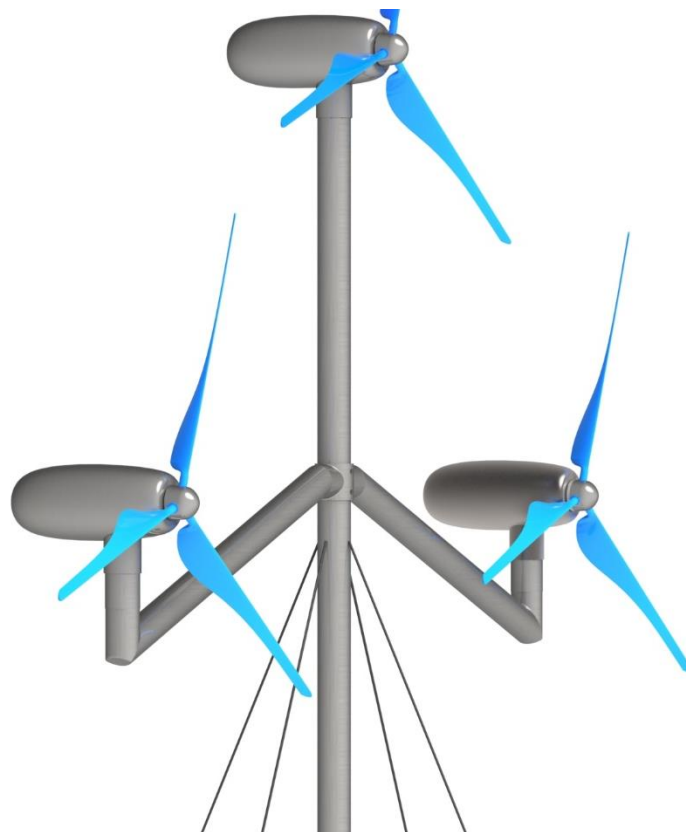
Small-scale wind energy, technology and solution
development

Marianne Sandnes Inderberg
Maskin-, prosess- og produktutvikling

Småskala vindenergi, teknologi- og løsningsutvikling

av

Marianne Sandnes Inderberg



Norges miljø- og
biovitenskapelige
universitet

Mastergradsoppgave – Maskin, prosess- og produktutvikling

Fakultet for realfag og teknologi, NMBU

Høsten 2021

Forord

Denne mastergradsoppgaven markerer avslutningen på mitt 4,5 års studieløp innenfor ingeniørfag for maskin og produktutvikling ved Norges miljø og biovitenskapelige universitet (NMBU). Gradsprosjektet er gjennomført høsten 2021 og har et omfang på 30 studiepoeng.

Studieløpet startet med to år ved bachelorstudiet i ingeniørfag, maskiningeniør ved Universitetet i Sørøst-Norge (USN), og deretter avslutningsvis to og et halvt år ved studieretning maskin, prosess- og produktutvikling, for sivilingeniørgraden ved fakultetet for realfag og teknologi ved NMBU.

Mastergradsoppgaven er gitt internt av RealTek ved NMBU og går ut på å utrede, utvikle, grovdimensjonere og designe en mikrovindturbin. Inspirasjonen for prosjektet er primært knyttet til det globale behovet for fornybar energi, og potensialet vinden har i å gi denne energien lokalt.

Tematikken rundt fornybar energi, likeledes vindenergi er et svært aktuelt tema i dagens samfunn, både nasjonalt og globalt. Dette er et av elementene som gjorde at prosjektet appellerte til meg. Jeg har stor tro på at vindenergi vil være en av de viktigste ressursene i skiftet mot en mer klimavennlig energiproduksjon. I tillegg er det spennende å undersøke mulighetene rundt en mer småskala tilnærming til vindindustrien, i møte med utfordringene knyttet til de store mega-vindturbinene.

Ved valg av mastergradsoppgave var det viktig for meg at jeg i gjennomføringen kunne bruke verktøy og kunnskaper jeg har tilegnet med underveis i studiet, men enda viktigere at prosjektarbeidet ga meg mulighet til å etablere nye kunnskaper. Utrednings- og utviklingsfasen var spesielt lærerik, da vindenergi var et nytt tema for meg, og jeg har tilegnet meg nye kunnskaper spesielt innen metrologi, og det tekniske innen vind og vindteknologi. Videre har jeg gjennom prosjektet tilegnet meg kunnskaper og erfaringer som gjør at jeg føler meg faglig og metodisk sterkere i møte med fremtidige produktutviklingsarbeider.

Først og fremst ønsker jeg å takke førsteamanuensis Jan Kåre Bøe for enestående og inspirerende oppfølging, veiledning og støtte igjennom prosjektet fra start til slutt. Jeg vil også takke deltakerne i eksperttestingen; senioringeniørene Egil Stemsrud for beregningsstøtte, Henrik F. Holmberg for bistand med simuleringsarbeid og Øyvind Hansen for innspill i forbindelse med kartlegging av produksjonsmetoder.

Tønsberg, 15.12.2021



MARIANNE SANDNES INDERBERG



Sammendrag

Det er en enighet blant verdens klimaforskere at menneskeskapte klimagassutslipp er i ferd med å forårsake endringer klimaet som vil medføre alvorlige konsekvenser for menneskeheten og naturen. FNs klimarapport, publisert 9. august 2021, konstaterer det faktum at det er kopling mellom klimagassutslipp og klimaendringer. Følgelig har klimapolitikken satt en rekke kraftige mål for fremtiden for å bremse opp utviklingen og endringene i klimaet. For at disse målene skal nås, må energiforbruket legges om gjennom å erstatte fossil energi med fornybar energi.

En energikilde som har blitt brukt i flere tusen år, og som det i dag er et stort og økende fokus på i forbindelse med kraftproduksjon, er vindenergi. I dag finnes det vindturbiner som omdanner vindenergi til elektrisk energi i et vidt spekter størrelser, fra de minste vindturbinene, også kaldt «mikrovindturbiner» som produserer så lite som under 1,0 kW til 50 kW, til de aller største vind-turbinene som produserer omkring 15 MW. Det satses stort på kjempeturbiner, spesielt i sammenheng med havvind. Disse turbinene leverer enormt mye strøm, men ikke uten ulemper.

De store vindturbinparkene er kraftige naturinngrep, og må plasseres strategisk med hensyn til vindressurs og samtidig med hensyn til omgivelsene. De store vindturbinene er en trussel for dyreliv, spesielt fugler, de er visuelt forstyrrende i naturen og de produserer akustisk støy som over tid kan være skadelig for mennesker som bor i nærheten. Derfor satses det nå stort på havvind og flytende vindkraftverk. Disse kraftverkene forstyrrer mennesker, natur og dyreliv i mindre grad enn de landbaserte vindkraftverkene, og samtidig er det tilgang på store og stabile vindressurser ute på havet. Ulempen med havvindkraftverk er at det må bygges ekstra strømmnett mellom kraftverkene og forbrukerne, som er både kostbart og fører til nettap når strømmen fraktes over lange strekninger. Det er samtidig komplisert og kostbart å bygge og drifte disse vindkraftverkene, spesielt med tanke på beliggenhet og størrelses-spekteret.

Grunnlaget for dette masterarbeidet ligger i å finne lokale alternativ til de store vindturbinparkene. Masterarbeidet er derfor fokusert på å utrede muligheter og teknologiske løsninger innen mikrovindturbiner, samt undersøke hvordan de effektivt kan implementeres i samfunnet og produsere elektrisitet mer lokalt og distribuert enn de store vindturbinparkene. Gjennom å produsere elektrisitet i mindre skala og mer lokalt, kan strømproduksjonen bli mer fleksibel, naturvennlig, og redusere tap av energi i strømmettet. Videre er det blitt utviklet en konseptuell løsning for en småskala vindturbin.

For å sikre systematikk, målfokus og kvalitet i prosjektarbeidet er prosessessen kartlagt i tre hovedtrinn; utredningsfase, utviklingsfase og analyse- og ferdigstillingsfase. Utredningsfasen startet med en litteraturgjennomgang som avdekket det historiske perspektivet, nåtidssituasjonen, markedsanalyse og potensialet for prosjektet. Det er blitt tidlig formulert en oppdragsspesifisering, følgelig med målsetninger og planlegging av omfang, ressursbruk og forløpet i prosjektet. Ved å sette en tidlig prosjektplan er avgjørelser rundt avgrensninger for arbeidet gjort på en realistisk og fornuftig måte.

Videre i utredningsfasen er den metodiske tilnærmingen for produktutviklingsarbeidet kartlagt og presentert. En av metodene som er brukt er produktutviklingsmetoden IPD. IPD benyttes for å spesifisere, effektivisere og gi en helhet i prosjektarbeidet. Metodikken bidro til at arbeidet ble sikret mot hovedmålet fra den tidlige fasen i prosjektet, gjennom tidlig spesifisering. Pugh's metodikk, som en del av QFD-tankegangen er benyttet for å systematisk sammenlikne løsningsalternativer, der de har blitt målt på kriterier som settes på bakgrunn av de ønskede produkttegenskapene. Metodikken ga en

bred, likevel spesifikk vurdering og seleksjon, der kundens behov stod i fokus. SCAMPER er benyttet som tankegang i konseptgenereringen, som underbygget kreativitet og ga opphav til innovative ideer.

Som siste del av utredningsfasen er det det teoretiske grunnlaget som er relevant for det videre utviklingsarbeidet kartlagt. Mastergradsoppgaven er et pilotprosjekt for NMBU, og derfor var utredningen av teori en stor og nødvendig del av arbeidet. Teorien avdekket hovedtrekkene innenfor det meteorologiske, aerodynamiske og mekaniske aspektet rundt vindkraftteknologi, samt en grov kartlegging av teknologi og elektrisitet som var relevant for utviklingsarbeidet.

Utviklingsfasen startet med produktspesifisering der det ble satt hovedmål for produktet, og videre delmål innenfor kategoriene produktutviklingen tok hensyn til. Ut ifra produktmålene er de ønskede produktegenskapene kartlagt og vektlagt. For å kartlegge hvordan produktet skal nå hovedmålet, er hoved og delfunksjonene blitt organisert i en funksjonsanalyse. Analysen er delt opp i tre nivåer, som tar for seg hva, hvorfor og hvordan produktet skal svare til hovedmålet. Videre ble funksjons-elementene dekomponert fra analysen til løsningsalternativer som er beskrevet og evaluert for fordeler og ulemper i respektive tabeller. Løsningsalternativene er deretter vurdert i en egenscreening hvor resultatene dannet grunnpilarene til konseptet.

For å undersøke hvordan konseptforslaget detaljert skulle se ut, er det blitt gjennomført grove grunnlagsberegninger. Dette ga et inntrykk av hvordan løsningen skulle se ut i forhold til størrelse og form, og hva som kreves for å produsere ønsket effekt. Kvalitetssikring av utviklingsarbeidet og de grunnleggende beregningene ble gjennomført gjennom eksperttesting med tilbakemeldinger og input fra eksperter ved NMBU på de respektive fagområdene. Videre er det blitt gjennomført FEM-analyser og simuleringer på enkeltelementer i konseptløsningen. Fra beregninger, ekspertinput og analyser er grunnlaget lagt for å ferdigstille produktarkitekturen til den konseptuelle vindturbinen.

Produktutviklingsarbeidet resulterte i en horisontalaset konsept-vindturbin (HAWT), som er modulbasert. Vindturbinen inneholder turbinmoduler som kan koples på tårnet i én, to eller tre enheter. Hver modul har en estimert installert effekt på 5 kW, og med tre moduler kan vindturbinen produsere opp til 15 kW. Denne modulløsningen gjør at turbinen kan tilpasses kundebehov, og kan ved å kople på flere moduler ha et stort samlet sveipeareal uten store dimensjoner på propellene. Vindturbinen måler 12 meter fra bakkenivå til den høyeste turbinmodulens rotorsenter, og har en rotordiameter på 4 meter, som gir en maksimal høyde på 14 meter over bakken. Ved to eller tre installerte moduler måler vindturbinen en bredde på 6 meter fra rotorsenter til rotorsenter horisontalt. Vindturbinens reisverk er hovedsakelig produsert i galvanisert stål, og turbinbladene og drivverket kjøpes inn fra andre produsenter. Drivverket består av et lager, planetgir og en synkrongenerator, og komponentene er modellert opp for å gi innsikt i størrelsesforhold i modelleringen av turbinen.

For videre arbeid må blant annet det elektriske systemet i turbinen utredes, i tillegg hvordan den strømmen som produseres skal håndteres videre fra generatoren. Det må gjøres grundigere vurderinger rundt drivverket, og hvordan dette optimalt skal fungere, i tillegg hvordan start, stopp og oppbremsing av vindturbinen skal fungere. Det må utarbeides løsninger for hvordan vindturbinen skal rotere mot vindretningen, likeledes hvordan bladprofilen optimalt bør se ut og hvordan de håndtere sterke vindhastigheter. Det må gjennomføres detaljerte beregninger på reisverket (fundament, tårn og modulstativ), samt innfestinger av alle komponentene. Det må gjennomføres mer nøyaktige beregninger og luftstrøms-simuleringer på turbinblad og vindturbinen i sin helhet, for å optimere dimensjoner og virkningsgrader, også i forhold til dynamiske belastninger.

Abstract

There is a consensus among the world's climate scientists that man-made greenhouse gas emissions are causing climate change that will have serious consequences for humanity and nature. The UN Climate Report, published on 9 August 2021, states the fact that there is a link between greenhouse gas emissions and climate change. Consequently, climate policy has set a number of strong goals for the future to slow down development and climate change. In order to achieve these goals, energy consumption must be changed by replacing fossil energy with renewable energy.

An energy source that has been used for thousands of years, and which there is today a large and increasing focus on in connection with power production, is wind energy. Today, there are wind turbines that convert wind energy into electrical energy in a wide range of sizes, from the smallest wind turbines, also called "micro-wind turbines" that produce as little as 1.0 kW to 50 kW, to the largest winds. turbines that produce about 15 MW. There are large investments connected to giant turbines, especially in connection with offshore wind. These turbines deliver an enormous amount of power, but not without drawbacks.

The large wind farms are big encroachments on nature, and must be placed strategically with regard to wind resources and at the same time with regard to the surroundings. The large wind turbines are a threat to wildlife, especially birds, they are visually disturbing in nature and they produce acoustic noise which over time can be harmful to people living nearby. Therefore, there is now a major investment in offshore wind and floating wind turbines. These power plants disturb humans, nature and wildlife to a lesser extent than the land-based wind power plants, and at the same time there is access to large and stable wind resources out at sea. The disadvantage of offshore wind turbines is that extra power grids must be built between the power plants and consumers, which is both costly and leads to grid loss when the power is transported over long distances. At the same time, it is complicated and expensive to build and operate these wind turbines, especially in terms of location and size range.

The basis for this master's thesis lies in finding local alternatives to the large wind farms. The master's thesis is therefore focused on studying opportunities and technological solutions within micro wind turbines, as well as investigating how they can be effectively implemented in society and produce electricity more locally and distributed than the large wind turbines. By producing electricity on a smaller scale and more locally, electricity production can become more flexible, environmentally friendly, and reduce energy loss in the electricity grid. Furthermore, a conceptual solution has been developed for a small-scale wind turbine.

To ensure systematics, goal focus and quality in the project work, the process is mapped in three main steps; assessment phase, development phase and analysis and completion phase. The study phase began with a literature review that revealed the historical perspective, the current situation, market analysis and the potential for the project. An assignment specification has been formulated at an early stage, consequently with objectives and planning of the scope, use of resources and the course of the project. By setting an early project plan, decisions about boundaries for the work are made in a realistic and sensible way.

Further in the assessment phase, the methodological approach for the product development work is mapped and presented. One of the methods used is the product development method IPD. IPD is used to specify, streamline and provide a whole in the project work. The methodology contributed to the work being aimed at the main goal from the early phase of the project, through early specification. Pugh's methodology, as part of the QFD thinking, has been used to systematically compare solution alternatives, where they have been measured on criteria set on the basis of the desired product properties. The methodology provided a broad, yet specific assessment and selection, where the

customer's needs were in focus. SCAMPER is used as a way of thinking in concept generation, which underpins creativity and gave rise to innovative ideas.

As the last part of the assessment phase, the theoretical basis that is relevant for the further development work has been mapped. The master's thesis is a pilot project for NMBU, and therefore the study of theory was a large and necessary part of the work. The theory revealed the main features within the meteorological, aerodynamic and mechanical aspect around wind power technology, as well as a rough mapping of technology and electricity that was relevant to the development work.

The development phase started with product specification where the main goals for the product were set, and further sub-goals within the categories product development took into account. Based on the product objectives, the desired product properties have been mapped and emphasized. In order to map how the product is to achieve the main goal, the main and sub-functions have been organized in a function analysis. The analysis is divided into three levels, which address what, why and how the product should correspond to the main goal. Furthermore, the functional elements were decomposed from the analysis into solution alternatives that are described and evaluated for advantages and disadvantages in the respective tables. The solution alternatives are then assessed in an in-house screening where the results formed the cornerstones of the concept.

In order to investigate what the concept proposal should look like in detail, rough basic calculations have been carried out. This gave an impression of what the solution should look like in relation to size and shape, and what is required to produce the desired effect. Quality assurance of the development work and the basic calculations were carried out through expert testing with feedback and input from experts at NMBU in the respective subject areas. Furthermore, FEM analyzes and simulations have been carried out on individual elements in the concept solution. From calculations, expert input and analyzes, the foundation has been laid for completing the product architecture of the conceptual wind turbine.

The product development work resulted in a horizontal axis concept wind turbine (HAWT), which is module-based. The wind turbine contains turbine modules that can be connected to the tower in one, two or three units. Each module has an estimated installed power of 5 kW, and with three modules the wind turbine can produce up to 15 kW. This modular solution allows the turbine to be adapted to customer needs, and can by connecting several modules have a large total sweeping area without large dimensions on the propellers. The wind turbine measures 12 meters from ground level to the rotor center of the highest turbine module, and has a rotor diameter of 4 meters, which gives a maximum height of 14 meters above the ground. With two or three modules installed, the wind turbine measures a width of 6 meters from the rotor center to the rotor center horizontally. The wind turbine's construction is mainly produced in galvanized steel, and the turbine blades and powertrain are purchased from other manufacturers. The drive consists of a bearing, planetary gear and a synchronous generator, and the components are modeled to provide insight into size ratios in the modeling of the turbine.

For further work, the electrical system in the turbine must be investigated, in addition to how the electricity produced is to be handled further from the generator. More thorough assessments must be made of the drive, and how this should work optimally, in addition to how the start, stop and braking of the wind turbine should work. Solutions must be developed for how the wind turbine should rotate against the wind direction, as well as how the blade profile should look optimal and how they handle strong wind speeds. Detailed calculations must be carried out on the structure (foundation, tower and modular stand), as well as fastenings of all components. More accurate calculations and airflow simulations must be performed on turbine blades and the wind turbine as a whole, in order to optimize dimensions and efficiencies, also in relation to dynamic loads.

Innholdsfortegnelse

Sammendrag.....	ii
Abstract.....	iv
Innholdsfortegnelse	vii
1 INNLEDNING	1
1.1 Bakgrunn	1
1.2 Historien om vindturbinen	4
1.3 Småskala vindturbin-konseptet.....	7
1.4 Utviklingsstatus og potensiale.....	7
1.4.1 Konkurrerende løsninger og aktører	9
1.4.2 Markedsbehov.....	12
1.5 Oppdragsbeskrivelse	14
1.6 Problemstillinger og teknologiske flaskehalsar.....	14
1.6.1 Problemstillinger og fokuspunkter:.....	14
1.6.2 Teknologiske flaskehalsar og utfordringer:	15
2 PROSJEKTPLANLEGGING.....	16
2.1 Prosjektmaal.....	16
2.1.1 Hovedmaal	16
2.1.2 Delmaal.....	16
2.2 Tids- og arbeidsplan med milepeler	16
2.3 Tidlige begrensninger for arbeidet.....	18
3 METODE.....	19
3.1 Terminologi, symboler og formler.....	19
3.1.1 Terminologi.....	20
3.1.2 Symboler og enheter	21
3.1.3 Hovedformler	23
3.2 Utviklingsmetodikk.....	24
3.3 Løsningsverktøy.....	27
3.5 Kvalitetssikring.....	29
3.6 Prosesstrinn	30
4 TEORI OG TEKNOLOGISK GRUNNLAG.....	31
4.1 Meteorologi og vindressurs.....	31
4.2 Aerodynamikk.....	32
4.2.1 Ground drag	32
4.2.2 Turbulens.....	33

4.2.3 Fysikkgrunnlag.....	33
4.2.4 Løft, drag og TSR.....	36
4.3 Småskala vindturbiner.....	38
4.3.1 HAWT vs. VAWT.....	38
4.3.2 Mekaniske elementer.....	39
4.3.3 Generator.....	40
4.3.4 Energiproduksjon og statiske belastninger.....	41
4.4 Sikkerhet, elektrisitet og strømhåndtering.....	45
4.6 Akustikk.....	45
4.5 Krav til små vindkraftverk.....	47
5 PRODUKTSPESIFISERING.....	48
5.1 Produktmålsettinger.....	48
5.2 Produktegenskaper.....	49
5.3 Metriske grensespesifikasjoner, variasjonsbredde.....	50
5.4 Metriske grovspekifikasjoner.....	51
6 KONSEPTGENERERING.....	52
6.1 Funksjonsanalyse.....	52
6.2 Funksjonsalternativer med evaluering.....	53
6.2.1 Sveipeareal.....	53
6.2.2 Overføre energi.....	57
6.4 Tidlig material- og kjemidrøfting.....	61
6.3 Tidligvurdering av brukspåkjenninger.....	61
7 EGENSCREENING OG KONSEPTVALG.....	63
7.1 Seleksjonsmatrise.....	63
7.2 Egenscreening av løsningsalternativer.....	63
7.3 Modularisering.....	66
7.4 Konsept.....	68
8 GRUNNLAGSBEREGNINGER.....	72
8.1 Beregningsmål.....	72
8.2 Beregninger.....	72
9 EKSPERTTESTING OG INPUT.....	79
9.1 Testmålsetninger.....	79
9.2 Ekspertgruppe.....	79
9.3 Resultater.....	80
10 DESIGN, ESTETIKK OG MILJØHENSYN.....	81
10.1 Grønt design.....	81



10.2 Estetikk	81
10.3 Miljøhensyn	81
11 SIMULERING OG OPTIMERING	83
11.1 FEM-analyse på tårn	83
11.2 Flow-simulering av turbinblad	85
12 PRODUKTARKITEKTUR OG KONSEPTDESIGN	87
12.2 Sammenstilling	87
12.3 Helhetsdesign i 3D	90
12.4 Design av strukturelle komponenter	91
12.4 Maskinelementer	95
12.5 Mindre elementer og designdetaljer	96
13 ROBUSTHET, VEDLIKEHOLD OG SIKKERHET	99
14 PRODUKSJONSKOSTNADER	100
15 MARKEDS- OG MILJØPRESENTASJON	101
16 PROSESSEVALUERING OG DISKUSJON	104
16.1 Læring og kompetanseutvikling	104
16.2 Utredningsprosessen	104
16.3 Utviklingsprosessen	105
16.4 Analyse- og ferdigstillingsprosessen	106
17 KONKLUSJON	107
17.1 Resultater og anbefalinger	107
17.2 Videre arbeid	107
18 REFERANSER	109
18.1 Skriftlige kilder	109
18.2 Personlig meddelelse	110
18.3 Nettbaserte kilder	110
19 VEDLEGG	114

1 INNLEDNING

Denne delen rapporten etablerer de tidlige faglige rammene for prosjektarbeidet. Innledningsvis kartlegges bakgrunnen for- og det historiske aspektet av konseptet, som gir perspektiv i forhold til oppgavens hensikt. Til slutt presenteres en oppdragsbeskrivelse som avdekker grunnlaget for videre veivalg.

1.1 Bakgrunn

9. august 2021 presenterte FNs klimapanel deres sjette hovedrapport med ny og oppdatert kunnskap rundt de globale klimaendringene og effektene av dem. Rapporten belyser blant annet koplingen mellom utslipp og klimaendringer, samt et oppdatert karbonbudsjett og ulike fremtidige scenarier og oppvarmingsnivåer. Rapporten konstaterer det faktum at kloden blir varmere og vil være et viktig grunnlag i fremtidig klimapolitikk. Den globale oppvarmingen vil skape store og bekymringsverdige effekter som økt ekstremvær og naturkatastrofer.



Figur 1.1: Klimaendringenes konsekvenser, bilde lånt fra miljødirektoratets forklaring av FNs klimapanel's sjette hovedrapport [1].

Rapporten informerer om vitenskapelige, teknologiske og sosioøkonomiske aspekter i forhold til klimaendringene, samt kartlegger ulike scenarier for fremtiden. Den legger et grunnlag for fremtidig politiske avgjørelser, men gir ingen politiske anbefalinger. Det er likevel ingen tvil – for å nå de globale klimamålene, må energiforbruket legges om, gjennom å erstatte fossil energi med fornybar energi. En fornybar energikilde som har blitt brukt i flere tusen år, og som har et stort potensial er vindenergi.

I dag finnes det vindturbiner som omdanner vindenergi til elektrisk energi i et vidt spekter størrelser, fra de minste vindturbinene, også kaldt «mikrovindturbiner» som kan produsere så lite som under 1,0 kW til 50 kW, til de aller største vindturbinene som produserer omkring 15 MW. Det satses stort, spesielt i Norge på store vindturbiner i forbindelse med havvind. Av all vindkraft som produserer elektrisitet i dag så står havvind kun for 5,5%, men det er en forventet økning til ca. 33% innen 2050 [2]. Årsaken til at det ikke er satset mer på havvind i Norge tidligere er sannsynligvis knyttet til kostnader og etterspørsel, spesielt da flytende havvind, dvs. vindturbiner som er flytende og forankret

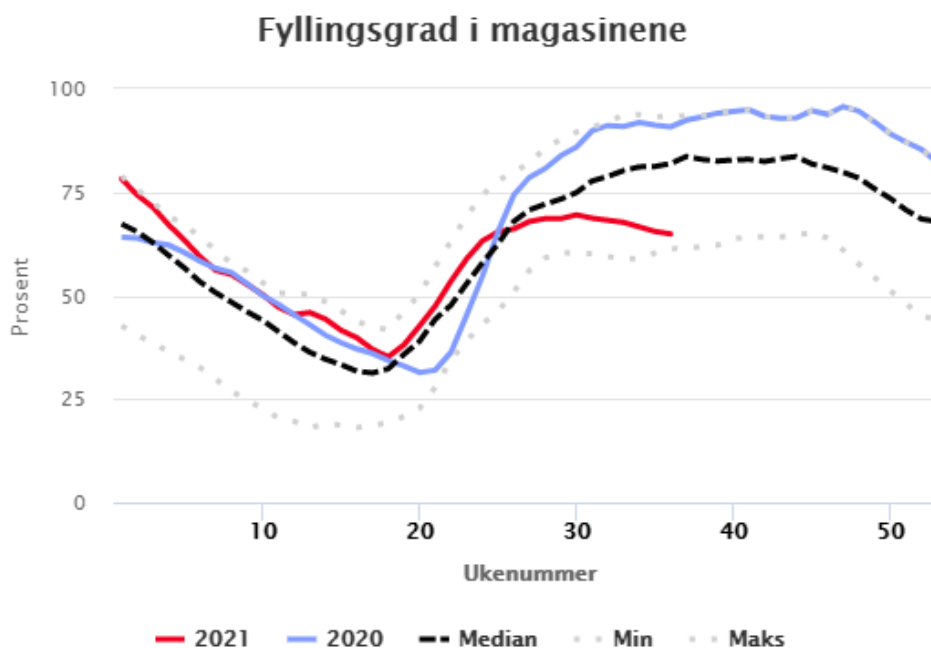
til havbunnen med anker. Det er kostbart og komplisert å produsere, frakte, montere og drifte disse vindturbinene, i tillegg til at Norge har andre store energiresurser som vannkraft, olje og gass.

De store vindturbinparkene produserer mye energi, men ikke uten ulemper. Å sette opp store vindturbinparker er et kraftig naturinngrep, og bør dermed plasseres strategisk for å hindre at dyreliv, spesielt fugler skal bli drept. Det er dyrt å produsere og frakte de store vindturbinene, samt at det er kostbart å bygge ekstra strømnnett. De store vindturbinene, spesielt da flytende havvindturbiner krever at strømmen fraktes over lange avstander for å nå forbrukeren, noe som i dag medfører et betydelig tap i strømnettet. Vindturbinene lager også mye akustisk støy, og bør derfor plasseres med hensyn til beboere i nærheten av parkene.

Utfasing av kullkraft som vil bli erstattet av mindre fleksible kraftverk vil kreve nye løsninger for å øke fleksibiliteten på strømtilførselen. Vindkraft er en ustabil energikilde, ettersom vinden varierer. Det produseres kun strøm når det er vind til stede, og dermed er strømproduksjonen utfordrende å forutse. For å kunne tilby forbrukeren stabil strømtilførsel må det kompenseres med alternative energikilder eller lagring av overskuddsenergi fra vindfulle dager.

I tillegg til stabil strømforsyning, er også strømpris et viktig aspekt for strømmarkedet og forbrukeren. I NVE sin langsiktige kraftmarkedsanalyse fra oktober 2020 anslås det at den gjennomsnittlige kraftprisen i Norge vil øke svakt mot 2040 [3]. Denne prisøkningen kommer blant annet av økte priser på gass og CO₂-kvoter, samtidig som strømforbruket anslås å øke med 25% frem mot 2040, på grunn av elektrifisering og ny kraftkrevende næringsvirksomhet. Det er også kraftpolitiske aspekter som påvirker strømprisen, som mellomlandskabler og avgifter.

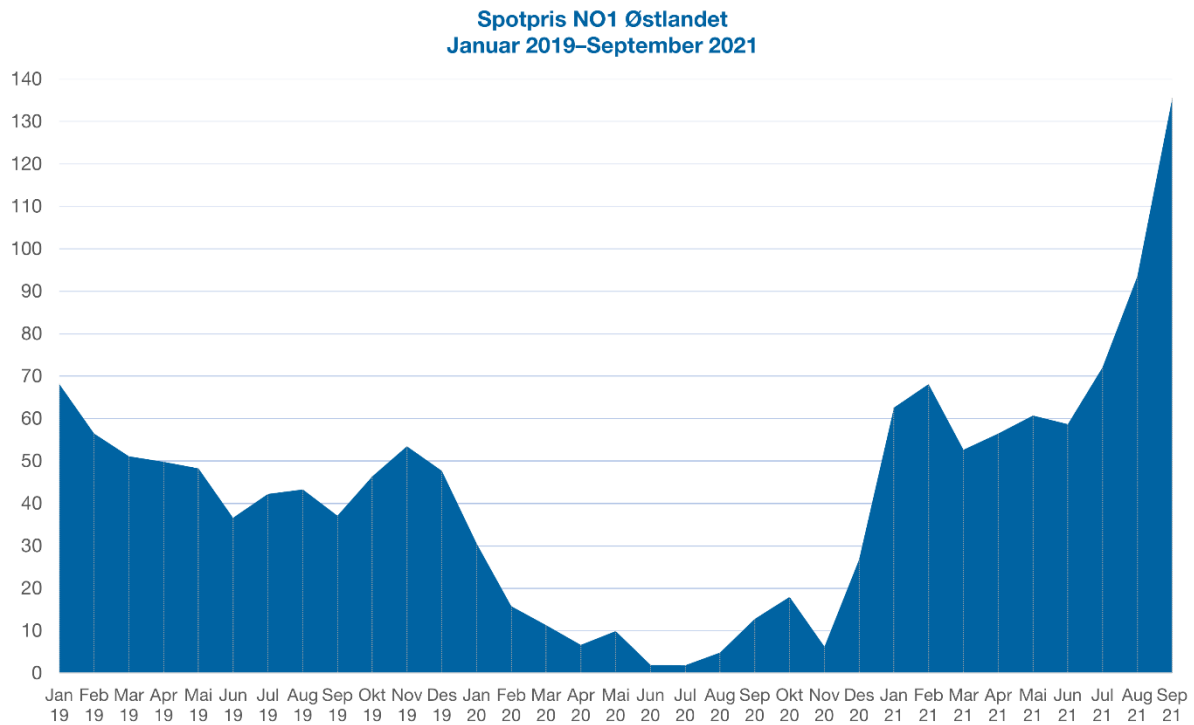
Strømprisene i Norge per 2021 er i stor grad avhengig av nedbør og fyllingsgraden i vannmagasinene. Høsten 2021 ga rekordhøye strømpriser, mye grunnet tørre vannmagasiner. I motsetning var strømprisene i 2020 lavere enn normalt, som følge av en mild vinter som førte til lavere strømforbruk til oppvarming. Dette gjorde at vannmagasinene ble tappet mindre enn normalt.



Figur 1.2: Magasinstatistikk hentet fra NVE viser at fyllingsgraden i magasinene uke 36 i 2021 ligger så lavt som 64.9%, sammenliknet med 90.8% i tilsvarende uke, 2020 [4].

Økt avhengighet av vind-, sol-, og vannkraftverk gjør at været påvirker både tilbudet på strøm, og samtidig hvor stor etterspørselen er, og dermed strømprisene. Når det er kaldt øker etterspørselen på strøm til oppvarming, og i perioder som er vindstille er vi avhengig av nedbør eller høy fyllingsgrad i vannmagasiner, slik at vannkraftverkene kan produsere rikelig med strøm for å holde strømmarkedet stabilt.

Ytterligere faktorer som impliserer de høye strømprisene høsten 2021 er blant annet mellomlands-kabler, et vindstille Europa, høye råvarepriser på olje, kull og gass, samt tøffe klimatiltak fra EU i form av høye priser på CO₂-kvoter [4].



Figur 1.3: Spotpris for Østlandet januar 2019 til september 2021 [5].

Konsekvensene av økte strømpriser er ikke nødvendigvis negativt. Høye strømpriser kan bidra til å forme strømmarkedet på en positiv måte, gjennom å tenke nytt og effektivisere strømforbruket. Det kan eksempelvis handle om å fremskynde forskningen og utviklingen av løsninger for strømlagring, smartsystemer for blant annet oppvarming av hus og vann, og ladning av el-biler. Det finnes allerede systemer som organiserer strømforbruket slik at det bruker minimalt med strøm de tidene på døgnet der strømnettet er presset. Å motivere markedet og forbrukeren til å tenke nytt gjennom å håndtere og bruke strømmen smartere og mer sparsommelig vil også ha en positiv effekt på miljøet gjennom å redusere strømforbruk og unngå at overskuddsstrøm blir kastet.

I tillegg til å tvinge frem en omstilling hos forbrukeren i forhold til strømforbruk, kan det antas at forbrukeren i større grad blir økonomisk motivert til å investere i løsninger for egen el-produksjon med for eksempel små vindkraftverk eller solceller. Når etterspørselen på slike løsninger øker, vil også markedet svare med å utvikle ny og forbedret teknologi, og videre bedre teknologiske løsninger innenfor småskala el-produksjon.

1.2 Historien om vindturbinen

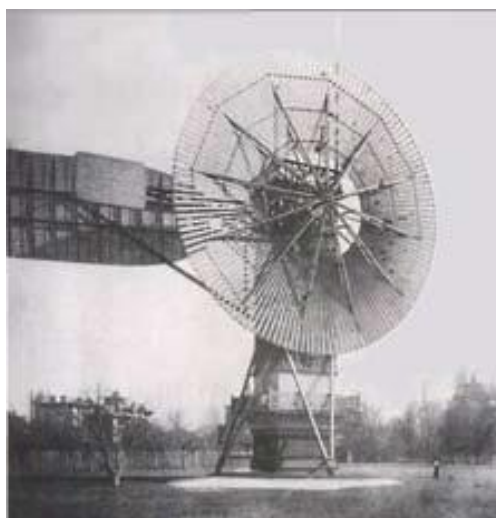
Historisk sett er vindmøller maskiner som utnytter vindens bevegelsesenergi til mekanisk kraft, og de har blitt brukt i mange tusen år. I år 5000 f.Kr. ble vindenergi brukt til å drive båter langs Nilen, i år 200 f.Kr ble vindenergien brukt til å drive vannpumper i Kina og til å male korn i Persia og Midtøsten [6]. De ulike måter å utnytte vindenergien på spredte seg til slutt rundt om i verden, og etter hvert ble vindenergien brukt i bl.a. transport, pumping av vann, drenering av innsjøer og myrer, sagbruk og i salt- og matproduksjon.

Starten på strømproduserende vindmøller

Det første vindturbinen som omgjorde vindenergi til elektrisitet, ble bygd i Marykirk, sørøst i Skottland av Professor James Blyth i 1887. Vindturbinen var 10 meter høy, vertikalakslet og klutseilt, og ble brukt til å lade opp et blybatteri som igjen drev belysningen i hans feriehus [7][8]. Dette feriehuset er dermed det første huset i verden som er kjent for å få elektrisitet levert av vindkraft, og det sies at vindturbinen gikk i 25 år. Blyth tilbød å gi overskuddsstrømmen til folket i Marykirk for å belyse hovedgaten i byen, men de avsto tilbudet da de var i den tro at elektrisitet var «the work of the devil» [7].



Figur 1.4: Vindturbinen bygd av Professor James Blyth i 1895 for Montrose Lunatic Asylum [7].



Figur 1.5: Vindturbinen bygd av Charles Brush i 1888 [8].

I 1895 lykkes Blyth i å installere en større og forbedret versjon av vindturbinen på mentalsykehuset Montrose Lunatic Asylum, se figur 1.4. Vindturbinen var en suksess og ga elektrisitet til sykehuset i 30 år.

I Cleveland, Ohio, 1888, like etter Blyths første vind-turbin, bygger den amerikanske oppfinneren Charles Brush den første store vindturbinen på 12kW. Denne vindturbinen var horisontalakslet med 155 blader av sedertre, og målte en diameter på 17 meter [8]. Videre, i 1891 introduserer den danske forskeren Poul la Cour Danmarks første strømproduserende vindturbin.

Den moderne vindturbinen

Utviklingen og produksjonen av den moderne vindturbinen vi kjenner i dag skøyt fart etter oljekrisen på 1970-tallet. Det er særlig Danmark, etterfulgt av Tyskland har spilt en viktig rolle i denne utviklingen. I dag skjer utviklingen og utbyggingen av vindkraftverk i et høyt tempo, med Kina i førersetet [9].

Den moderne, og mest kjente vindturbinen, spesielt innenfor store vindturbiner som blir mest brukt i dagens vindindustri, er horisontalakslede vindturbiner (HAWT) med tre blader. Bladene er vanligvis lange og smale med form liknende en flyvinger. Generatoren i vindmøllen er ofte plassert i bakkant av bladene, og for å optimere effekten i forhold til vindforholdene kan også bladene rotere rundt sin egen lengdeakse, samt at tårnet kan rotere rundt sin lengdeakse slik at propellen står mot vinden.

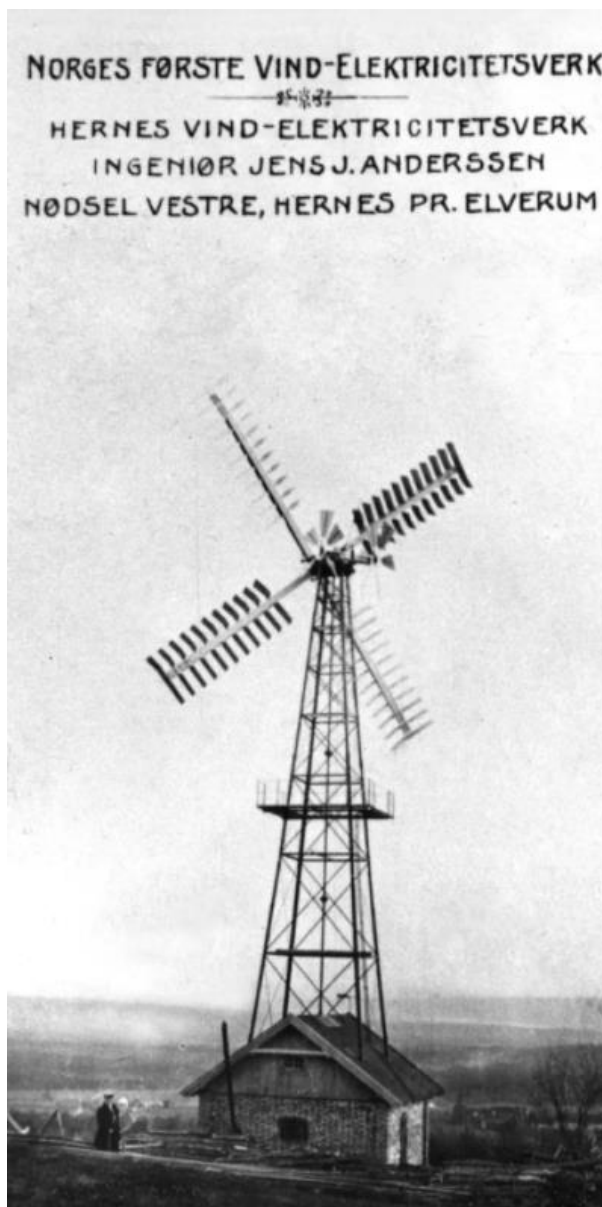
I utviklingen av vindturbiner de siste årene har turbinene blitt større og større, og følgelig mer kraftige. Det er som tidligere nevnt et økende fokus på vindkraft, og det skjer mye innenfor utviklingen av denne industrien. Den produsenten som hittil har installert mest vindkraft globalt, er Vestas. Vestas har nå også lansert deres 15MW offshore vindturbin, V236-15.0MW – deres hittil største. Vindturbinen har en rotordiameter på hele 360 meter, en cut-in vindhastighet på 3 m/s, cut-out vindhastighet på 30 m/s [10].



Figur 1.6: Bilde av vindturbinen Vestas V164-8.4MW i vindkraftverket Horns Rev 3, Danmark [11]. Kraftverket har levert elektrisitet siden desember 2018.

I tillegg til de tre-vingede kjempeturbinene skjer det mye annet innen forskningen som fører til alternative løsninger. Det utforskes nye løsninger innen både horisontal- og vertikalakslede turbiner, samt maskiner som bruker vibrasjoner fra vinden til å produsere elektrisitet.

Vindkraftverk i Norge



Figur 1.7: "Hernes Vindelektricitetsverk" i Elverum - Norges første vindkraftverk konstruert og bygd av Jens J. Anderssen i 1910 [14].

I nyere tid har klimakrisen resultert i en økt satsing på vindkraft, da spesielt havvind. I skrivende stund bygges vindkraftverk Øyfjellet vindpark i Vefsn kommune. Dette vindkraftverket skal stå ferdig fjerde kvartal i 2021, og vil produsere rundt 1,2TWh, og dermed trone som Norges største vindkraftverk [15]. Equinor gjør en stor satsing på vindkraft, spesielt havvind, hvor de har satt seg mål om å installere 12-16GW med fornybar kapasitet innen 2030 [16].

I 1910 ble det første kjente strømproduserende vindkraftverket i Norge bygd. Den var ingeniøren Jens J. Anderssen som eide og skapte denne konstruksjonen, som ble brukt til å gi elektrisitet til gården hans i Elverum [12].

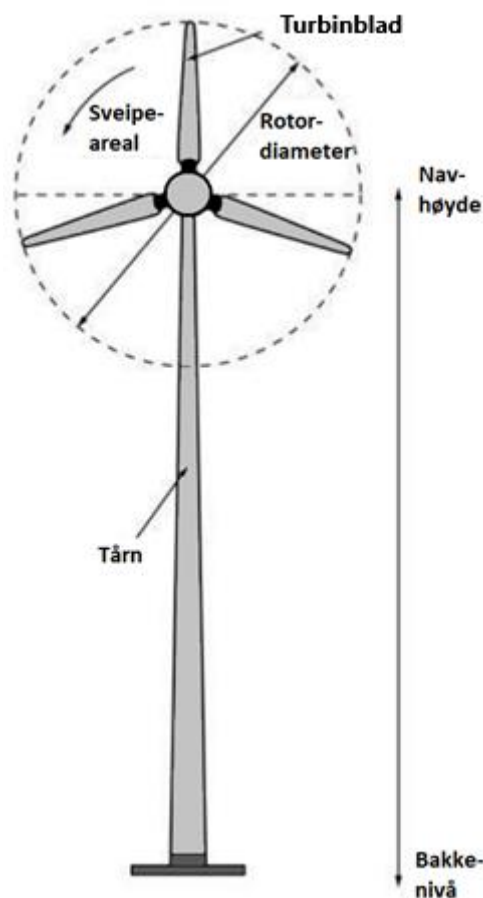
Strømmen ble hovedsakelig brukt til belysning, men også for å drive treskeverk, sag og vedkløyver. Vindmøllen hadde en ytelse på ca. 2,8kW ved fem sekundmeters vind. Vindmøllen liknet på vindmøllene som ble produsert i Danmark tilsvarende tid, og det antas at enkelte elementer av møllen kan ha vært importert.

Ti år senere var Norges andre kjente vindkraftverk i drift på Andøya, ved gården Myre. Denne var kjøpt i Danmark, og ble brukt til belysning.

Anderssen var likevel ikke den første nordmannen som produserte elektrisitet med vindkraft. Det antas at polfareren Fridtjof Nansen var først. I 1893 leverte en vindmølle elektrisitet til belysning om bord på skuta «Fram» på vei mot Nordpolen [13].

Til tross for at Norge var relativt tidlig ute med de første vindkraftverkene, var det ikke før i 1986 det første moderne vindkraftverket var i drift i Norge. Dette var på Titran i Sør-Trøndelag, på 50kW [9]. Den sene utbyggingen av vindkraftverk i Norge har sin forklaring i at landet har andre store energiresurser som vannkraftverk, samt olje- og gassindustri.

1.3 Småskala vindturbin-konseptet



Figur 1.8: Forenklet skisse av en moderne vindturbin med noen begrepsforklaringer.

Vindkraftteknologi er på ingen måte et nytt konsept, men når det er snakk om vindkraft i dag, er det i all hovedsak snakk om store dimensjoner og store vindturbinparker. Disse kommer med tilhørende store kostnader og er kraftige naturinngrep. Konseptet for oppgaven går tilbake til start, slik som de første strømproduserende vindturbinene – produsere elektrisitet lokalt ved forbrukeren.

Prosjektet baserer seg på småskala vindteknologi og lokal energiproduksjon.

Mikro vindturbin

Den tekniske definisjonen på mikro vindturbin eller småskala vindturbin varierer fra land til land. Den internasjonale standardiseringsordningen IEC (International Electrotechnical Commission) definerer i standarden IEC 61400-2 at små vindturbiner har et sveipeareal på mindre enn 200 m² [17]. Dette tilsvarer en nominell effekt på omtrent 50 kW ved en spenning på under 1000 V AC eller 1500 V DC [18]. Vindturbiner typisk for denne øvre grensen vil ha en rotordiameter på opptil 15 meter.

Småskala vindkraft produserer vanligvis elektrisitet for husholdninger, gårder, hytter og seilbåter. De brukes ofte også ved autonome målestasjoner eller telekommunikasjonsstasjoner, samt værstasjoner.

1.4 Utviklingsstatus og potensiale

Vindkraftverk er alt annet enn en ung industri, men hovedfokus på utvikling av vindkraftverk har de siste årene vært primært på store industrielle turbiner. Likevel var det i 2015 registrert 990000 små vindturbiner globalt, og dette tallet ekskluderer store markeder som India [18]. Dermed er det fornuftig å anta at det er godt over en million installerte enheter globalt. Hovedmarkedene for registrerte småskala vindkraftverk er Kina (44%), USA (25%) og Storbritannia (15%).

Markedet for konseptet kan være både privatpersoner og privat- og offentlig sektor. Private kunder kan være boligeiere som ønsker å produsere egen elektrisitet for økonomisk- og miljømessig nytte, hytteeiere på en hytte som ikke er tilkople et strømmnett, eller en gårdeier som ønsker å bruke vindressursene til å redusere strømutfgiftene på gården. I privat sektor kan konseptet gi elektrisitet til eksempelvis næringsbygg, skianlegg og hoteller som kan ha miljømessig og økonomisk nytte av egenprodusert elektrisitet, samt markedsførende ved å reklamere med grønn energi. For den offentlige sektoren kan lokale vindkraftverk gi strøm til offentlige bygg som blant annet, skoler og sykehus. Det kan også levere til værstasjoner og andre autonome måle- eller telekommunikasjonsstasjoner som ligger avsides som ikke har mulighet til å kople på et strømmnett.

Status Norge



Figur 1.9: Urban Green Energy VisionAir5, 3,2 kW [20].

Foreløpig er det liten satsning på småskala vindkraft i Norge i dag. Det er et lite eksisterende marked for mikro vindturbiner til seilbåter, hytter og noe gårder, men det finnes lite til ingen publisert statistikk på omfanget. I 2013 bestemte regjeringen en regelverksendring som skulle forenkle søknadsprosessen for oppsetting av småskala vindturbiner, noe som skapte store forhåpninger for en økt satsning [19].

Resultatene av lovendringen som gjorde Norge til det landet med en av de enkleste og smidigste prosessene for godkjenning i Europa, var langt under forventet. Antakelig er årsakene til dette en kombinasjon av lav lønnsomhet, på grunn av lave strømpriser og høye investeringskostnader, samt kunnskapsmangel.

I en rapport skrevet i forbindelse med prosjektet «Utvikling av testanlegg for småskala vindkraft», ved Nasjonalt Vindenergisenter AS i 2016, sies det at det er den amerikanske produsenten Urban Green Energy som produserer den mest utbredte småskala vindturbinen i Norge, UEG VisionAir 5, 3,2 kW [19]. Det er en VAWT (vertikalakset vindturbin) som opprinnelig var designet for å drive et gjennomsnittlig Amerikansk hus. I det overnevnte prosjektet testet de en slik vindturbin, med skuffende resultater i forhold til produksjon og holdbarhet sammenliknet med hva produsenten av produktet lover.

Potensialet i Norge

Kraftindustrien i Norge har i all hovedsak fokuset rettet mot storskala vind- og vannkraftsanlegg, samt olje- og gassbransjen. Myndigheter og industri satser på store og få kraftanlegg fremfor mange små lokale. Det finnes noen tiltak rettet mot småskala energiproduksjon, som støtteordningene fra Enova. For el-produksjon i privat bolig gir Enova 7.500 kroner i støtte til installasjon, i tillegg 1.250 kroner per kW installert effekt, opptil 15 kW. Det vil si at støtteordningen kan gi inntil 26.250 kroner i støtte [21].

Småskala vind- og vannturbiner i Norge blir nesten uten unntak kjøpt fra utlandet. Det er lite satsing fra norske myndigheter og industri rettet mot forskning, utvikling og produksjon av produkter innenfor dette feltet, til tross for gode forutsetninger i landet.

Det er mange faktorer som spiller inn i forhold til potensialet til småskala vindkraftverk. Først og fremst kreves det vind. Småskala vindturbiner krever ofte kun en svak vind for å nå cut-in vindhastighet, og dermed produsere strøm. Med tanke på Norges lange kystlinje, samt store landområder med lite høydevariasjoner i terrenget, kan det antas at store deler av landet har gode vindforutsetninger for småskala vindkraftverk.

Norge er et rikt land som har høy snittmånedslønn og lave lønnsforskjeller sammenliknet med mange andre land. Befolkningen i Norge bor spredt, mange bor i eneboliger og har i tillegg fritidsboliger. Det er også mye gårdsdrift, som ofte innebærer store åpne områder. Av den grunn kan det antas at en stor



del av befolkningen har både investeringskapital, samt mulighet til å plassere en vindturbin på deres eiendom.

1.4.1 Konkurrerende løsninger og aktører




Det finnes en rekke ulike typer vindturbiner, både innenfor makro- og mikro vindteknologi. Vindturbinene i de to kategoriene er ofte like i designet, men innenfor mikro vindteknologi er det mer vanlig med vindturbiner som krever mindre plass, som VAWT. Fokusområdet i denne kartleggingen begrenses til effekt fra 1 til 15 kW.

For å forenkle presentasjonen av de konkurrerende løsningene begrenses beskrivelsen til hoveddimensjoner på størrelse, effekt, cut-in og cut-out vindhastighet, enkel beskrivelse av konstruksjonen og bruksområde, samt pris om det er oppgitt fra leverandør. Prisen kan avvike fra reell total installasjonspris da det påløper kostnader for frakt, montering og andre komponenter som inverter, regulator, batteri og liknende, etter hvordan turbinen skal brukes. Produktdaten som beskrives er hentet fra leverandør eller produsent. Det tas dermed høyde for at oppgitt data kan avvike fra realiteten, da det kan være et salgstriks å oppgi urealistiske tall.

Tabell 1.1: Presentasjon av utvalgte konkurrerende løsninger og aktører.

Produkt og figur	Beskrivelse	
<p>Urban Green Energy Inc VisionAIR5 UGE-3M 3.2kW</p>  <p>[20]</p>	<p>Produksjonsland: USA Pris: ca. 340 000 NOK Akse: Vertikal</p>	<p>Høyde: 5,2 m Bredde: 3,2 m Effekt (maks): 3,2kW Cut-in: 3,5 m/s Cut-out: 20 m/s</p> <p>Opprinnelig designet for å gi elektrisitet til en gjennomsnittlig amerikansk enebolig.</p>
<p>SD Wind Energy Cold Climate SD6 Turbines</p>  <p>[22]</p>	<p>Produksjonsland: Skottland Pris: - Akse: Horisontal Antall blader: 3</p>	<p>Høyde: 9m/15m/20m Diameter: 5.6m Effekt (nominell): 6kW Cut-in: 2,5 m/s Cut-out: Ingen</p> <p>Vindturbin bygget for tøffe værforhold. Tåler lave temperaturer og vindstyrker opptil 70m/s. Produserer strøm uansett hvor mye det blåser, bladene bøyer av i vinden ved sterk vind.</p>

Tabell 1.1: Fortsettelse.


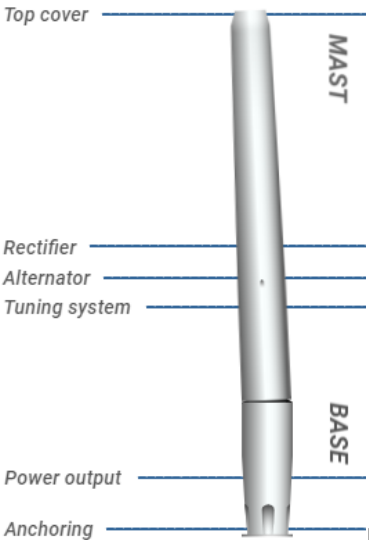
Produkt og figur	Beskrivelse
<p>Tesup Norge ATLAS2.0 Vindturbin</p>  <p>[23]</p>	<p>Produksjonsland: Europa Høyde: 1,2 m Pris: 9 590 NOK Bredde: 1 m (15 680 NOK med Effekt (nominell): 2kW inverter) Cut-in: 4 m/s Akse: Vertikal Maks vindhastighet: 50m/s Antall seil: 3</p> <p>Produsenten mener at vindturbinen har lav vibrasjon og lite støy. På deres nettsider er turbinen illustrert på boligtak.</p>
<p>Tesup Norge Magnum 5 Vindturbin</p>  <p>[24]</p>	<p>Produksjonsland: Europa Høyde: - Pris: 10 740 NOK Dybde: 0,4 m (17 660 NOK med Diameter: 2,25 m inverter og festestang) Effekt (nominell): 5kW Akse: Horisontal Cut-in: 3 m/s Antall blader: 3 Cut-out: -</p> <p>Produsenten mener at vindturbinen har lav vibrasjon og lite støy. På deres nettsider er turbinen illustrert på boligtak med et lite tårn.</p>
<p>Halo Energy Halo 6kW</p>  <p>[25]</p>	<p>Produksjonsland: USA Rotordiameter: 2,4 m Pris: - Skjerm diameter: 3,7 m Akse: Horisontal Effekt (nominell) 6,0 kW Antall blader: 3 Cut-in: 2.5 m/s Høyde: Monteres på tele- Cut-out: - mast eller liknende Maks vindhastighet: 60 m/s</p> <p>Designet spesielt for å produsere energi for tele- og kommunikasjonsinstallasjoner. Produsenten påstår at dette er den mest effektive mikrovindturbinen, og at den produserer dobbelt så mye energi som de konvensjonelle åpne bladturbinene av samme størrelse. Det er et dobbelt hylster rundt propellen formet som en hul kjeglestubb som komprimerer luftstrømmen for økt akselerasjon.</p>

Fra litteratursøket rundt eksisterende og konkurrerende løsninger ble det tydelig at det finnes en rekke løsninger på markedet. Stort sett alle vindturbinene som kom frem fra søkene, og alle de som er presentert i tabell 1.1 er produsert i utlandet.


De som hadde størst effekt i forhold til størrelse var de horisontalakslede vindturbinene (HAWT). Denne typen vindturbin var også den som ble brukt på vindutsatte områder og hadde løsninger som myke vingebled og pitching (rotering av turbinblad) for å håndtere kraftig vind.

Videre er det nyttig å se på andre teknologiske løsninger innenfor vindkraftindustrien som ikke er i direkte markeds konkurranse med konseptet, men som er nyttig å kartlegge som inspirasjon for teknologiske løsninger.

Tabell 1.2: Presentasjon av utvalgte alternative teknologiske løsninger for vindkraftverk.

Konsept og Figur	Beskrivelse
<p>Vestas og DTU Multiturbin konseptmølle.</p>  <p>[26]</p>	<p>Fra 2016 til 2018 ble det gjennomført en test av en multirotor vindturbin, produsert av Vestas i samarbeid med Danmarks Tekniske Universitet (DTU) i Risø. Multiturbin-konstruksjonen hadde fire rotorer med diameter på 29m. Total effekt fra fire rotorer var 900 kW og konstruksjonen var 75 meter høy [27].</p> <p>Motivet for konseptet var å nedskalere rotorstørrelse for å redusere materialbruk og produksjonskostnader uten å tape effekt sammenliknet med én kjemperotor. Nedskaleringen forenkler også logistikk-utfordringer knyttet til kjempevindturbinene.</p> <p>Funnene etter forsøket viste en kraftforsterkning på 1,5% grunnet interaksjonen mellom rotorene.</p>
<p>Vortex Bladeless</p>  <p>[28]</p>	<p>En virvelindusert vibrasjonsresonant vindgenerator formet som en sylinder uten roterende blader. Den utnytter vindenergi fra vortisitetsfenomenet kalt «Vortex Shedding», som er en oscillerende strøm som oppstår når luften strømmer forbi konstruksjonen og er avhengig av formen og størrelsen på konstruksjonen, samt vindhastigheten. Sylindere er stiv og har evne til å vibrere i forhold til forankringen i bunn. Deretter genereres strøm i et dynamosystem.</p> <p>Modell høyde: 2.75 m Effekt (nominell): 100W</p>

Tabell 1.2: Fortsettelse

Konsept og Figur	Beskrivelse
<p>Pikasola Wind Turbine 200W</p>  <p>[29]</p>	<p>Liten og svært enkel vindturbin som er vertikalakslet og har 5 blader. Vindturbinen har en maks effekt på 220W og nominell effekt er 200W (12V). Den er svært enkel å montere og koster 2 368 NOK (4 611 inkl. frakt).</p> <p>Høyde (blader): 59,4 cm Diameter: 90,2 cm Cut-in: 1.5 m/s Nominell vindhastighet: 11 m/s Maks vindhastighet: 45 m/s</p>

1.4.2 Markedsbehov

Flere og flere ønsker å kutte strømpriser ved å heller produsere egen strøm ved hjelp av solceller og vindturbiner. Det finnes en lang rekke småskala vindturbiner, men de er nesten uten unntak produsert i utlandet. Ulempen med dette er at det ofte påløper høye fraktkostnader og at produktet ikke er tilpasset det norske klimaet. Innenfor landbruk kan egenprodusert strøm bidra til å kutte betydelige strømkostnader, da det gjerne er høyt strømforbruk i landbruksindustrien med oppvarming av store bygninger og fjøs, samt drift av store maskiner. Norge har mange hytter og hyttegrender som kun er bebodd i perioder. Hyttegrender og periodeboliger kan spare kostnader ved å produsere strøm lokalt ved hytten og ikke behøve å kople på et strømnettverk. Det kan også være nyttig med lokale energilagere og bufferlagring.

For å videre kartlegge markedsbehovet vurderes konseptene presentert i tabell 1.1 og 1.2, opp imot de tekniske løsningene med fordeler og ulemper.

Tabell 1.3: Analyse av konkurrerende løsninger, presentert med fordeler og ulemper i forhold til design og tekniske løsninger.

Løsning	Fordeler	Ulemper
<p>Urban Green Energy Inc VisionAIR5 UGE-3M 3.2kW</p>	<p>Krever forholdsvis liten plass, spesielt i bredden. Gjør lite ut av seg i forhold til design og arkitektur.</p>	<p>Lite effektiv i forhold til størrelse og kostnad. Påløper også kostnader for frakt og montering som øker prisen ytterligere.</p>
<p>SD Wind Energy Cold Climate SD6 Turbines</p>	<p>Godt tilpasset kaldt og ekstremt klima. Fint design som er nøytralt og gjør lite ut av seg. Ser solid ut. Kan bestilles i ulike høyder for å tilpasse omgivelsene og vindforholdene. Lav cut-in vindhastighet.</p>	<p>Prisen oppgis ved etterspørsel, men grunnet den solide konstruksjonen og hvor produktet er tenkt å stå, så kan det antas at investeringskostnaden er høy.</p>

Tabell 1.3: Fortsettelse

Løsning	Fordeler	Ulemper
Tesup Norge ATLAS2.0 Vindturbin	Liten av størrelse, og relativt lav investeringskostnad.	Høy cut-in vindhastighet, og liten effekt. Produktet er tenkt for å stå på tak, noe som kan være vanskelig å få til i kombinasjon med gode vindforhold.
Tesup Norge Magnum 5 Vindturbin	Høy effekt i forhold til størrelse med relativt lav investeringskostnad.	Vindturbinen kommer med et lite tårn, som tilsier at den må stå i et annet tårn eller på et tak for å stå uforstyrret og ikke komme i kontakt med mennesker eller dyr på bakken.
Halo Energy Halo 6kW	Sylinder rundt propellen som akselererer luftstrømmen, og gjør den ifølge produsenten til den mest effektive turbinen av denne størrelsen. Den skal være designet for lavkostproduksjon.	Kommer kun med system for montering på telekom. mast/tårn, og ikke eget tårn. Krever mer materiale sammenliknet med åpne bladpropeller.
Vestas og DTU Multiturbin konseptmølle.	Positivt med kraftforsterkning på 1,5% grunnet interaksjonen mellom rotorene som skapte turbulens. Forenkler produksjon og frakt ved å kreve mindre størrelse på propeller og blader.	Krever mer komplisert tårn med flere armer, som mulig øker produksjon- og material- og monteringskostnader. Flere ledd som krever vedlikehold og service. Lite estetisk, det kan se litt «rotete» ut i arkitekturen, og ta mye plass.
Vortex Bladeless	Miljøvennlig da den ikke krever olje i bevegelige ledd eller roterende komponenter. Sannsynlig skånsom mot dyreliv.	Lite utprøvd teknologi og lav effektivitet i forhold til materialmengde og størrelse.
Pikasola Wind Turbine 200W	Lav investeringskostnad.	Lite effektiv og høy nominell vindhastighet. Umoderne design.

Oppsummert viser litteratursøkene og de løsningene som trekkes frem i tabell 1.1 og 1.2 at det finnes mange ulike konsepter og tekniske løsninger innenfor vindkraftindustri. De fleste småskala vindturbinene, og de som er mest effektive, viser seg å være HAWT, der de fleste har tre propellblad. Halo Energy sin turbin, Halo 6W skiller seg ut fra mengden med hylsteret rundt propellen som komprimerer, og dermed akselererer luftstrømmen mot propellen. Hvordan dette hylsteret rundt propellen påvirker effektiviteten, miljø, fugler og akustiske forhold er usikkert. Det kan hende den vil fungere beskyttende ved at fuglene holder seg unna den, på den andre siden kan det hende at den har motsatt effekt ved at fuglene trekkes inn i propellen av vindakselerasjonen.

Videre er SD Wind Energy sin Cold Climate turbin tilpasset ekstreme klimaer, noe som er nyttig i Norge i forhold til både temperaturer, nedbør, frost og sterke vinder (spesielt ved kysten). Denne turbinen

har ikke noen cut-out vindhastighet, og tåler kraftig vind, da propellbladene bøyer seg etter vinden og har en kraftig konstruksjon.

Multiturbinsprosjektet til Vestas sammen med DTU viste seg å gi en effektøkning på 1.5 % grunnet interaksjonen mellom propellene. I storskala vindmølleindustri kan denne prosenten ha mye og si, samt store fordeler med størrelsesreduksjonen i propellbladene. Innenfor småskala vindindustri er ikke størrelse på propeller en like krevende og kostbar faktor. Effektøkning på 1.5% er også lite når det er snakk om småskala produksjon for boliger og privatkunder.

1.5 Oppdragsbeskrivelse

Dette mastergradsarbeidet tar for seg et produktutviklingsoppdrag som er gitt som en fri RealTek-oppgave ved NMBU. Oppdraget går ut på å utrede og utvikle, grovdimensjonere og designe en konseptuell småskala vindturbin. For å sikre kvalitet og god progresjon i utviklingsprosessen skal det benyttes moderne produktutviklingsmetoder samt ingeniørfaglige kunnskaper i arbeidet. Hele prosessen dokumenteres i denne rapporten som videre presenteres muntlig i en presentasjon i januar 2022.

Grunnlaget for oppgaven ligger i å finne et lokalt alternativ til de store vindturbinparkene med bakgrunn i de globale klimautfordringene. Masterarbeidet fokuseres derfor på å utrede muligheter og teknologiske løsninger innen mikrovindturbiner, videre undersøke hvordan de effektivt kan implementeres i samfunnet og produsere elektrisk strøm mer lokalt og distribuert enn de store vindturbinparkene. Gjennom å produsere elektrisitet i mindre skala og mer lokalt i nærheten av forbrukeren kan strømproduksjonen bli mer fleksibelt, naturvennlig, og redusere tap av energi i strømmettet. Videre vil arbeidet dreie seg om å utvikle en konseptuell løsning som er mest mulig fleksibel, miljøvennlig og kostnadsgunstig.

Produktet skal legge stor vekt på kostnadseffektivitet, brukervennlighet, estetikk og miljø- og naturvennlighet. Det eksisterer allerede et stort mangfold av ulike småskala vindturbiner på det internasjonale markedet, av den grunn er det viktig at produktet svarer godt til de nevnte kriteriene for å være konkurransedyktig i et allerede stort og voksende marked.

1.6 Problemstillinger og teknologiske flaskehals

I dette delkapittelet listes det opp punktvis elementer som vil være veiledende for produktutredningen og utviklingen.

1.6.1 Problemstillinger og fokuspunkter:

- Undersøke og kartlegge tekniske og konseptuelle løsninger som allerede eksisterer på markedet, samt markedsstatus og potensiale.
- Kartlegge markedsbehov og hvordan eksisterende løsninger kan videreutvikles.
- Utrede kriterier og krav til småskala vindkraft for å bevare sikkerhet, natur og miljø.
- Kartlegg det teoretiske og teknologiske grunnlag for konseptet.
- Vurdere ønskede egenskaper, funksjonsløsninger, størrelser, former og ønsket effekt for løsningen for at den skal være best mulig egnet formålet.
- Kartlegge funksjonsløsningene for vindturbinen og vurdere løsningene opp mot kriterier.
- Foreta grove grunnleggende beregninger og evt. simuleringer av vindturbinen/elementer.
- Utarbeide 3D-modell med tekniske anvisninger av den konseptuelle vindturbinen.

- Gjennomføre grov kartlegging av kostnadsestimater.
- Utarbeide en markedspresentasjon av den konseptuelle vindturbinen.

1.6.2 Teknologiske flaskehalsar og utfordringer:

- Det finnes allerede en rekke konkurrerende løsninger, også i lavkostland som Kina. Dette vil være utfordrende å konkurrere med økonomisk.
- Produktet bør være fleksibelt i forhold til plassering og montering. Dette innebærer at produktet bør kunne plasseres på varierte plasser, høyder og grunnforhold.
- Det er ønskelig å benytte modularisering og standardkomponenter og profiler.
- Vindturbiner skaper akustisk støy som kan være sjenerende for kunden.
- Vindturbinen bør være i mest mulig riktig størrelse og effekt for å være økonomisk gunstig og treffe en størst mulig brukermasse.
- Vindturbinen skal være minst mulig sjenerende for mennesker og natur i omgivelsene rundt der den vil bli oppført
- Sentralisering og plassmangel gjør at folk bor tettere og i høyden. Høye bygninger som står tett med andre begrenser plassering av vindmøller.

2 PROSJEKTPLANLEGGING

Hensikten med prosjektplanleggingen er å kartlegge og planlegge hvilke oppgaver og arbeidstrinn som skal gjennomføres innenfor en gitt tid. En grundig planlegging legger samtidig til rette for å forme en realistisk og fornuftig vurdering og avgjørelse av hvilke begrensninger som skal settes for prosjektarbeidet [30].

2.1 Prosjektmål

Prosjektmålene defineres tidlig i prosjektarbeidet for å sette en konkret kurs for prosjektet. Dette bidrar til et målrettet forarbeid, likeledes et målrettet arbeid i de senere prosjektfasene. Ut ifra hovedmålet for oppgaven og arbeidsfasene i prosjektet formuleres en rekke delmål. Disse delmålene gir oversikt og klarhet for progresjonen i arbeidet, slik at tidsrammen og ressursbruken er realistisk og overholdes.

2.1.1 Hovedmål

Hovedmålet for prosjektet er følgende:

«Å utrede, utvikle, grovdimensjonere og designe et modulært småskala vindturbinkonsept som kan gi miljømessige fordeler, er fleksibelt og best mulig tilpasset dets formål. Alle trinn i utrednings og utviklingsarbeidet skal dokumenteres i rapportform, med tilhørende tekniske og økonomiske vurderinger, samt resultatvisualiseringer og anvisninger».

2.1.2 Delmål

Følgende delmål inngår i arbeidet for å oppfylle hovedmålsetningen for prosjektet. Delmålene listes opp i kronologisk rekkefølge og legger grunnlag for prosjektarbeidets milepæler:

1. Utrede bakgrunn, klarlegge rammer med oppdragsbeskrivelse og problemstillinger for konseptet.
2. Gjennomføre prosjektplanlegging med milepæler og avgrensninger, samt klarlegge metodisk tilnærming til prosjektarbeidet.
3. Redegjøre for det teoretiske og tekniske grunnlaget i prosjektet, samt etablere produktspesifisering med funksjonsanalyse.
4. Gjennomføre konseptgenerering og videre egenscreening og valg, med påfølgende eksperttesting på funksjons- og løsningsalternativene.
5. Utføre grove grunnlagsberedninger, FEM-analyser, simuleringer og ferdigstille 3D-modell med tekniske anvisninger.
6. Redegjøre for produksjonsmetoder og gjennomføre grove kostnadsestimater.
7. Ferdigstille rapport med prosessevaluering og konklusjon for rapporten.

2.2 Tids- og arbeidsplan med milepæler

For å illustrere tidsplanen for prosjektarbeidet legges de overnevnte delmålene M1 – M7 inn i et Gantt-skjema, se tabell 2.1. Start og sluttdatoer presenteres innenfor måneder, med tilpassede antall arbeidsuker innenfor hver måned. Delmålene oppstykket i mindre arbeidsaktiviteter for å grundigere kartlegge arbeidstrinnene i prosessen. Videre settes milepæler med utført dato i påfølgende tabell 2.2.

Tabell 2.1: Tids- og arbeidsplan med prosesstrinn og tidsperspektiv, milepeler er indikert med grønne trekkanter (▲).

Delmål og aktivitet	Aug	September	Oktober	November	Desember	Jan
Delmål 1						
Bakgrunn og historisk perspektiv	■					
Oppdragsbeskrivelse		■				
Problemstillinger og flaskehals		■	▲			
Delmål 2						
Prosjektplan og målsetting		■				
Metodikk og kvalitetssikring			■			
Prosesstrinn			■	▲		
Delmål 3						
Teoretisk og teknisk grunnlag		■				
Krav og regelverk			■			
Produktspesifisering			■			
Funksjonsanalyse			■	▲		
Delmål 4						
Konseptgenerering			■			
Egenscreening og konseptvalg				■		
Eksperttesting				■	▲	
Delmål 5						
Grunnlagsberegninger				■	■	
FEM-analyser og simulering				■	■	
3D-modellering m. tekniske anv.				■	■	▲
Delmål 6						
Produksjonsmetoder					■	
Kostnadsestimater					■	▲
Delmål 7						
Markedspresentasjon					■	
Prosessevaluering og konklusjon				■	■	
Ferdigstilling og korrektur					■	
Levering						■
Presentasjon						■

Tabell 2.2: Milepæler for arbeidet med dato for planlagt utført.

Milepæl (▲)	Dato
Bakgrunn og rammer for prosjektet, samt oppdragsbeskrivelse med problemstillinger for konseptet er kartlagt.	21.09.2021
Prosjektplanlegging med milepæler og avgrensninger, samt karlegging av metodisk tilnærming til prosjektarbeidet er utført.	09.10.2021

Tabell 2.2: Fortsettelse.

Milepæl (▲)	Dato
Teoretisk- og teknisk grunnlag er redegjort, og produktspesifisering med funksjonsanalyse er ferdigstilt.	21.10.2021
Konseptgenerering og egenscreening med valg, samt grunnlagsberegninger og påfølgende eksperttesting er gjennomført.	19.11.2021
Grunnleggende beregninger, FEM-analyser, simuleringer er gjennomført, samt 3D-modell med tekniske anvisninger er ferdigstilt.	12.12.2021
Produksjonsmetoder er kartlagt, og det er gjennomført kostnadsestimater.	14.12.2021
Rapport er ferdigstilt med prosessevaluering og konklusjon.	15.12.2021

3.3 Tidlige begrensninger for arbeidet

Tiden til rådighet tilsvarer brutto 750 – 900 timer fra august til midten av desember. Denne tidsrammen skal innebære alt prosjekterelatert arbeid, som prosjektplanlegging, møtevirksomhet og fremvisning av prosjektet. På bakgrunn av dette må det settes begrensninger for prosjektarbeidet. Dette gjøres for å passe på at arbeidsmengden er realistisk vurdert innenfor tidsrammen, samt å sørge for at kvaliteten på prosjektet blir så godt som mulig. Begrensningene for arbeidet er som følger:

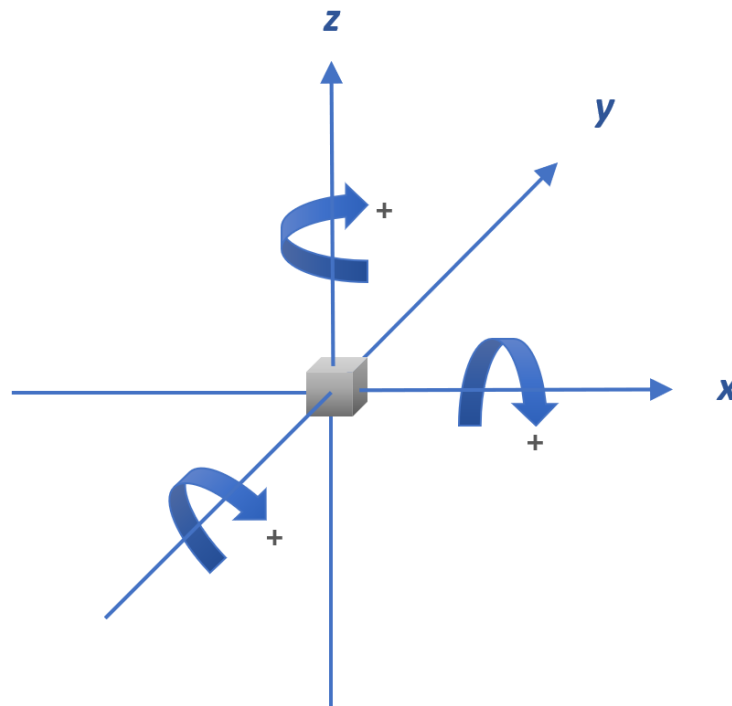
- Det vil ikke bli gjennomført vurderinger og analyser av økonomiske forhold knyttet til vindressurser, økonomisk grenselinje, eller nedbetalingstid av konseptet.
- Det kartlegges kun for grunnleggende teori rundt de aerodynamiske- og tekniske aspektene ved småskala vindkraft, og det vil kun bli gjort enkle betraktninger rundt sikkerhet, elektrisitet og strømhåndtering.
- Det vil kun bli gjort grove beregninger av forhold og belastninger på enkeltelementer som anses som viktigst for å grovdimensjonere vindturbin-konseptet.
- Det vil ikke bli gjennomført utredning eller beregninger av dynamiske forhold som svingninger, vibrasjoner og utmatting i konstruksjonen. Dette vil kun bli inkludert i forbindelse med sikkerhetsfaktorer.
- Det vil ikke bli gjort rede for eller beregnet detaljkonstruksjon knyttet til montering av komponenter, og heller ikke for små delelementer som skrue- og boltforbindelser eller sveiseforbindelser.
- Det vil ikke bli kartlagt for systemer- eller gjennomført treghtetsberegninger knyttet til oppstart- og bremsekrefter.
- Det vil ikke bli utredet eller utviklet systemer for retningsorientering av vindturbinen eller rotasjon av turbinblader.
- Strømningsanalyser vil måtte være orienterende og sterkt forenklet.
- Det vil kun bli undersøkt og tatt utgangspunkt i eksisterende elektroniske komponenter som tilsvarer de forhold som kreves i produktet, for å kartlegge dimensjoner slik at den konseptuelle vindturbinen med komponenter har realistiske metriske størrelser.
- Det vil ikke bli gjort rede for strømhåndteringen etter generatoren.
- Det skal ikke bli konstruert en fysisk skala-prototype, kun nødvendige tekniske anvisningsgrunnlag for videre arbeid. Det vil heller ikke bli utviklet kostnadsestimater på prototype.

3 METODE

Dette kapittelet redegjør for metodisk grunnlag i tilknytning til produktutviklingsarbeidet og fungerer som en verktøykasse for ulike trinn av prosjektarbeidet og rapporteringen. Det blir gjort rede for relevant terminologi og beregningsverktøy, utviklings og analysemetodikk samt kvalitetssikring.

3.1 Terminologi, symboler og formler

I denne delen blir det gjort rede for koordinatsystem for orientering, begrepsforklaringer, symboler og formler som er relevant og blir tatt i bruk i prosjektarbeidet. Figur 3.1 viser koordinatsystemet med illustrasjon av positiv romretning på akser og rotasjonsbevegelse som vil måtte benyttes ved orientering og beregninger av metriske størrelser knyttet til utredning og utvikling av vindturbin-konseptet. Positiv rotasjonsretning defineres etter høyrehåndsregelen (dvs. med urviseren).

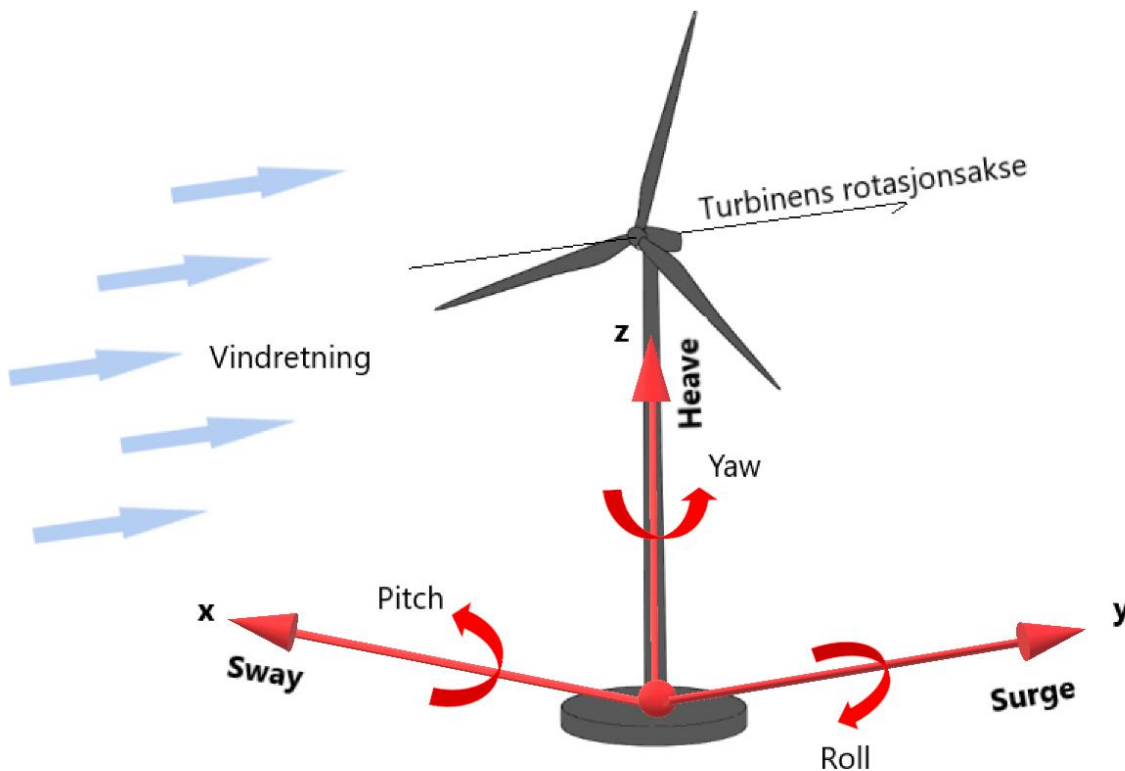


Figur 3.1: Illustrasjon av koordinatsystem med x, y og z akse med positiv akse- og rotasjonsretning.

Tabell 3.1: Beskrivelse av rotasjons og svingnings-begreper i forhold til koordinatsystemet.

Globalt system	x-akse	y-akse	z-akse
Rotasjon	Pitch	Roll	Yaw
Aksebevegelse	Sway	Surge	Heave

For å få et visuelt inntrykk av koplingen mellom koordinatbegrepene og vindturbinen er det i figur 3.2 illustrert en vindturbin, der det er inkludert et koordinatsystem og begreper. Nullpunktet i koordinatsystemet er i senter av tårnet, på bakkenivå. Rotasjonsbevegelsen pitch skjer rundt vingbladenes lengdeakse, og rotasjonsaksen vil i praksis variere etter posisjonen til vingen, men ligger alltid i x-z planet.



Figur 3.2: Visualisering av vindturbin med koordinatsystem og retningsdefinisjoner.

3.1.1 Terminologi

I tabell 3.2 listes de begrepene som benyttes i rapporten opp med tilhørende begrepsforklaring.

Tabell 3.2: Oversikt over terminologi i rapporten, med begrepsforklaringer.

Begrep	Forklaring
Vindturbin	Maskin som omdanner vindenergi til elektrisitet
Vindmølle	Mekanisk innretning som omdanner vindenergi til rotasjonsenergi
Multirotor vindturbin	Vindturbin med flere enn én rotor
VAWT	Vertikalakslet vindturbin
HAWT	Horisontalakslet vindturbin
Cut-in vindhastighet	Minimums vindhastighet for drift av vindturbin, når bladene starter å rotere og generere elektrisitet
Cut-out vindhastighet	Maksimum vindhastighet for drift av vindturbin
Nominell vindhastighet	Teoretisk eller satt verdi for vindhastighet
Nominell effekt	Teoretisk eller satt verdi for elektrisk effekt
Pitch	Rotasjon av turbinblad om bladets lengdeakse
Roll	Rotasjon av turbinen som driver generatoren
Yaw	Rotasjon om tårnets lengdeakse
Surge	Aksebevegelsen som går med vindretningen.
Sway	Aksebevegelsen som går vinkelrett på vindretningen horisontalt.

Tabell 3.2 Fortsettelse.

Begrep	Forklaring
Heave	Aksebevegelsen som går i tårnets lengdeakse
SI	Det internasjonale systemet for enheter
Sveipeareal	Arealet som turbinbladene dekker når de roterer
Rotordiameter	Diameteren til arealet som turbinbladene dekker når de roterer
FEM	Finite Element Method
CAD	Computer-aided design
DAK	Dataassistert konstruksjon
Thrust	Aerodynamisk skyvekraft
Nacelle	Konstruksjon som beskytter mekaniske og elektroniske elementer vanligvis bak, foran eller under vindturbinen.
Hub	Del for innfesting av turbinblader til propellen
Nesekjegle	Konstruksjon rundt navet til propellene, leder vinden mot bladene
Tårn	Konstruksjon som propell og nacelle står på
Turbinblad	Delelementet som fanger vinden
Fundament	Konstruksjon som forankrer tårnet til bakken og støtter det opp

3.1.2 Symboler og enheter

Tabell 3.3: Tabelloversikt over symboler som benyttes til teoriutredning og beregninger i rapporten.

Symbol	Beskrivelse	Enhet (SI)
m	Masse	kg
v	Hastighet (vindhastighet)	m/s
ω	Rotasjonshastighet (vinkelhastighet)	Rad/sek
n	Turtall	rpm
A	Areal	m ²
P	Effekt	W = J/s
ρ	Densitet	kg/m ³
E	Energi (mekanisk)	J
t	Tid	s
h	Høyde	m
l	Lengde	m
F	Kraft	N
V	Vindkraft	N
p	Trykk	Pa
f	Frekvens	Hz = s ⁻¹
μ	friksjonskoeffisient	-
r	radius	m
D	Rotordiameter	m
A_s	Sveipeareal	m ²
E_p	Potensiell energi	J
E_{el}	Elektrisk energi	J (kWh)

Tabell 3.3: Fortsettelse.

Symbol	Beskrivelse	Enhet (SI)
E_k	Kinetisk energi (bevegelsesenergi)	J
g	Tyngdeakselerasjon i gravitasjonsfeltet	m/s^2
σ	Spenning	MPa
v_1	Vindhastighet før vindturbin	m/s
v_2	Vindhastighet etter vindturbin	m/s
A_1	Vindstrømmens areal før vindturbin	m^2
A_2	Vindstrømmens areal etter vindturbin	m^2
P_1	Effektinnhold i luften før vindturbin	W
P_2	Effektinnhold i luften etter vindturbin	W
P_{el}	Elektrisk effekt	W
\dot{m}	Massestrøm	kg/s
C_p	Aerodynamisk virkningsgrad	-
η_{tot}	Total virkningsgrad	-
η_{gir}	Virkningsgrad i gir	-
η_{gen}	Virkningsgrad i generator	-
η_{inv}	Virkningsgrad i inverter	-
ρ_{luft}	Massetettheten i luft	kg/m^3
λ	TSR (Tip speed ratio)	-
F_D	Dragkraft	N
F_L	Løftkraft	N
C_D	Dragkoeffisient	-
C_L	Løftkoeffisient	-
M	Moment	Nm
M_T	Torsjonsmoment (dreiemoment)	Nm
F_1	Kraft fra egenvekten til propellen	N
F_2	Kraft fra egenvekten til nacelle m. innhold	N
V_1	Vindkraft på propell	N
V_2	Vindkraft på tårn	N
H	Høyde fra rotorsenter til bakkenivå	m
h	2/3 av H	m
I_p	Polart arealmoment	mm^4
$A_{propell}$	Projisert areal av turbinblader og hub	m^2
$A_{tårn}$	Projisert areal av tårn	m^2
A_{blad}	Projisert areal av ett blad	m^2
A_{3xblad}	Projisert areal av tre blader	m^2
σ_b	Bøyespennning	MPa
τ	Skjærspennning	MPa
σ_{jf}	Jevnførende spennning	MPa
η	Sikkerhetsfaktor	-
$\sigma_{b,till}$	Tillatt bøyespennning	MPa

3.1.3 Hovedformler

Tabell 3.4: Oversikt over hovedformler som benyttes i rapporten som underlag for beregninger og terminologi. Utdypninger/utledninger vil bli nærmere definert under de relevante kapitlene.

Betydning	Formel	Indeks
Kinetisk energi	$E_k = \frac{1}{2} m v^2$	(1)
Trykk, generelt	$p = F/A$	(2)
Bernoullis likning	$p + \rho g h + \frac{1}{2} \rho v^2 = K$	(3)
Effekt i en vindstrøm	$P_1 = \frac{1}{2} \rho A v^3$	(4)
Aerodynamisk effekt	$P = \frac{1}{2} \rho A_s v^3 C_p$	(5)
Dragkraft på turbinblad	$F_D = \frac{1}{2} C_D A \rho v^2$	(6)
Løftkraft på turbinblad	$F_L = \frac{1}{2} C_L A \rho v^2$	(7)
Total virkningsgrad	$Total\ virkningsgrad = \eta_{tot} = \frac{P_{ut}}{P_{inn}} = \frac{P_{el}}{P_1}$	(8)
Aerodynamisk virkningsgrad	$C_p = \frac{2P}{\rho A_s v^3}$	(9)
Moment	$M = F \cdot l$	(10)
Bøyespenning	$\sigma_b = \frac{M}{I} y$	(11)
Annet arealmoment (rør)	$I = \frac{\pi}{64} (d_y^4 - d_i^4)$	(12)
Jevnføringsspenning	$\sigma_{jf} = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - \sigma_x \sigma_y + 3\tau_{xy}^2}$	(13)
Turtall	$n = \frac{30 \omega}{\pi}$	(14)
Effekt på aksel	$P = \frac{M_T \pi n}{30}$	(15)
Skjærspenning	$\tau = \frac{M_T}{I_p} r$	(16)
Polart annet arealmoment	$I_p = \frac{\pi}{32} d^4$	(17)

3.2 Utviklingsmetodikk

I denne delen presenteres relevante produktutviklingsmetodikker for prosjektarbeidet. Følgende metodikker bidrar til kvalitet og flyt i utviklingsarbeidet, samt systematisering av prosesser og tankegang.

Integrated Product Development (IPD) [31]:

IPD er en produktutviklingsmetode som baserer seg på å sette søkelys på blant annet essensielle produktegenskaper, markedsbehov og konkurransedyktighet helt fra starten av utviklingsprosessen. I tillegg til å bidra til at prosessen siktes mot et hovedmål, vil denne metoden bidra til å begrense produktutviklingskostnader gjennom å tidlig spesifisere utviklingen og dermed redusere tidsaspektet. Sentrale elementer er data og kommunikasjonsflyt mellom de ulike prosessene og avdelinger, som bidrar til samspill og effektivitet. I NMBU sammenheng fokuseres det på utviklingsprosess, produksjonsprosess, økonomi og HMS.

IPD består av følgende hovedelementer [32]:

1. Kartlegging av kundens behov og markedets krav.
2. Planlegging og styring av produktutviklingsprosessen.
3. Bruk av produktutviklingsgrupper og teamarbeid.
4. Integrasjon av prosessdesign.
5. Styring av prosjektkostnadene (ressurser) fra starten.
6. Involvering av leverandører og underleverandører tidlig i prosessen
7. Utvikling av robuste design.
8. Integrering av CAE, CAD, CAM og relevante dataverktøy i utviklingsprosessen.
9. Datasimulering av produktets egenskaper og framstillingsprosessen
10. Generering av en mest mulig effektiv tilnærming til utviklingsarbeidet
11. Kontinuerlig forbedring av utviklingsprosessene.

Videre presenteres det i tabell 3.5 hvordan de ulike prinsippene blir anvendt i prosjektarbeidet og hvor i rapporten.

Tabell 3.5: IPD prinsipper og anvendelse i prosjektarbeidet, med henvisning til område i rapporten.

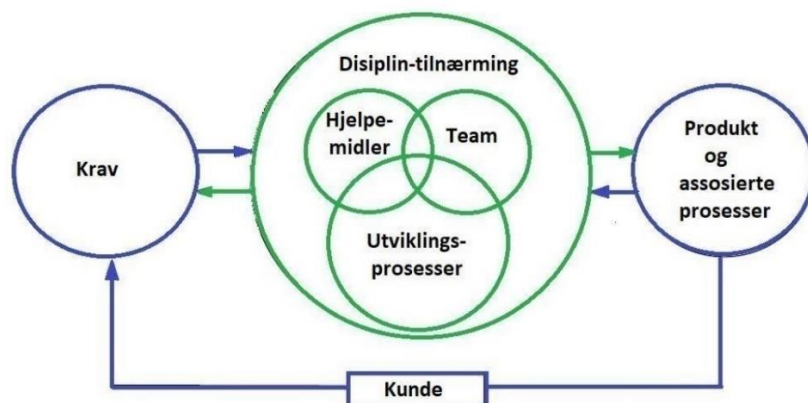
Hoved- element	Anvendelse
1.	I kapittel 1 vil det bli utredet for eksisterende løsninger og markedsbehov. Det utredes for viktige produktegenskaper og hvilke krav det stilles til produktet og prosessen fra en tidlig fase.
2	I kapittel 2 vil det bli utarbeidet en prosjektplan med utgangspunkt i prosjektmålene, samt at det vil bli kartlagt tids- og ressursrammer for arbeidet.
	kapittel 3 kartlegges prosessstrinnene, med oversikt over progresjonen i arbeidet, inkludert tilbakevendinger i prosessen for forbedringer.
3	Det vil igjennom hele prosjektet være en jevnlig kommunikasjon med veileder. Det vil også mot slutten av utviklingsfasen bli gjennomført eksperttesting med rådføring og input fra eksperter mot slutten av utviklingsfasen.

Tabell 3.5: Fortsettelse:

Hoved-element	Anvendelse
4	Det vil fra et tidlig tidspunkt i prosessen bli tatt hensyn til faktorer som kan påvirke produktdesign, som blant annet kostnader, miljø, produktkrav og materialer.
5	Gjennom tidlig prosjektplanlegging vil det bli kartlagt ressurser og prosesser fra starten av prosjektarbeidet.
7	For å oppnå et robust design vil det i kapittel 8 bli gjennomført grunnlagsberegninger, FEM-analyser og simuleringer. Det vil også bli gjort valg av materialer og løsninger med et mål om lang levetid og et robust produkt.
8	På grunn av koronavirus-pandemien under planlegging og gjennomføring av dette masterarbeidet vil det bli benyttet verktøy som Teams/Zoom i kommunikasjon med veileder og eksperter. I tillegg vil det bli benyttet en rekke dataprogrammer i utviklingsprosessen for å bidra til å forbedre og effektivisere arbeidet. Dataverktøyene spesifiseres i tabell 3.6.
9	Det vil bli gjort FEM-analyser og flow-simuleringer av enkeltelementer i produktet i SolidWorks.
10	Det vil bli utarbeidet et prosessdiagram som vil fungere som en kontinuerlig pekepinn gjennom hele prosjektet, på hvor i prosessen en er og sørge for at prosessene knyttes sammen i arbeidet for naturlig progresjon og helhet i arbeidet.
11	Det vil bli siktet mot å aktivt bruke prosessdiagrammet igjennom hele prosjektet, dermed vil det bli fokusert på å gå frem og tilbake mellom prosesstrinnene for å gjøre forbedringer og endringer på bakgrunn av ny informasjon og kunnskaper som etableres igjennom prosjektets løp.

Integrated Product and Process Development (IPPD) [33]:

IPPD er en videreutvikling av IPD, der det vektlegges mer produktassosierte prosesser med markedet og kunden i fokus. Metodikken inneholder kartlegging og forbedring av utviklingsmetoder, samt organisatorisk, administrativt og økonomisk prosesstenking. Metodikken er i liten grad anvendt i denne rapporten, men i forbindelse med QFD og prosesstrinn-diagrammet, og videre i prosessdrøftingen er det nyttig med innsikt i IPPD.



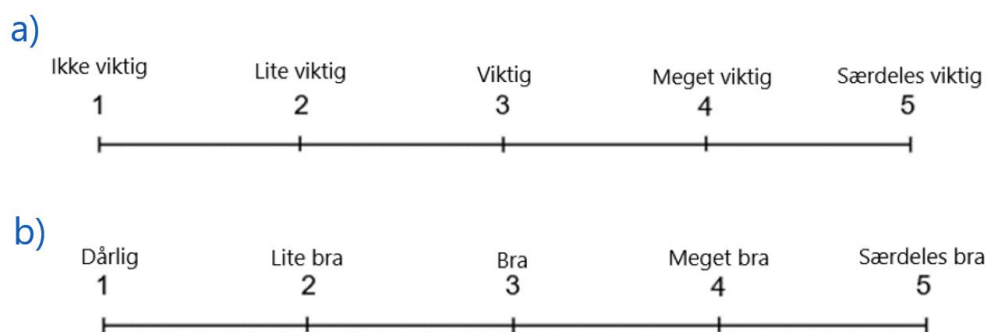
Figur 3.3: IPPD-figur som illustrerer IPPD tankegangen med produkt og kunde i fokus [33].

Pugh's Method [34]:

Pugh's metodikk eller «Total Design» er en metode som systematisk sammenlikner ulike løsningsalternativer og er en del av QFD-tankegangen (Se nedenfor). Løsningene blir målt på kriterier som baserer seg på viktige egenskaper produktet skal møte. Det er ulike måter å benytte seg av Pugh's metodikk på, men felles for dem er at de skal gjennom metoden peke ut den eller de løsningene som er best. Løsningene som sammenliknes kan være selve hoved-produktløsningen, men også enkelte elementer i produktet.

Det er tre grunnleggende prinsipper i utviklingsmetodikken: designkjernen, spesifisering og styrt konvergens. Designkjernen går ut på å kartlegge kundens behov og dermed utvikle spesifikasjoner, utvikle konsept og konseptdesign. Detaljdesign legger grunnlag for at konseptet/produktet kan produseres. Produktspesifisering tar utgangspunkt i kundebehovet, og i konseptvalget vurderes løsninger gjennom evalueringstrinnet, denne metoden kalles «Metoden for styrt konvergens». En stor del av denne metodebruken baserer seg på å bruke seleksjonsmatriser.

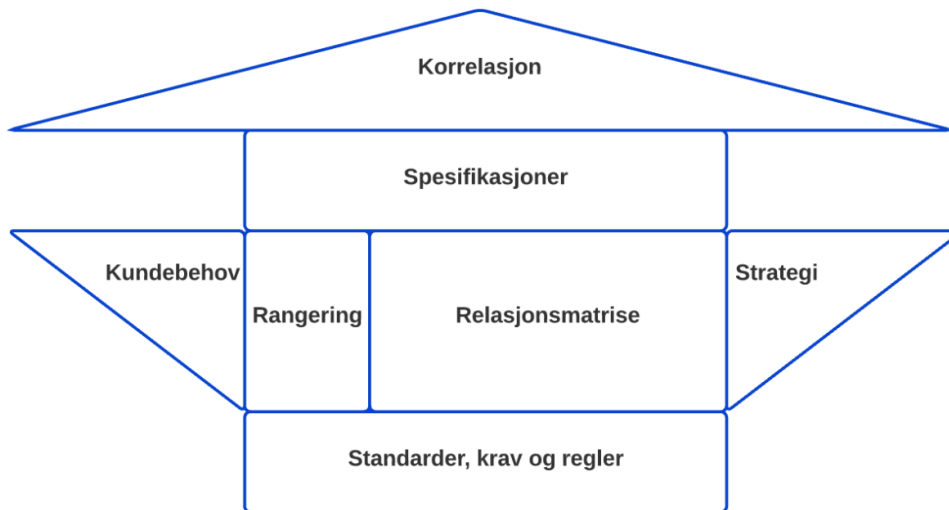
Seleksjonsmatriser for konseptscreeningen baserer seg på at Pugh kritiserte de mer kvantitative metodene, da han mente de kunne være misvisende og redusere fokuset på kreativitet i konseptutviklingen.



Figur 3.4: Skala for a) vektning av kriterier og b) for hvor godt en løsning eller et konsept svarer til kriterier.

House of Quality (HoQ) og Quality Function Deployment (QFD) [35][36]:

House of Quality er en metodikk som samler de øvrige metodikkene gjennom visualisering og synliggjøring. Metodikken er knyttet kvalitetsfilosofi som kalles QFD, der forkortelsen står for «Quality Function Deployment». House of Quality har fått navnet sitt fra den boligliknede matrisen som brukes i denne prosessen for vurderingen av ulike løsninger med implementering av kunde-/brukerbehov eller krav. Behovene tildeles vekt (Jfr. Pugh's metodikk ovenfor) og konseptene blir vurdert etter hvor godt de svarer til kravene/behovene. Det finnes flere ulike måter å sette sammen en House of Quality seleksjonsmatrise på, og et eksempel på dette illustreres i figur 3.4.



Figur 3.4: Illustrasjon av "House of quality" med de elementer som er relevante for arbeidet.

SCAMPER [37]:

SCAMPER er en kreativ metode utviklet av amerikaneren Alex Osborn for å komme opp med nye ideer for forbedringen av et produkt. SCAMPER står for følgende:

- **Substitute** (substitutt) – *Kan deler erstattes for å gi et bedre produkt eller løsning?*
- **Combine** (kombinere) – *Kan noe nytt komme ut av å kombinere eksisterende deler eller løsninger?*
- **Adapt** (adaptere) – *Hvordan kan produktet endres for å fylle et tomrom i markedet?*
- **Modify** (modifisere) – *Forbedring gjennom å endre utseende, følelse eller form på produktet?*
- **Put to another use** (sett til et annet bruk) – *Kan produktet eller løsningen være nyttig et annet sted eller nå en større målgruppe?*
- **Eliminate** (eliminere) – *Kan det være en idé å simplificere, ved å eliminere ideer eller elementer som ikke er av verdi for produktet?*
- **Reverse** (reversere) – *Kan det komme nye nyttig ut av å reversere eller reorganisere prosessen og se på det ut ifra den originale ideen?*

Funksjonsanalyse, modularisering og standardisering [38]:

Som et hjelpemiddel i produktutviklingen vil det bli kartlagt alternative løsninger i en funksjonsanalyse, der det avdekkes hva, hvorfor og hvordan løsningen skal svare til produktkravene. For å videre øke fleksibilitet og redusere kompleksiteten produktet vil det bli utforsket mulighetene for å benytte modularisering. Dette kan bidra med å organisere produktet, underbygge symmetri bidra til bruk av flere like elementer. I tillegg til modularisering vil det også bli sett på mulighetene for standardisering av komponentene i produktet, og dermed redusere produktets kompleksitet. Dette handler om å ta i bruk eksisterende deler for å forenkle produksjonen, vedlikehold og reparasjon.

3.3 Løsningsverktøy

I denne delen er datahjelpemidler og litteraturstudie listet opp i respektive tabeller med henvisninger til rapportdeler hvor verktøyene ble anvendt.

Programvarer og hjelpemidler

Tabell 3.6: Oversikt over programvarer og hjelpemidler benyttet i prosessen med henvisning til kapitler.

Verktøy	Anvendelse	Del av rapport
Microsoft Word 2016	Rapportskriving, tabeller og figurer	Hele
Microsoft Excel 2016	Tabeller, utregninger og grafer	Kap. 8 og 11
Teams og Zoom	Møtevirksomhet og veiledning	Hele
SolidWorks 2019	Modellering, tekniske tegninger, simuleringer og rendringer.	Kap. 11, 12, 14 og 15
Lucid	Tankekart og figurer	Kap. 3,4 og 6
GRANTA EduPack	Materialegenskaper, materialpriser og livsløpsanalyser	Kap. 14
Paint	Lage figurer	Kap. 1,2,3,4,6,7 og 8

Litteratursøk

Tabell 3.7: Oversikt over litteratursøk med søkemotor og søkeord.

Kapittel	Seksjon	Søke- motor	Søkeord
Innledning	1.1	Google	FN Klimarapport 2021, Vindturbin, Mikrovindturbin, Småskala vindturbin, makro vindturbin, store vindturbiner, small scale wind turbine, world's largest wind turbine, havvind, offshore wind power, tap i strømnnett, vindkraft, akustisk støy vindtubin, NVE strømpriser, strømpriser Norge 2021, NVE vannmagasiner
	1.2	Google	History of Windmills, The first wind turbine, James Blyth, Charles Brush, Poul la Cour, The modern windmill, moderne vindturbin, Vestas 15 MW, Vindkraft historie Norge, Jens J. Anderssen, Vindkraft I Norge
	1.3	Google	Småskala vindturbin, small scale wind turbine, micro wind turbine, mikro vindturbin definisjon, IEC 61400-2
	1.4	Google	Data small scale wind turbine, småskala vindkraft Norge, Enova el. Produksjon støtte,
	1.4.1	Google	Mikrovindturbin, småskala vindkraftverk, småskala vindmølle, vindturbin privatbolig, Windpower for homes, windpower new technology, multirotor
		Amazon	Small scale wind turbine/windmill, windmill 1→15kW,
Teori	4.1	Google	Vind, Vindmønster karakteristikk Norge, NVE vindmønster, Vindkart Norge,
	4.2		Aerodynamics, wind turbine
	4.3		HAWT, VAWT, Wind turbine systems, components, generator types
	4.5		Vindturbin krav og regelverk
	4.6		Acoustics wind turbine, akustikk vindturbin

3.5 Kvalitetssikring

I denne delen vil det bli utredet for de elementene som vil underbygge kvalitet i arbeidsprosessene og rapporteringen av prosjektet.

Rapport

For å sikre kvaliteten i utførelsen av gradsoppgaven foreligger det en rekke kvalitetssikringstiltak. Rapporten gjengir alle fasene i prosjektarbeidet og følger NMBU sin standard rapporteringsmetode; IMRAD-strukturen. IMRAD står for introduksjon, metode, resultat og diskusjon. All relevant teori som legger grunnlag for løsningsvalg, blir beskrevet i rapporten.

Alle figurer og tabeller er nummerert med første siffer som angir hovedkapittelet og er beskrevet med tilhørende figur- og tabelltekst. Alle figurer som ikke er referert til en kilde er egenkomponert. Fomler hentes fra anerkjent faglitteratur, hovedsakelig fra tekniske tabeller utgitt fra anerkjente forlag og forfattere eller fra personlig meddelelse av eksperter. Rapporten korrekturleses for å sikre et korrekt og godt språk, med tilhørende korrekte kildehenvisninger og referansesystemer. Referansestilen rapporten følger er det internasjonale IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) som bruker et numerisk system.

Kilder

Det etterstrebes bruk av kilder som er av god kvalitet, gjennom å holde en kontinuerlig kritisk tilnærming til kildene, samtidig foretrekkes faglitteratur fra anerkjente forlag og forfattere. For muntlige kilder søkes det råd hos veileder og andre ekspertpersoner. Undertegnede går god for at rapporten er en fullstendig dokumentasjon for mastergradsarbeidet.

Standarder og forskrifter

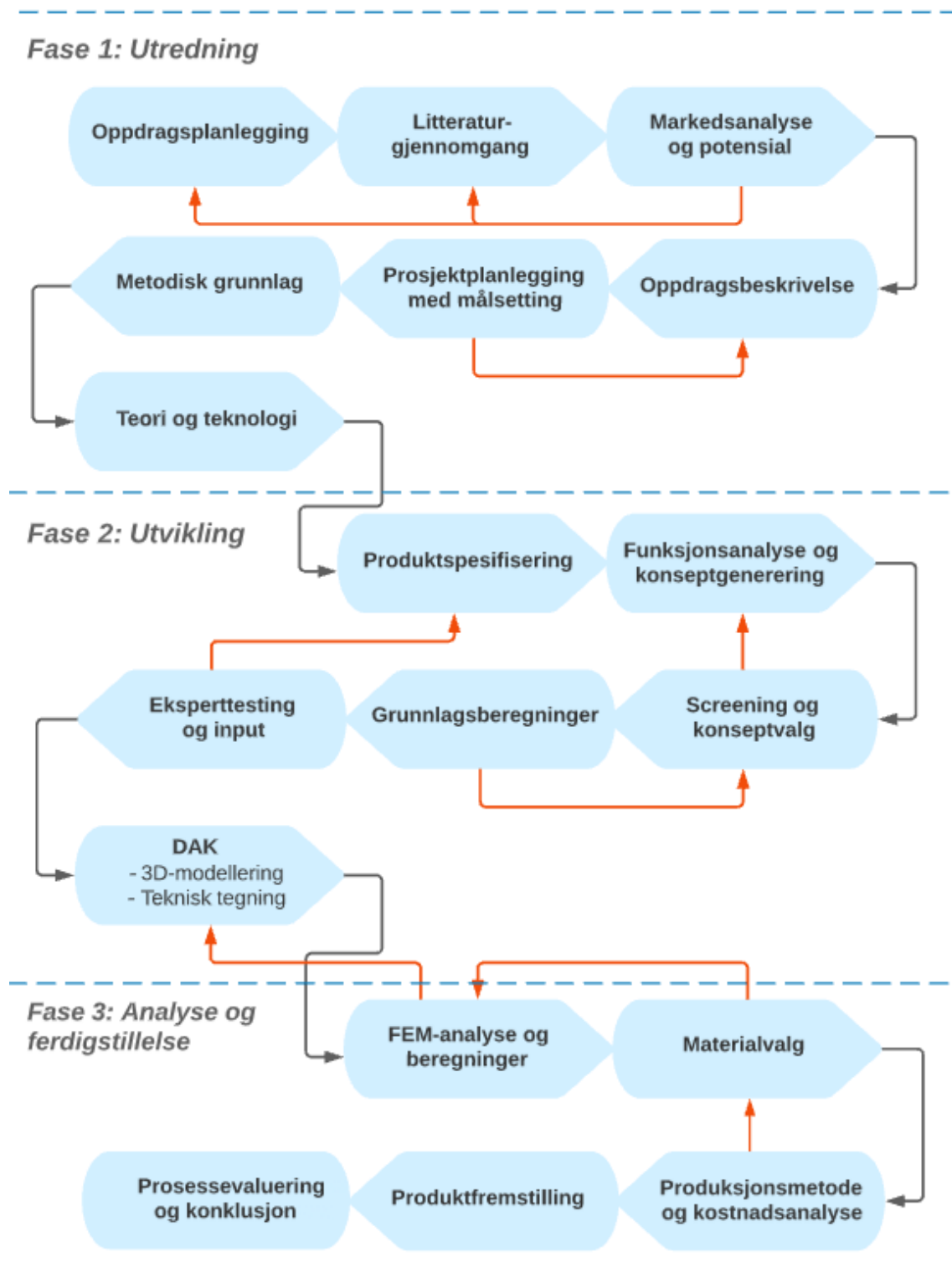
For å sikre kvaliteten i rapporten, blir mastergradsarbeidet utført på bakgrunn av relevante standarder og forskrifter, se tabell 3.8:

Tabell 3.8: Oversikt over relevante standarder, forskrifter og lover.

Standard	Beskrivelse
ISO-9000	Systemer for kvalitetsstyring – grunntrekk og terminologi
ISO-9001	Systemer for kvalitetsstyring - krav og prosedyrer; jfr. Kapittel 7 i 2000-versjon og Kapittel 8 i 2015-versjonen
ISO 128	Standard for tekniske teninger
Forskrift og lover	Beskrivelse
Forskrift om elektriske forsyningsanlegg FOR-2005-12-20-1626	Forskrift fastsatt av Direktoratet for samfunnssikkerhet og beredskap.
Energiloven LOV-1990-06-29-50	Lov om produksjon, omforming, overføring, omsetning, fordeling og bruk av energi m.m., av Olje- og Energidepartementet.

3.6 Prosesstrinn

Figur 3.5 illustrerer hele utviklingsprosessen i prosjektet. Denne kartleggelsen er en visuell oversikt som indikerer prosessstrinnene og i tillegg markerer sammenhengen mellom dem. Hensikten med dette er at man har oversikt over progresjonen i prosjektet, hvor en samtidig kan gå tilbake til tidligere aktiviteter for å gjøre eventuelle justeringer og forbedringer.



Figur 3.5: Skjematisk fremstilling av prosessstrinn i prosjektarbeidet (ISO9001-tankegang).

4 TEORI OG TEKNOLOGISK GRUNNLAG

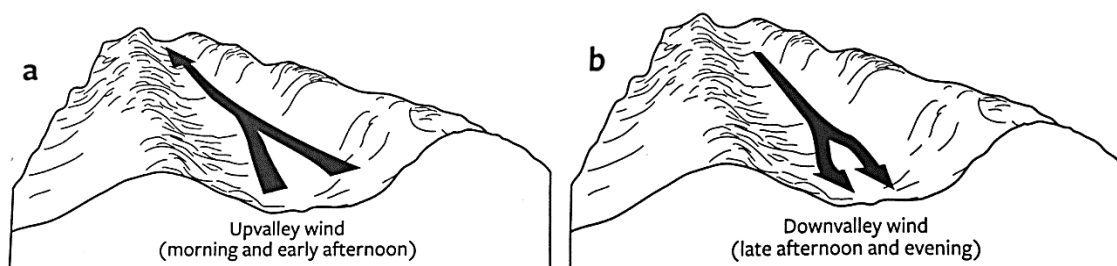
I dette kapitlet legges fysikkgrunnlaget for konseptet. Det utredes for teoretiske og tekniske prinsipper og eksisterende løsninger for vindkraft og vindturbiner. Dette gjøres for å kartlegge og innhente inspirasjon og teori for det videre utviklingsarbeidet.

4.1 Meteorologi og vindressurs

Vind er bevegelse av luft som oppstår av to hovedårsaker. Det ene er temperaturforskjellen i atmosfæren mellom ekvator og polene som et produkt av sola, og den andre kommer av jordas rotasjon. På grunn av de horisontale temperaturforskjellene i luften blir det også trykkforskjeller som fører til vind. Vinden blåser fra høytrykk til lavtrykk, og jo høyere trykkforskjell, desto sterkere vind.

I Norge er det størst vindressurser langs kysten. Dette kommer av lite friksjon fra havet og lite forstyrrelser fra fjell og andre forhøyninger i terrenget som skog og bygninger. Naturgeografien i landet er svært variert, og dermed er det varierende utgangspunkt for lokale vindforhold. Store klimavariasjoner etter årstider er også en viktig faktor for vinden i Norge. Lokale vindressurser, altså vind nær boliger og strømforbrukere, avhenger av de store vindstrømmene, men også hva slags naturlandskap bebyggelsen er i, og samtidig hvordan kulturlandskapet ser ut. Trær og annen vegetasjon, bygninger og byer påvirker vinden. Den lokale topografien som daler, åser, jorder, elver og vann har stor innvirkning på de lokale vindforholdene.

Et eksempel er katabatisk vind som oppstår når kald luft strømmer fra høyder som fjell og åser, og ned mot lavere terreng. Denne luftstrømmen får høyere hastighet grunnet tyngdekraften. Motsatt av katabatisk er anabatisk vind. Denne vinden blåser oppover skråninger eller fjellsider, og skyldes ulik soloppvarming av høytliggende luft der solen treffer tidligere, eller at en dal har en sol- og skyggeside. Andre typiske lokale vinder er pålands- og fralandsvind. Om sommeren varmer solen land, og kald vind fra havet blåser mot lavtrykket på land. Likeledes kald vind fra land blåser mot varm luft over havet når solen går ned [39]



Figur 4.1: Illustrasjon av a) anabatisk vind, og b) katabatisk vind, og når de typisk oppstår, bilde lånt fra bokkilde [39].

I tillegg til vindfenomenene ovenfor er det også andre effekter som gjør at vinden lokalt øker i styrke, som bygger på teorien rundt Bernoulli-effekten, se kapittel 4.2.3. Trakt-effekten, eller traktvind forekommer når luft strømmer inn i en smal passasje, som gjennom en dal, et sund, en fjord eller i gater med høye bygninger, likeledes tunneller. I enden av passasjen utvides luften og det skapes et lavtrykk som gjør at hastigheten på vinden gjennom passasjen mot dette lavtrykket øker. Andre effekter som øker hastigheten på vinden, er kystkonvergens som oppstår når vind blåser parallelt med kystlinjen og hjørneeffekten som oppstår når vind blåser forbi hjørner der det blir en lo og leside.

Alle disse lokale vindfenomenene og effektene er viktige å huske på, og ta høyde for i vurderingen rundt lokale vindressurser, og muligens utnytte med tanke på plassering av vindturbiner.

Vinddata og kart

Småskala vindkraftverk krever nødvendigvis ikke mye vind for å produsere elektrisitet. For småskala vindkraft anbefales det på generell basis en årsmiddelvind på 6 m/s eller mer. Er det usikkerhet knyttet til vindressursen i et gitt område, er den enkleste måten å måle dette på, å sette opp en enkel målestasjon som måler vinden nøyaktig samme sted og høyde som vindturbinen er tenkt å stå. Videre måles vinden over en periode, for eksempel ett år.

I 2009 utarbeidet og publiserte NVE en kartlegging av Norges utbyggbare vindkraftressurser, jfr. Vedlegg 1, s. I [40]. Fra denne kartleggingen ble det konkludert med at i tillegg til kystlinjen, er det også store områder i de indre delene av landet som kan være godt egnet til kraftutbygging.

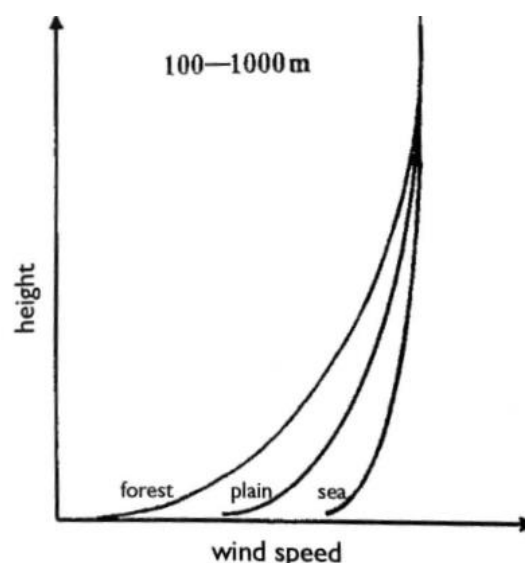
4.2 Aerodynamikk

Aerodynamikk handler om luftens bevegelse og krefter på legemer som beveges igjennom luft, og er svært relevant i forhold til både plassering og forming av vindturbinen. I forhold til plassering av vindturbinen er det viktig å ta høyde for hvordan vinden lokalt påvirkes. I forrige delkapittel ble det nevnt at vertikale objekter som trær, annen vegetasjon, bygninger og topografier vil være med å påvirke de lokale vindressursene.

Aerodynamikk er også viktig i forhold til utformingen av vindturbinen. Vindturbinen skal fange vinden på en mest mulig effektiv måte, og for å få til dette er det avgjørende å ta hensyn til aerodynamiske forhold med tanke på utforming og design.

4.2.1 Ground drag

Når vinden beveger seg forbi overflater skapes det en friksjon mellom luftens bevegelse og overflaten, denne friksjonen kalles *ground drag*, og er en oppbremsing av vinden nærmest overflaten. Hvor stor denne friksjonskoeffisienten er avhenger av ruheten og formen på overflaten vinden beveges forbi. Vind over hav har liten ground drag, mens dyrkede jorder har større, og skog enda større.



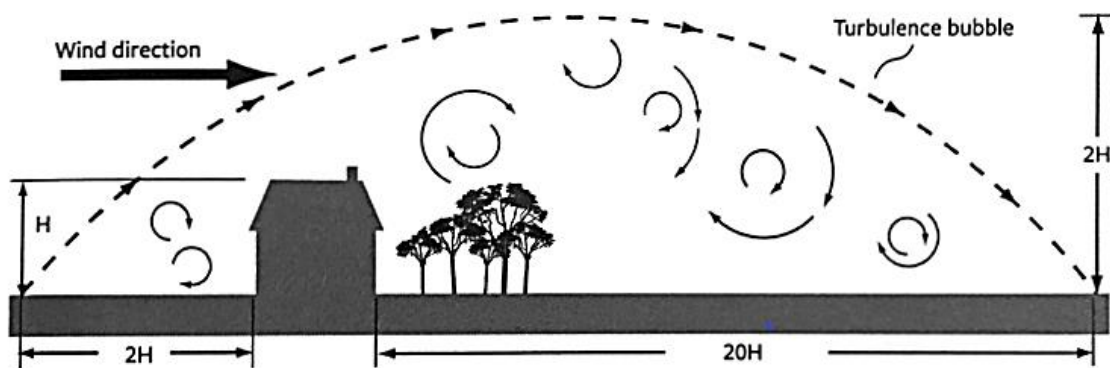
Figur 4.2: Illustrasjon av vindprofil over ulike typer grunnforhold. Vindprofilen beskriver forholdet mellom vindhastigheten og høyden over jord- eller havoverflaten [41].

4.2.2 Turbulens

Når vind, altså luft i bevegelse blir hindret av overflater og objekter skapes det turbulens, som er en forstyrrelse av vindens lineære strøm. Typiske gjenstander som skaper turbulens kan være kraftige endringer i topografi, trær og bygninger. Turbulente vindstrømmer er irregulære variasjoner i luftstrøm som innebærer små lokale variasjoner i lufthastighet, retning og trykk [42]. Generelt kan man si at vindhastigheten vil øke med økt høyde, og hvor stor denne økningen er avhenger av ruheten i terrenget luften beveges over.

Turbulent strømning fører til høyere friksjonsmotstand enn lineær strømning. Dette kommer av at turbulensen skaper større interaksjon mellom vind og nærliggende overflater, som resulterer i at flere luftmolekyler blir påvirket og følgelig skapes det økt friksjonsmotstand.

Tar man et hus som utgangspunkt i 2D, vil vinden bli påvirket foran, over og bak huset. Det vil si at det blir turbulens i området rundt huset. Generelt er vinden påvirket dobbelt så høyt som høyden på huset, dobbel hushøyde i vertikal retning foran huset og 20 høyder bakenfor [39]. Dette avhenger naturligvis av størrelsen, formen og overflaten på bygningen.



Figur 4.3: Illustrasjon som viser hvordan det blir turbulens rundt en gjenstand, i dette tilfellet et hus [39].

Det er dermed avgjørende å gjøre en grundig vurdering av de lokale vindforholdene med tanke på plassering av en småskala vindturbin. Turbulens reduserer som regel vindressursen og gjør at effekten av en vindturbin reduseres, samt at turbinen blir utsatt for ugunstige stressbelastninger som fører til slitasje på turbinen.

4.2.3 Fysikkgrunnlag

I alle fysiske system er energi et grunnleggende fundament. Energi defineres som evnen til å utføre et arbeid, som mekanisk arbeid eller å avgi varme [43]. Energi er konstant, dvs. et lukket system der energi hverken kan skapes eller tilintetgjøres, men kun overføres fra en gjenstand eller ett system til et annet. I SI-systemet er Joule (J) enheten for energi.

Typen av energi

Det finnes ulike former for energi, som kan omformes fra den ene formen til den andre. I vindkraftverk omformes mekanisk energi til elektrisk energi. Mekanisk energi (E) er summen av potensiell- og kinetisk energi. Potensiell energi (E_p) er lagret energi basert på plassering i et kraftsystem. Det kan blant annet være et legeme med en bestemt masse (m), som er hevet en høyde (h), der tyngde-

akselerasjonen (g) i gravitasjonsfeltet skaper potensiell energi, også kalt gravitasjonell potensiell energi eller stillingsenergi.

$$E_p = mgh$$

Kinetisk energi, også kalt bevegelsesenergi, er knyttet til bevegelse av legeme. Bevegelsesenergi avhenger av legemets masse og hastigheten (v) det beveges i.

$$E_k = \frac{1}{2}mv^2 \quad (1)$$

Elektrisk energi kan ikke lagres, altså det må forbrukes i samme stund som det blir produsert, eller omformet til en annen energiform som kan lagres, som i et batteri der elektrisk energi blir omformet til kjemisk energi. Hvor mye elektrisk energi som overføres gjennom ledninger bestemmes av elektrisk effekt (P) og tid (t).

$$E_{el} = Pt$$

For å måle elektrisk energi brukes wattsekund (Ws), og også kilowatttime (kWh).

$$1 Ws = 1 J$$

$$1 kWh = 3,6 \cdot 10^6 Ws$$

En annen type energi som er relevant for vindkraftverk er termisk energi. Det er ofte knyttet til temperaturendringer i luften eller til energitap i en vindturbin som oppstår i forbindelse med friksjonskrefter der mekanisk energi overføres til termisk energi. Termisk energi er bevegelsesenergien til molekyler.

Energi og trykkforhold

Trykk (p) er kraft (F) over et areal (A).

$$p = F/A \quad (2)$$

En mengde luft med hastighet kalles vind og kan defineres som kinetisk energi. Når denne luften kommer i kontakt med en flate med et gitt areal (A) skaper kreftene i vinden (V) et vindtrykk.

$$p = V/A$$

Det er disse trykkreftene som er avgjørende for å skape eller opprettholde rotasjonsbevegelse i propellen i en vindturbin.

Bernoullis teorem omhandler sammenhengen mellom trykket, høyde i luft- eller annet fluid og hastighet, ved uendret energinivå. I forbindelse med luftstrøm, beskriver bernoullilikningen luftens tilstand langs en strømlinje som ikke er turbulent og når luften er friksjonsfri og inkompressibel. Likningen beskriver at trykket, den gravitasjonelle potensielle energien og bevegelsesenergien til luften er konstant (k). Den gravitasjonelle potensielle energien er produktet av luftens massetetthet ρ , tyngdeakselerasjonen (g) og høyden (h) over et bestemt nullnivå. I forbindelse med grove beregninger av vindturbinen vil som regel luftstrøm og trykk være dominerende og den potensielle energien være irrelevant.

$$p + \rho gh + \frac{1}{2}\rho v^2 = k \quad (3)$$

Det er trykkforskjeller som driver vinden, og disse trykkforskjellene bestemmer også hastigheten. Generelt kan man si at der vindhastigheten er lav vil det være et relativt høyt trykk, og ved sterkere vind er trykket lavere. Hvis vind beveges i en tunell eller passasje som blir smalere, så øker vindhastigheten.

Når en luftstrøm beveges mot en vindturbin med et gitt areal (A_1), inneholder denne luften et gitt effektinnhold (P_1). For å avgjøre hvilke komponenter som det er viktig å ta høyde for i dimensjonering av en vindturbin, er det nyttig å se på formelen for dette effektinnholdet.

$$P_1 = \frac{1}{2} \rho A v^3 \quad (4)$$

Følgende kan massestrøm skrives som følgende:

$$\dot{m} = \rho A v$$

Da kan effekten skrives som:

$$P_1 = \frac{1}{2} \dot{m} v^2$$

Som formelen viser, øker den potensielle effekten i vinden eksponentielt i kubisk relasjon til vinden. Lufttettheten har liten innvirkning på potensialet i vinden, og turbinen må bli urealistisk høy for at det i det hele tatt skal gi noe utslag på effekten. Den viktigste faktoren er vindhastigheten, og videre er det størrelsen på arealet som spiller inn på effektinnholdet. Dette understreker viktigheten av å plassere vindturbinen på et sted der det er uforstyrret og stabil vindstrøm. Det skal svært stort areal til for å kompensere for lave vindhastigheter.

Ved å plassere en vindturbin i en luftstrøm, vil en del av effektinnholdet fra vinden gå over til å produsere elektrisk effekt, og resterende effektinnhold forlater vindturbinen, sett bort i fra tap. Dermed kan man sette følgende effektbalanse likning:

$$P_1 = P_{el} + P_2$$

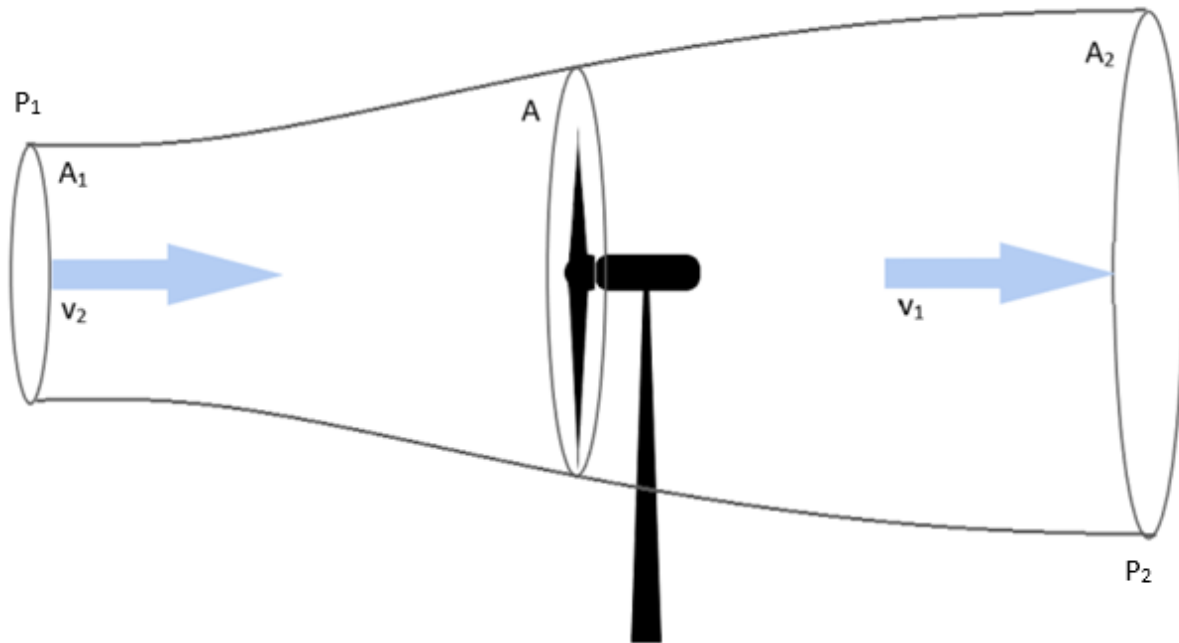
Settes dette sammen med effektlikningen får man effekt-balanselikningen skrives som følgende:

$$P_{el} = \frac{1}{2} \dot{m} (v_1^2 - v_2^2)$$

Sett bort fra tap, kan man da si at retardasjonen av vindhastigheten definerer hvor mye elektrisitet som blir produsert.

Betz lov

Betz lov angir den maksimale effekten som kan bli hentet fra vinden, uavhengig av formen på vindturbinen. Loven baseres på prinsipper om bevaring av masse og moment i luftstrømmen som passerer vindturbinen. I følge Betz lov kan maksimalt 59,3% av den kinetiske energien i vinden fanges opp av en vindturbin.



Figur 4.4: Illustrert retardasjon av vind som passerer en vindturbin. Samme mengde masse per sekund passerer areal A_1 , A_s og A_2 .

Ved å ta høyde for konstant massetetthet i figur 19, varierer arealene og vindhastigheten omvendt av hverandre.

$$A_1 v_1 \rho = A_s v \rho = A_2 v_2 \rho$$

Som nevnt ovenfor bestemmer Betz lov at den maksimale energien en vindturbin kan fange opp er 59,3%. Dette betyr at i effektlikningen bør det legges til faktoren C_p , som angir turbinens aerodynamiske virkningsgrad.

$$P = \frac{1}{2} \rho A_s v^3 C_p \quad (5)$$

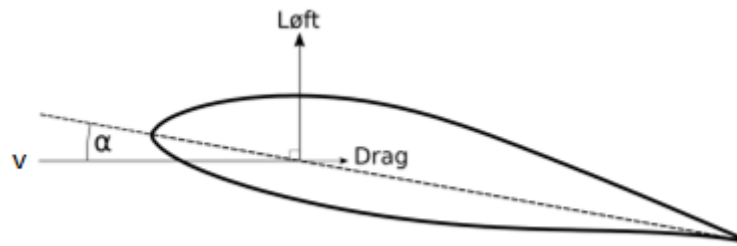
4.2.4 Løft, drag og TSR

Vindenergien skaper et trykk på vind-turbinen som skaper rotasjon i propellen, og gjennom denne rotasjonen drives en generator som omformer rotasjonsbevegelsesenergien til elektrisitet. Når vindturbinen er i drift er det to vindkrefter som virker på den. Den ene er som nevnt den horisontale vindkraften fra vinden, og den andre er tangential vindkraft fra rotasjonsbevegelsen i propellen.

Det er to hovedmåter å drive en vindturbin på, løft og drag, og som regel er disse metodene kombinert. Om en turbin drives av løft- eller drag-krefter defineres av vingeprofilen på propellbladene og angrepsvinkelen til vinden på bladet.

Drag er krefter parallelt med vindretningen. Vinden presser på bladet og bladet presser tilsvarende tilbake (Newtons 3. lov). Alle drag-baserte design begrenser seg til å aldri kunne rotere raskere enn vindhastigheten. Det er det enkleste designet, og det var slik de første vindmøllene ble lagd. Videre har vindturbiner blitt langt mer komplekse, der det kombineres drag- og løft krefter. Løft defineres

som vinkelrett på vinden. Det er når drag og løft kombineres gjennom en angrepsvinkel mellom 0 og 90 grader, det blir best effekt.



Figur 4.5: Illustrasjon av turbinblad med vindhastighets-retning, angrepsvinkel alfa og resulterende løft og drag krefter.

Forenklet kan løft og drag beregnes med følgende formler, men i praksis er bildet mer komplisert og har mange flere variabler, spesielt i forhold til løft.

F_D : Dragkraft parallelt med vindtreningen:

$$F_D = \frac{1}{2} C_D A \rho v^2 \quad (6)$$

C_D : Dragkoeffisient (avhenger av turbinbladets profil)

F_L : Løftkraft vinkelrett i forhold til vindtreningen:

$$F_L = \frac{1}{2} C_L A \rho v^2 \quad (7)$$

C_L : Løftkoeffisient (avhenger av turbinbladets profil)

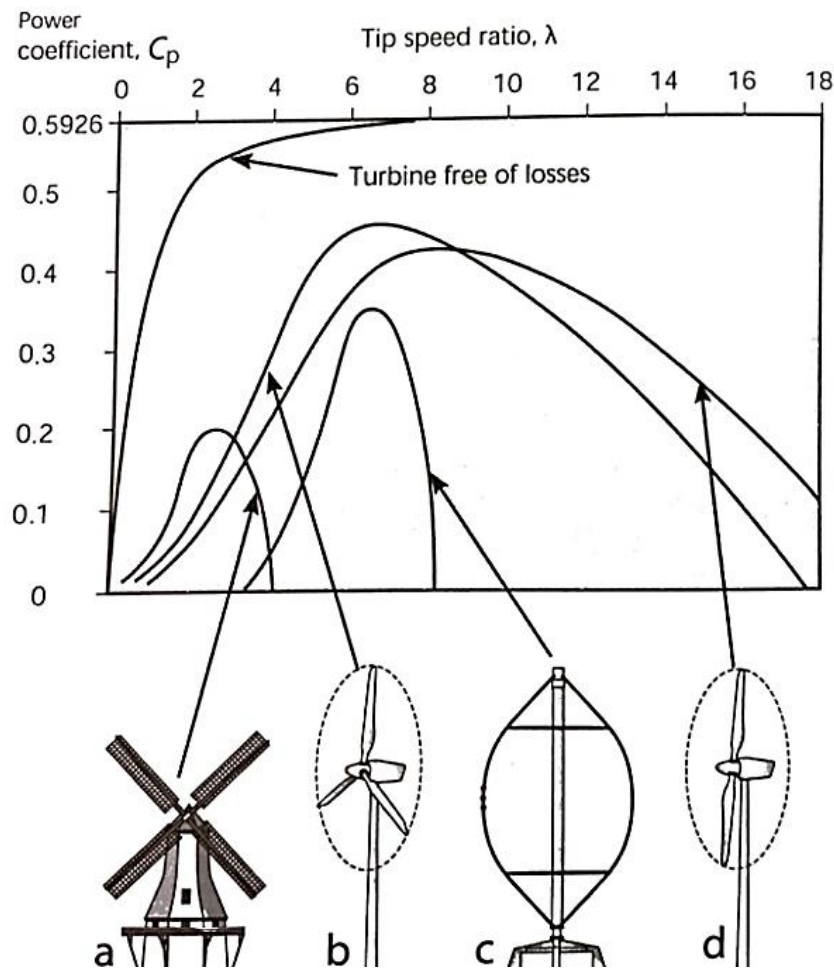
Den mest optimale operasjonsvinkelen til et vingeprofil avgjøres av designet på vingeprofilen, og defineres gjennom forholdstallet løft/drag. Blir angrepsvinkelen for stor, blir det høye løftkrefter i forhold til drag, og det resulterer i mer turbulens på oversiden av turbinbladet.

TSR (Tip-speed ratio)

TSR er et begrep som forklarer forholdet mellom hastigheten på tuppen på rotorbladet (rotor tip speed) og den uforstyrrede vindhastigheten (v_1), før den har blitt retardert av vindturbinen. Hastigheten på rotortuppen er benevnes v_{tip} [m/s], og kan videre utledes som vinkelhastigheten i tuppen (ω_{tip} [rad/s]) multiplisert med radiusen (r) til propellen. Dette forholdstallet indikerer virkningsgraden til vindturbinen, og som Betz lov beskriver er den høyeste virkningsgraden en vindturbin kan ha 59,3%, da uten tap i turbinen, se figur 4.6.

$$TSR = \lambda = \frac{\text{rotor tip speed}}{\text{vindhastighet}} = \frac{v_{tip}}{v_1} = \frac{\omega_{tip} r}{v_1}$$

Dette forholdet avhenger i stor grad av type vindturbin, antall propellblader og profilen på propellbladet. Det er alltid foretrukket med høy TSR, som indikerer høyere virkningsgrad. På den andre siden medfører høy TRS også ulemper som slitasje på bladene fra partikler i luften, akustikk, vibrasjoner og redusert effektivitet knyttet til tap i drag eller lift effektivitetstap (turbulens). Derfor er det punkt som gir optimal TSR, og i figur 4.6 viser diagrammet blant annet at for en klassisk tre-bladet HAWT er den optimale verdien for TSR er rundt 7, som ifølge figuren gir en virkningsgrad på 40-50%.



Figur 4.6: TSR-diagram som illustrerer TSR verdier ved ulike typer vindturbiner og C_p som viser hvor stor andel av vindens effektinnhold turbinen kan utnytte. Den teoretiske maksimale verdien for C_p er $16/27 = 0,5926$ (Betz lov) [44].

Det finnes en rekke liknende tabeller som den i figur 4.6 i ulike litteraturer, og det varierer mellom dem. Diagrammet i figur 4.6 er veldig generelt og tar ikke høyde for variasjoner i bladdesign, profiler og dimensjoner.

4.3 Småskala vindturbiner

Småskala vindturbiner finnes i en rekke ulike varianter, langt flere ulike sammenliknet med makrovindturbiner. I motsetning til makroteknologien innenfor vindindustrien har mikrovindturbiner ofte et enklere design og drivsystem. Det ofte passive girsystemer, direkte drivende generatorer og vindfinner for retningsorientering som kun styres av vinden. I dette delkapittelet avdekkes de mekaniske elementene og hvordan de belastes, samt de teknologiske og elektriske komponentene i vindturbinen.

4.3.1 HAWT vs. VAWT

HAWT er vindturbiner som roterer rundt en horisontal akse, og er den mest utbredte og kommersielle typen innenfor vindindustri. VAWT er vindturbiner som roterer rundt en vertikal akse. Det finnes en rekke ulike typer av VAWT som er både rene drag-basert (den historiske typen) og nå mer moderne kombinerte drag/løft-baserte typen.



Figur 4.7: Illustrasjon av ulike typer VAWT [45].

Selv om det har skjedd en stor forbedring av VAWT de siste årene, så er likevel den tradisjonelle HAWT som har best ytelse. En av utfordringene med VAWT er at halve siden av turbinen ikke fanger vinden i rotasjonsretningen, den roterer i tillegg i motsatt retning. Dette betyr at vindturbinen krever minimum et dobbelt så stort sveipeareal som en tilsvarende HAWT. Fordi VAWT er så mye mindre effektive, har de også lavere rotasjonshastigheter, og det kan derfor antas at VAWT krever fire ganger så stort sveipeareal enn HAWT for å få samme effekt [46].

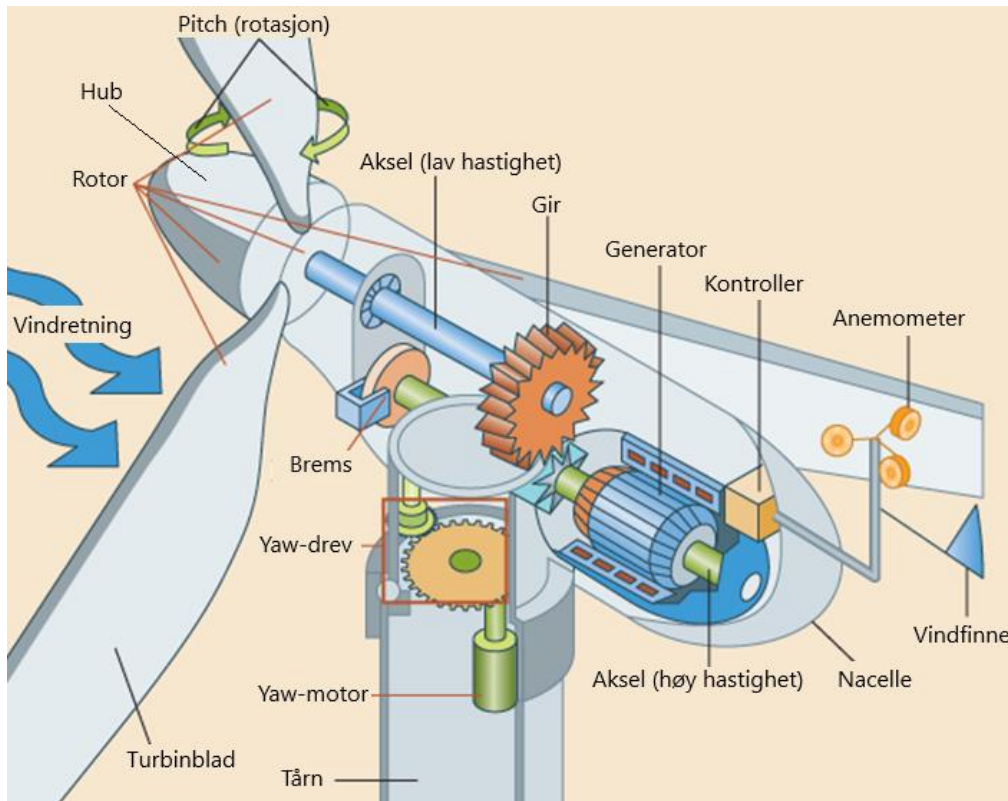
4.3.2 Mekaniske elementer

Det finnes ulike måter å drive generatoren i en vindturbin på. Felles for alle er at vindenergien må fanges av turbinblader (et sveipeareal) og omformes til kinetisk energi, i form av rotasjon i en rotor. Det første vinden treffer er en hub eller nesekjgle, som leder vinden mot turbinbladet og er formet for å minimere turbulens rundt nacellen.

Vinden treffer deretter turbinbladene, som gir rotasjonskraft til propellen. Rotasjonskreftene føres videre via en aksel mot et girsystem. Girsystemet øker turtallet fra akselen til en ny aksel. Etter girsystemet overfører akselen bevegelse til rotoren i generatoren. I figur 4.8 er komponentene illustrert. Generatoren i vindturbiner kan også være direkterevet, dvs. uten girsystem. Da sitter generatoren gjerne tett til propellen, og akselen fra propellen er koplet direkte på rotoren i generatoren, ofte med et lager imellom dem.

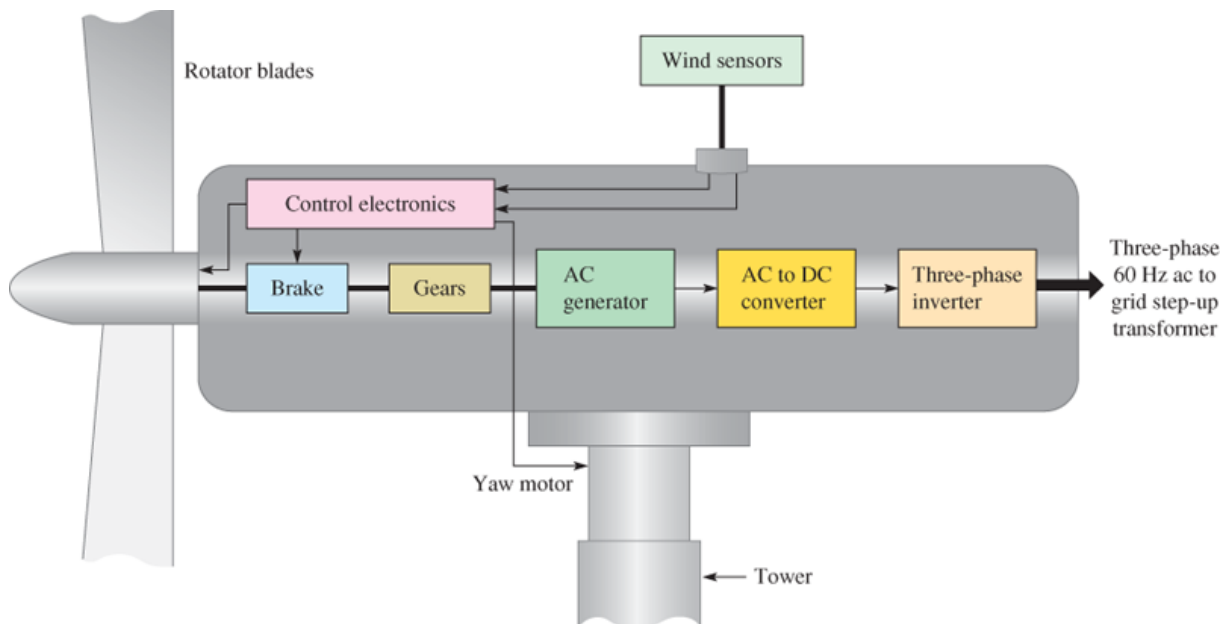
For at vindturbiner skal fange så mye vindenergi som mulig, må turbinen tilpasse seg variasjonene i vinden. For HAWT gjøres dette gjennom bevegelsen yaw, som roterer nacellen rundt en vertikal akse, slik at vindturbinen står vinkelrett på vindretningen. Denne bevegelsen kan styres manuelt av vinden, gjennom en vindfinne, eller via en motor som kommuniserer med en kontroller.

I forhold til vindhastigheter kan turbinbladene roteres om sin egen lengdeakse for å tilpasse hvor mye av vindenergien som skal formes om til rotasjon i rotoren. Denne bevegelsen kalles pitch. Bevegelsen i rotoren har et turtall, og hva som er det optimale turtallet bestemmes av generatoren. Turtallet kan reguleres gjennom girsystemer, i tillegg også flere parallelle generatorer (sjeldent), som har ulike nominelle turtall.



Figur 4.8: Illustrasjon av basiskomponenter i en vindturbin omarbeidet etter kilde [47].

Videre presenteres et systembilde av drivverket i en typisk kommersiell HAWT, figur 4.9:



Figur 4.9: Systematisk oversikt over drivverket og de elektroniske komponentene i en typisk kommersiell HAWT [47].

4.3.3 Generator

Elektrisk generator, også kalt dynamo er en maskin som omformer kinetisk energi (rotasjonsenergi) til elektrisitet. Dette gjøres gjennom elektromagnetisk induksjon som skapes når en rotor og en stator

beveges om hverandre. I dette prosjektet skal det benyttes eksisterende generator som kjøpes inn. Det som er viktig i den sammenheng er å se på hvordan generatoren skal drives, og videre forskjellene mellom typene generatorer som kan være aktuelle å bruke, for å avgjøre hvilken som egner seg best.

Generatorer kan deles inn i to hovedgrupper: AC-generator og DC-generator. Disse generatorene er hovedsakelig bygd på samme måte, med en roterende spole mellom magnetiske poler. Den eneste forskjellen er hvordan spolene er koplet til den eksterne kretsen [48]. I tillegg til å ta høyde for de ulike typene, er turtallet et viktig aspekt å ta hensyn til. Det er viktig at drivverket tilpasses omgjørningsforhold mellom propell og generator, slik at man får dekket optimal-området for generatoren. Dette gjøres på ulike måter, etter om vindturbinen er direkte-drevet eller giret.

Tabell 4.1: Oversikt over de mest utbredte ulike typer generatorer og kort om funksjon og egenskaper, samt bruksområder.

Type generator	Egenskaper [48][49]
Likestrøms (DC) generator	En likestrømsgenerator omformer mekanisk energi til likestrøm og kan levere strøm til elektriske lagringsinstrumenter eller til strømmnett. I grove trekk består denne typen generatoren av en stator som er sirkelformet med poler som danner magnetfelt mellom seg med ett eller flere par. I senter av statoren er det en rotor med viklinger som videre er i kontakt med lamellene i en kommutator. Når rotoren roteres i forhold til statoren skapes det elektromagnetisk induksjon, og gjennom kommutatoren ledes strømmen ut til strømkretsen. For å lade opp batterier må det alltid være likestrøm, så med en likestrømsgenerator trengs det ikke noen konverter mellom generatoren og batteriet, slik det gjør med vekselstrøm.
Vekselstrøm (AC) synkrongenerator	I en vekselstrøm synkrongenerator er frekvensen på spenningen som blir generert proporsjonal med motorens turtall. Maskinen kan derfor fungere ved ulike turtall. Rotoren har viklinger som skaper magnetisk felt. Fra ytre spenningskilder forsynes sleperinger. Rotoren setter opp et roterende magnetfelt og via statorens viklinger blir det induisert spenning. Frekvensen bestemmes også av antall poler og geometrisk plassering av ankerviklingene. Synkrongeneratoren er den mest brukte generatoren i dagens samfunn. I de store synkrongeneratorene må ha en form for turtalls- og spenningsregulering for at frekvens og spenning skal holde seg tilnærmet konstant. I små generatorer i mikrokraftverk trenger man ikke slik regulering, noe som bidrar til å holde kostnadene nede.
Vekselstrøm (AC) asynkrongenerator	For å benytte denne typen generator må rotoren rotere raskere enn synkron hastighet. Normalt er denne typen generator tilkoblet et større kraftsystem slik at frekvens og spenning holder hastigheten på nærmest konstant. Mest brukt som motor, men mye brukt som generator i vindmøller og vannkraftverk. Installert i forbindelse med et forskningsprosjekt i 1990-årene hvor den blir brukt i en vindmølle på Titran.

4.3.4 Energiproduksjon og statiske belastninger

Virkningsgrad

Den totale virkningsgraden til vindturbinen (η_{tot}) er bestemt av tilført, tapt og avgitt effekt, altså produktet av alle virkningsgradene i delsystemene i vindturbinen. Den beregnes som følgende, der P_1

er den potensielle effekten i vindstrømmen rett før den treffer vindturbinen, og P_{el} er den elektriske effekten som ledes ut av vindturbinen.

$$Total\ virkningsgrad = \eta_{tot} = \frac{P_{ut}}{P_{inn}} = \frac{P_{el}}{P_1} \quad (8)$$

Det første delsystemet i vindturbinen er virkningsgraden C_p , som er den aerodynamiske virkningsgraden, altså hvor mye effekt propellen fanger opp i forhold til potensiell effekt i vinden på sveipearealet. Fra likning (4), kan C_p defineres som følger:

$$C_p = \frac{2P_1}{\rho A_s v^3} \quad (9)$$

Videre vil det være effekttap i gir, gitt at generatoren ikke er direkte-drevet. Virkningsgraden i et girsystem (η_{gir}) med tre steg er omtrent på 97% [44]. Vindturbiner med direkte-drevet generator trenger ikke girsystem, men på grunn av at frekvensen og spenningen vil variere, må strømmen behandles i en inverter for å få riktig frekvens og spenning ut på nettet. Virkningsgraden i en slik inverter (η_{inv}) er som regel på 97%; Det er derfor tilnærmet lik virkningsgrad på giret og direkte-drevet vindturbin [44].

For generatorer er det relasjon mellom størrelse og virkningsgrad. Jo større effekt generatoren produserer, jo nærmere er virkningsgraden til 100%. For generatorer på 5kW, er den generelle virkningsgraden på 84%, men det er ifølge en kilde fra 2007 [44]. Det kan derfor antas at det har skjedd forbedringer på denne virkningsgraden, likevel vil dette være utgangspunktet for definering av virkningsgrader i beregningene. Fra litteratursøk på generatorer i dag oppgir enkelte generatorer i samme størrelse virkningsgrader på over 90%.

Total virkningsgrad - giret vindturbin:

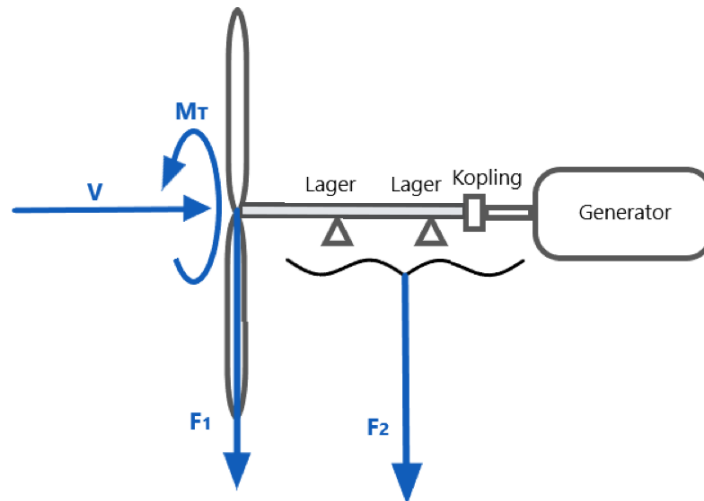
$$\eta_{tot} = C_p \eta_{gir} \eta_{gen}$$

Total virkningsgrad - direkte-drevet vindturbin:

$$\eta_{tot} = C_p \eta_{gen} \eta_{inv}$$

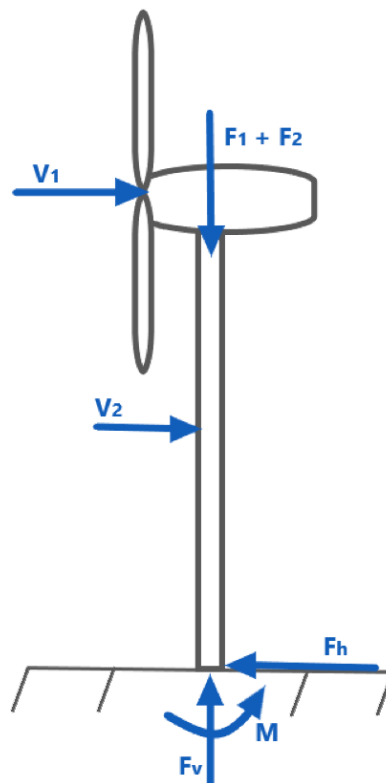
Statiske belastninger

Det er to hovedkrefter som virker på vindturbinen, vindkraft og gravitasjonskraft. Den vertikale vindkraften V skaper et trykk på propellbladene, samt at kraften dekomponeres og skaper et moment M_T i akselen propellen er festet i. Kraften fra propellens egenvekt (F_1) og kraften fra egenvekten til drivverket med generatoren (F_2) inne i turbinen gir vertikale krefter nedover.



Figur 4.10: Skjematisk illustrasjon av hvordan vindkraften skaper torsjonsmoment i akselen, og hvordan egenvekten fra elementene skaper krefter i negativ z-retning.

Videre overføres kreftene til tårnet og forankringen til bakken. F_1 og F_2 gi vertikale krefter nedover, mens vindkraften på propellen (V_1) og vindkraften som treffer tårnet (V_2) skaper vertikale krefter. Kraftene fra vinden skaper bøyemoment (M) i forankringspunktet til tårnet/fundamentet, og horisontale krefter (F_h) i motsatt retning som vindretningen. Hvis det er ubalanse i konstruksjonen festet til toppen av tårnet vil det også oppstå et moment her også, men det vil bli tatt utgangspunkt i at dette er balansert.



Figur 4.11: Skjematisk illustrasjon av hvordan krefter og momenter opptrer på tårnet og innfestingen til vindturbinen.

Moment er lik kraft (F) ganger lengden (l), som er avstanden fra momentet til angrepspunktet til kraften:

$$M = Fl \quad (10)$$

Da blir momentet i bunn av tårnet som følger:

$$M = V_1 H + V_2 h$$

Momentet fra de horisontale vindkreftene vil skape dimensjonerende spenninger i tårnet og fundamentet. I den tidlige beregningen av disse spenningene, vil det fokuseres på bøyespenningen og se bort ifra knekking og dynamiske forhold.

$$\sigma_b = \frac{M}{I} y \quad (11)$$

Der bøyespenningen er σ_b , I er tverrsnittsflatens annet arealmomentet og y er halvparten av den ytre diameteren (d_y).

$$y = \frac{d_y}{2}$$

Annet arealmoment bestemmes av indre (d_i) og yre diameter (d_y) av tårnet.

$$I = \frac{\pi}{64} (d_y^4 - d_i^4) \quad (12)$$

Når rotoren roterer, vil den rotere med et turtall (n), og det vil være en motstand i generatoren, som produserer elektrisitet. Denne motstanden gir et torsjonsmoment (M_T), som sammen med turtallet avgjør effekten (P).

$$n = \frac{30 \omega}{\pi} \text{ [o/min]} \quad (14)$$

$$P = \frac{M_T \pi n}{30} \quad (15)$$

Effekten også regnes ut med følgende forenkling, hvor virkningsgraden er inkludert:

$$P = \frac{\eta M_T n}{9550}$$

Der 9550 er omgjøringsfaktoren:

$$1000 * \frac{30}{\pi} \approx 9550$$

Rotasjonsbevegelsen i propellen skaper torsjonsmoment på akselen. Disse kreftene fordeler seg over tverrsnittsarealet og skaper skjerspenning (τ)

$$\tau = \frac{M_T}{I_p} r \quad (16)$$

Hvor I_p er flatens polare annet arealmoment, og r er radiusen til akselen.

$$I_p = \frac{\pi}{32} d^4 \quad (17)$$

Når rotasjonsbevegelsen i propellen skal starte er det en treghet i oppstarten, som avhenger av propellmassen og avstanden fra rotasjonsaksen. Denne tregheten har symbol I_0 og benevnes som treghetsmoment. Når vindturbinen skal starte å rotere kreves det større vindtrykk enn for å opprettholde en rotasjon, derfor er det normalt ved større vindturbiner å få tilført energi fra strømmettet eller et batteri for å starte rotasjonsbevegelsen.

4.4 Sikkerhet, elektrisitet og strømhåndtering

I dette delkapittelet blir det kort bli redegjort for sikkerhet og strømhåndtering rundt småskala vindturbiner.

Konstruksjon:

For å opprettholde sikkerheten rundt vindturbinen er det viktig at både konstruksjon og elektronikk er driftssikkert og tåler de belastningene det blir utsatt for. I forbindelse med konstruksjonen bør den dimensjoneres mot kraftige vindhastigheter, som kan oppstå i området turbinen står, samt at konstruksjonen dimensjoneres med sikkerhetsfaktorer for å ta høyde for unormaliteter i materialer og konstruksjonsforbindelser, samt ulike ytre belastninger.

For dimensjonering og beregninger av tårnet vil det bli tatt utgangspunkt i tillatte belastninger for det gitte materialet, som er angitt i tabell, jfr. Vedlegg 2, lånt fra kilde [50].

Elektrisitet og distribusjon:

Når generatoren i vindturbinen produserer strøm, er dette normalt med lav spenning. Strømmen sendes videre gjennom en strømomformer og transformator for å sette opp likt spenningsnivå som i kraftnettet. Det er videre viktig at strømmen sendes igjennom et sikkerhetssystem, et bryteranlegg som sørger for at koplingen mellom turbinen og kraftnettet blir brutt dersom det oppstår en feil.

Det finnes ulike måter å håndtere strømmen på. Vindturbinen kan enten koples på strømmettet, eller så kan den kun drifte husholdningen. Hvis den ikke skal koples på et nett, kan det være lurt å se på løsninger for å håndtere overskuddsstrømmen. Det kan for eksempel være tilkople et batteri som lagrer strømmen til mer vindstille dager.

4.6 Akustikk

I denne delen blir det i grove trekk gjort rede for akustiske forhold i forbindelse med vindturbin-teknologi.

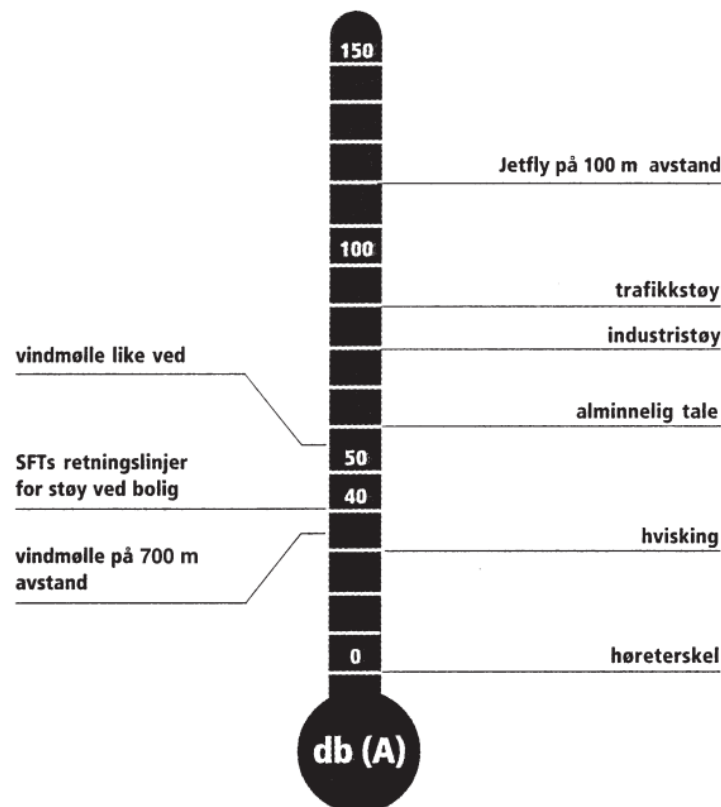
Akustikk defineres som vitenskapen som omhandler lyd, og lydstyrke kan blant annet måles i desibel (dB). Desibel beskriver forholdet mellom to like størrelser, og er en logaritmisk enhet. Akustisk desibel defineres gjennom forholdet mellom lydtrykket og det referanselydtrykket som er terskelen for hva menneskeøret kan høre. Referanselydtrykket er på $20 \mu\text{Pa}$ [51]. Formelen for akustisk desibel er følgende:

$$L_{dB} = 20 \log_{10} \frac{p_{lyd}}{p_{ref}} = 20 \log_{10} \frac{p_{lyd}}{2 \cdot 10^{-5} \text{ N/m}^2}$$

For mennesket oppleves lydnivå på 20 dB som helt stille, og 130 som ørets smertegrense [51].

Det er et utbredt problem for vindindustrien at vindturbinene produserer akustikk som er sjenerende og over tid potensielt skadelig for mennesker som bor i nærheten. Akustikk, eller lydbølger som er sjenerende og som kan påvirke menneskets fysiske og psykiske helse negativt kalles for støy.

Støy fra vindturbiner kommer fra vingenes bevegelse, og de mekaniske elementene i drivverket. Lyden fra vingene skapes fra aerodynamiske forhold, og jo raskere vinkelhastigheten i turbinbladets tupp er, jo høyere lydtrykk produseres. Det er vanligvis denne lyden som er sjenerende fra vindturbiner, da denne som regel er høyere enn de andre lydbølgene vindturbinen produserer.



Figur 4.12: Illustrasjon lånt fra NVE som illustrerer støy fra ulike typer lydtkilder, sammenliknet med støy fra storskala vindturbiner [52].

Statens forurensningstilsyn har satt grenser for industriverktøy (inkl. vindturbiner), med anbefalte lydnivå ved nærmeste bebyggelse [52]:

- Kl. 06.00 – 18.00: 50 dBA
- Kl. 18.00 – 22.00: 45 dBA
- Kl. 22.00 – 06.00: 40 dBA

I praksis vil dette gi en grense på 40 dBA for en vindturbin i drift, da den ikke endrer lydnivå etter tider på døgnet.

I forbindelse med sikkerhet og utvikling av vindturbin er det også viktig å ta høyde for og måle lydbølger som ikke det menneskelige øret kan høre, men som likevel kan ha helsepåvirkende effekter og være skadelig over tid. Infralyd er et eksempel på en slik type akustikk, og har frekvensområde mellom 0,5-15 Hz. Noen spesielle frekvenser av denne typen lydbølger har potensialet til å fremkalle kvalme,

brekninger, synsforstyrrelser og den kognitive aktiviteten. Er disse lydbølgene kraftige, har de også potensialet til å påføre øresus og nedsatt hørsel [53].

Det er derfor viktig i utvikling av vindturbiner å ta høyde for, og måle ved prototyping lydbølgefrekvenser og lydtrykk fra propell og maskindrift.

4.5 Krav til små vindkraftverk

Vindkraftverk med effekt under 1 MW, er ikke pliktet å søke konsesjon fra staten, men må søkes om hos kommunen. I olje- og energidepartementets og moderniseringsdepartementets «*veileder for kommunal behandling av mindre vindkraftverk*» står det følgende om tekniske krav i forbindelse med småskala vindturbiner;

«Det er ikke gitt særskilte krav til vindturbiner i plan- og bygningsloven eller forskrift om tekniske krav til byggverk (TEK10). Imidlertid må tiltaket oppfylle de generelle kravene i TEK10 til blant annet konstruksjonssikkerhet, jf. forskriftens kapittel 10. Det vil være tiltakshavers ansvar at tiltaket oppfyller tekniske krav, men kommunen kan eventuelt føre tilsyn med dette» [54].

5 PRODUKTSPEISIFISERING

I dette kapitlet fastsettes målene og de viktigste krav og egenskaper for produktet, samt hvilken målgruppe produktet bør treffe. Spesifiseringen bør samtidig kunne tilfredsstille viktige produktønsker og preferanser som man vil måtte ha som kunde og bruker. Dette gjøres for å sette et utgangspunkt for videre konseptgenerering.

5.1 Produktmålsettinger

I denne delen presenteres målene for produktet, som legger grunnlag for hvilke egenskaper det er ønskelig at vindturbinen skal ha. Delmålene deles inn i kategorier, og på denne måten blir det lettere å få oversikt og unngå at noen viktige delmål blir glemt.

Hovedmål

«Hovedmålet for produktet er å produsere lokal strøm, gjennom å fange vindenergi på en mest mulig effektiv måte. Vindenergien skal også fanges på en skånsom måte for miljø, omgivelser og natur. Produktet skal være brukervennlig, driftssikkert og teknisk ukomplisert. Det skal være av høy kvalitet og robust for å sikre lang levetid, minimalt vedlikehold og reparasjon»

Delmål

Konstruksjons- og teknologimål:

- Konstruksjonen skal ha lav kompleksitet, og bli designet etter prinsipper om modularisering og standardisering.
- Vindturbinkonseptet skal være teknologisk ukomplisert og driftssikker.
- Konstruksjonen skal dimensjoneres med sikkerhetsfaktorer som underbygger høy sikkerhet.
- Konstruksjonselementene skal være robuste og motstandsdyktige mot vind, vær- og driftsbelastninger.
- Vindturbinkonseptet skal være driftssikkert med tanke på både mekaniske og elektriske komponenter.

Brukermål:

- Vindturbinkonseptet skal være brukervennlig, enkel å montere, det skal etterstrebes sjeldne vedlikeholds-intervaller, samt enkle vedlikehold/service og reparasjoner.
- Vindturbinen skal være resirkulerbar og mulig å demontere/flytte.
- Turbinkonseptet skal kunne tilpasses kundens behov, gitt at behovene ikke blir på bekostning av andre produktmål.
- Produktet skal være trygt å håndtere i forbindelse med montering, vedlikehold og demontering.

Designmål:

- Produktarkitekturen skal ikke være visuelt eller akustisk sjenerende eller ha negativ helsepåvirkning på mennesker.
- Vindturbinen skal ikke gjøre skade på miljø, dyreliv og natur.
- Vindturbinen skal etterstrebe å visuelt blende inn i naturen ved bruk av organiske former og farger

Økonomiske mål:

- Vindturbinkonseptet skal designes med hensyn til å redusere produksjons- og tilvirkningskostnader.
- Bruke modularisering, standardkomponenter og eksisterende løsninger for de generator og andre elektriske komponenter.

5.2 Produktegenskaper

Det stilles krav til vindturbinens produktegenskaper, som har bakgrunn i produktmålene. Hver av egenskapene vektet med Pugh's metodikk (jfr. Delkapittel 3.2), og vektlegges med poengskala, se figur 5.1.



Figur 5.1: Skala for vekting av produktegenskaper

Videre presenteres vektingen i tabellen nedenfor, med krav, vekting og begrunnelse for vektingen. Produktegenskapene er utarbeidet etter delmålene, noe som resulterer i at alle kravene vektet relativt høyt.

Tabell 5.1: Produktegenskaper med vekting og begrunnelse.

Kriterium	Vekting	Begrunnelse
Konstruksjonskrav		
Kompleksitet	3	Holde kompleksiteten lav for å forenkle produksjon og samtidig redusere produksjonstid, kostnader og materialbruk.
Modularisering	4	Bruke eksisterende løsninger for elektriske komponenter, og standardisering og modularisering av deler, for å holde utviklings- og produksjonskostnader lave. Modularisering vil også potensielt gi mulighet for tilpasninger etter brukerbehov.
Robusthet	4	Det er avgjørende at produktet er værbestandig, robust og driftssikkert. Opprettholdes kravet vil det medføre at produktet kan brukes i mange ulike klimaer og miljøer.
Vedlikehold	3	Det er viktig at produktet er enkelt å vedlikeholde, samtidig krever lite vedlikehold. Da kan vindturbinene brukes der det ikke er mulig med hyppig tilsyn og vedlikehold, men likevel være i drift.

Tabell 5.1: Fortsettelse.

Kriterium	Vekting	Begrunnelse
Brukskrav		
Brukervennlig	4	Det er viktig at produktet er enkelt å montere, operere og demontere for brukeren.
Mobilitet/frakt	2	Det er nyttig at vindmøllen kan pakkes og at den er lett å frakte. Likevel er frakten en svært liten del av livsløpet til vindmøllen og det antas at den ikke skal stå på mobilt fartøy.
Effekt	5	Vindturbinen har høy virkningsgrad, dvs. at den har potensialet til å fange 40-45% av potensialet i vinden.
Sikkerhetskrav		
Tåle kraftig vind og vær	5	Sikkerhet er det første og fremste kriteriet. Det forebygger menneskeskader.
Elektrisitet	5	Det er viktig at de elektriske komponentene er driftssikre og ikke øker risiko for brann i natur og/eller bolig. Mangler i elektrisk anlegg kan også føre til personsikader.
Designkrav		
Estetikk	3	Det er viktig at produktet ikke er sjenerende for miljøet rundt, og samtidig appellerer til kunde ved å ha estetikk og særpreg som gjenspeiler produktets formål gjennom grønt design.
Natur og fauna	5	Det er viktig at produktet skåner om naturen rundt og ikke dreper dyreliv.
Akustikk	3	Vindturbiner har gjerne akustisk støy som er sjenerende og potensielt skadelig for hørsel. Det er viktig at produktet er stille i drift hvis det skal plasseres i nærheten av bebyggelse.

5.3 Metriske grensespesifikasjoner, variasjonsbredde

I dette delkapittelet settes tidlige metriske grensespesifikasjoner med toleranser, for å tidlig danne et utgangspunkt for videre design- og konseptutvikling. Toleransene indikerer metriske mål og spesifikasjoner som vindturbinen skal holde seg innenfor. Inspirasjonen for målsettingen hentes fra teoriutredningen, produktmålsetningene og konkurrerende løsninger. Alle målene tar utgangspunkt i én rotor, bortsett fra punktet som angir grense for antall rotor.

Tabell 5.2: Metriske grensespesifikasjoner for vindturbinen.

Spesifikasjon	Min	Max
Ytelse (nominell) [kW]	3	15
Rotordiameter [m] (x-akse)	1	5
Tårnhøyde [m] (z-akse)	6	30
Dybde [m] (y-akse)	0,5	2
Antall rotor	1	4
Antall rotorblader	1	6
Antall generatorer?	1	3
Fundament [m]	0.5 x 0,5	3 x 3

5.4 Metriske grovspesifikasjoner

Ved å estimere tidlige metriske grovspesifikasjoner for produktet gir det en indikasjon på hvor stort produktet skal bli. Basismålene danner et grunnlag for videre design- og utviklingsarbeid.

Grovspesifikasjonene ligger innenfor toleranseområdene i grensespesifikasjonene angitt i tabell 5.2.

Tabell 5.3: Metriske grovspesifikasjoner for vindturbinen.

Spesifikasjon	Mål
Ytelse (nominell) [kW]	5
Rotordiameter [m] (x-akse)	3
Tårnhøyde [m] (z-akse)	12
Dybde [m] (y-akse)	1
Antall rotor	1
Antall rotorblader	3
Antall generatorer?	1
Fundament [m]	1,5 x 1,5
*Virkningsgrad (%)	40

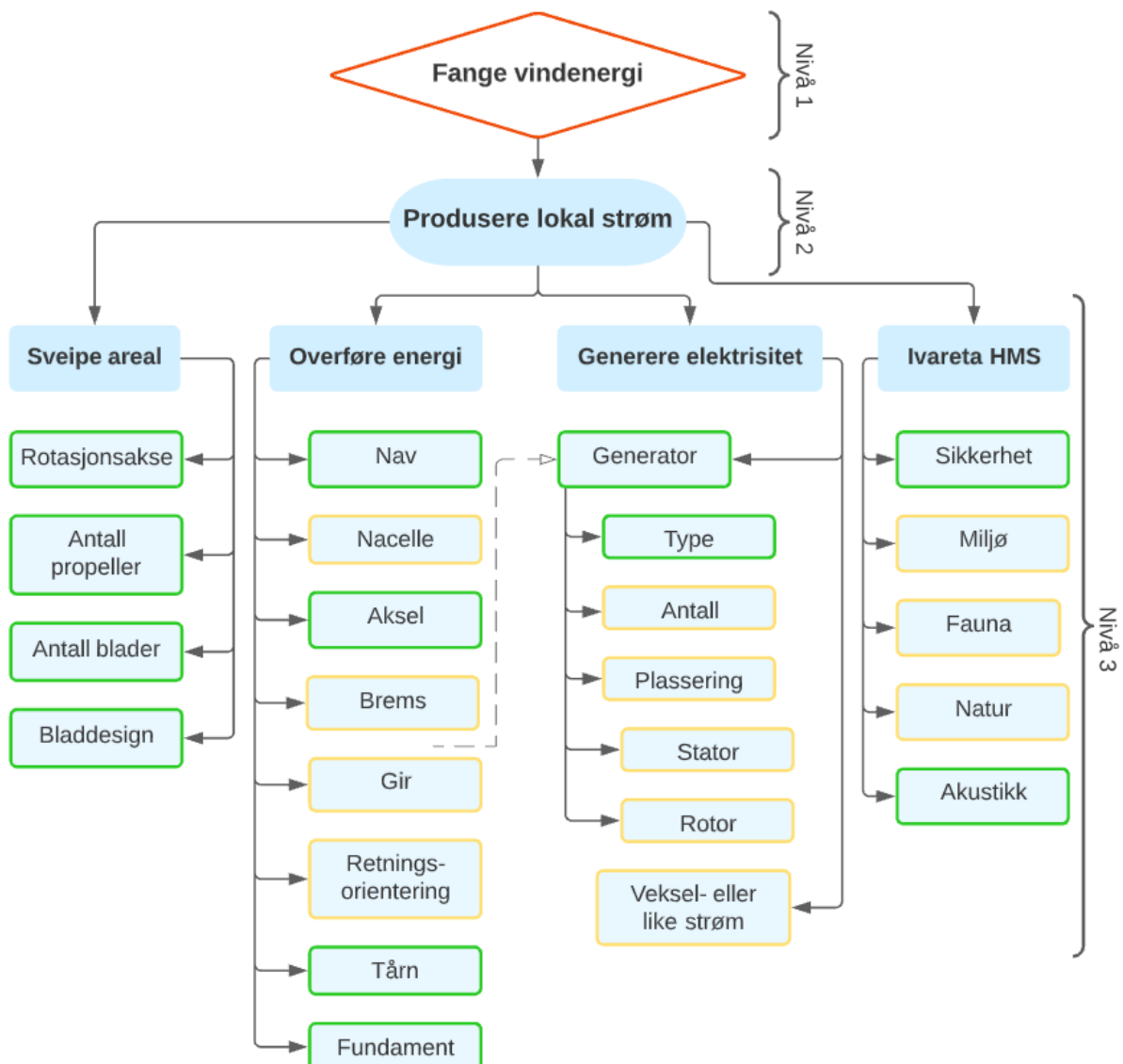
*Virkningsgraden er elektrisk effekt produsert delt på mengde potensiell vindenergi innenfor sveipearealet til vindturbinen.

6 KONSEPTGENERERING

I denne delen skal konseptet utvikles gjennom funksjonsanalyser og vurderinger av ulike løsninger på hovedkomponenter og funksjoner. Gjennom en funksjonsanalyse kartlegges elementene som er grunnleggende for å nå hovedmålet.

6.1 Funksjonsanalyse

Funksjonsanalysen tar utgangspunkt i hovedmålet for produktet og viser hva (nivå 1), hvorfor (nivå 2) og hvordan (nivå 3) produktet og dets komponenter kan fungere.



Figur 6.1: Analyse av funksjonene i vindturbinen. Funksjonselementene markert i grønt viser hvilke elementer som skal dekomponeres til ulike løsningsalternativer og evalueres, eller som det vil bli gjennomført grove beregninger på (aksel, tårn og fundament). Funksjonselementene markert i gult evalueres senere i produktutviklingen eller settes til videre arbeid.

6.2 Funksjonsalternativer med evaluering

I dette delkapittelet dekomponeres funksjonselementene i figur 6.1 til funksjonsalternativer. Hvert alternativ skisseres opp, beskrives og evalueres i de følgende tabellene. Det er de funksjonselementene som er markert med grønt i funksjonsanalysen som vil bli dekomponert og evaluert. De som er markert i gult vil enten bli vurdert for senere i rapporten, satt som begrensning og dermed til videre arbeid.

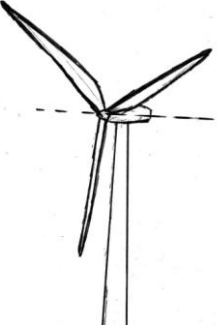

6.2.1 Sveipeareal

For å fange vinden og skape rotasjonsbevegelse i vindturbinen kreves det et sveipeareal. Arealet kan skape rotasjon rundt en horisontal og vertikal akse. I denne delen vurderes løsningsalternativer for hvordan vindenergien skal fanges og overføres til rotasjonsbevegelse.

Rotasjonsakse

Det er to hovedtyper vindturbiner, som i tabell 6.1 illustreres og vurderes etter hvilken akse rotoren roterer om:

Tabell 6.1: Løsningsalternativer og evaluering av hovedtypene for vindturbiner.

Skisse	Løsningsalternativ	Positivt	Negativt
	HAWT	Godt utarbeidet teknologi med høy virkningsgrad. Dobbelt så effektiv som VAWT med tanke på sveipeareal.	Truende for fugler, må stå høyt for å unngå kontakt med mennesker og fange nok vind
	VAWT	Appellerende design, krever liten plass i bredden.	Lite effektive sammenliknet med HAWT. Krever mer enn dobbelt så stort sveipeareal sammenliknet med HAWT

Motvind eller medvind

HAWT kan være designet for enten medvind eller motvind.

Tabell 6.2: Løsningsalternativer for HAWT.

Skisse	Løsningsalternativ	Positivt	Negativt
	Motvind	Høy virkningsgrad, da ingenting forstyrrer vinden før den treffer propellen.	Må ta høyde for og tilpasse propellen slik at bladene ikke treffer tårnet ved sterk vind. Dette kan løses med blant annet å tilte propellen, tilte bladene eller forbøye bladene mot vinden.
	Medvind	Propellbladene treffer ikke tårnet ved sterk vind da de bøyes andre veien	Vinden blir forstyrret av nacelle og tårn før den når propellen som reduserer virkningsgraden

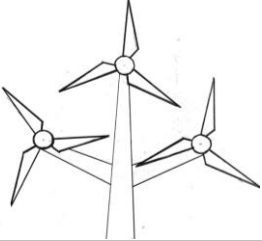
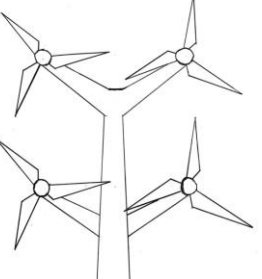
Antall propeller

Den klassiske vindturbinen består som regel av én propell, men for å øke sveipeareal kan en løsning være å legge til flere propeller fremfor å øke rotordiameter.

Tabell 6.3: Løsningsalternativer og evaluering av antall propeller for vindturbinen.

Skisse	Løsningsalternativ	Positivt	Negativt
	En	Lav materialkostnad. Krever kun én generator.	Lite innovativt, må ha lange turbinblader for å få stort sveipeareal.
	To	Krever mindre sveipeareal per propell for samme effekt sammenliknet med én propell	Høyere materialforbruk. Må ha to generatorer.


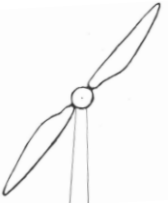

Tabell 6.3: Fortsettelse.

Skisse	Løsningsalternativ	Positivt	Negativt
	Tre	Krever enda mindre areal per propell. Konstruksjonen tillater modularisering av ulike antall propeller	Enda høyere materialforbruk. Må ha tre generatorer
	Fire	Har vist seg å gi en viss fordel ved gunstig interaksjon mellom propellene	Høyt materialforbruk, og fire generatorer.

Antall blader

Jo mer turbinblad-masse det er i forholdet mellom sveipeareal og bladoverflate, jo lavere hastighet og TSR har turbinen. Dette fører til mer dreiemoment og lavere turtall, som igjen gir lavere effekt. Når det vurderes rundt antall blader, er det viktig å ta høyde for balanse. Ubalanse i propellen skaper stress og dynamiske belastninger som gir slitasje.

Tabell 6.4: Løsningsalternativer og evaluering av antall blader på propellen.

Skisse	Løsningsalternativ	Positivt	Negativt
	En	Lav materialkostnad,	Vanskelig å designe, balansere, og stabilisere. Krever høyt turtall som fører til økt støy. Bladet må være bredere enn ved flere turbinblad.
	To	Balansert propell	Ustabil ved rotasjon (yaw). Moment i aksel på grunn av at øvre blad får mer vind enn nedre blad.
	Tre	Balansert og stabilisert. Minimalt med moment i aksel.	Lite innovativt.

Tabell 6.4: Fortsettelse.

Skisse	Løsningsalternativ	Positivt	Negativt
	Fire		Høyt materialforbruk
	Fem		Høyere materialforbruk og krever smale blader som kan bli vanskelig å forsterke
	Seks	Estetisk fint.	Bladprofilen må bli så smal at den kan bli vanskelig å forsterke. Store materialkostnader.

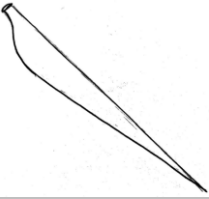

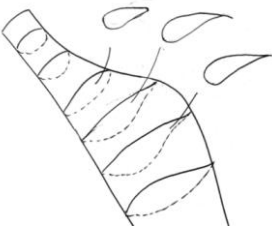
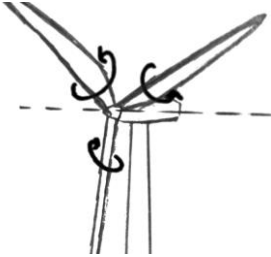

Bladdesign

Formen på bladet bestemmer hvordan propellen drives. Hovedsakelig er en propell løft-basert eller drag-basert, men som regel en kombinasjon. Rotasjonshastigheten avhenger også av treghetsmomentet. Masse som er langt fra rotasjonsaksen skaper høyere treghetsmoment, som gjør at propellen roterer saktere, men samtidig gir en jevn drift.

Tabell 6.5: Løsningsalternativer og evaluering av ulike design og funksjoner for propellbladene.

Skisse	Løsningsalternativ	Positivt	Negativt
	1. Løft-basert	Bladene kan beveges raskere enn vindhastigheten	Luftmotstand fra rotasjons, hastigheten
	2. Drag-basert	Liten luftmotstand fra rotasjons-hastigheten	Bladene kan ikke beveges raskere enn vindhastigheten

Tabell 6.5: Fortsettelse.

Skisse	Løsningsalternativ	Positivt	Negativt
	3. Lang og smal	Gir høy TSR, stort sveipeareal	Ved høy rotasjonshastighet produseres det med akustisk støy.
	4. Kort og bred	Fauna, dyreliv og akustikk	Lavt sveipeareal, lav TSR
	5. Krummet	Tillater variasjon i løft/drag forholdet gjennom lengden av propellbladet. Ved roten av bladet skjer bevegelsen roligere enn ved tuppen = mer lift her.	Mer komplekst design og krever derfor mer komplisert tilvirkningsteknikk, sammenliknet med en flat plate.
	6. Pitch	Kan tilpasse vindhastighet til optimal rpm	Økte kostnader
	7. Bøyelige	Svikter ved sterk vind og forebygger av bladene knekker.	Må

6.2.2 Overføre energi

Denne delen tar for seg de elementene som er med på å overføre energien til generatoren. Først er det navet som er innfestningen til propellbladene. Videre vurderes det for om nacelle og nesekjelle skal inngå i konstruksjonen. Deretter presenteres løsningsalternativer for generator, retningsorientering, propelltårn og fundament.

Nav innfesting

Tabell 6.6: Løsningsalternativ og evaluering for nav.

Skisse	Løsningsalternativ	Positivt	Negativt
	Felles vingefeste i senter av rotasjonsaksen	Enkel montering.	Mye krefter i ett punkt. Vingene kan ikke pitche.
	Mange festepunkter i front av nav	Kan tilpasse antall turbinblader etter behov	Høy luftmotstand. Ikke mulighet til å pitche bladene
	Innfesting på siden av navet	Gjør det mulig for turbinbladene å pitche	Vanskelig å justere antall blader

Nacelle og nesekjegle

Tabell 6.7: Løsningsalternativer for nacelle og nesekjegler.

Type	Beskrivelse	Positivt	Negativt
Åpen løsning	Ingen nacelle. Drivverket og generatoren ligger åpent, for omgivelsene	Enkelt og rimelig. Enkelt å komme til deler i forbindelse med vedlikehold	Mer utsatt for fukt og slitasje, dermed kortere levetid.
Lukket løsning	Nacelle. Dekker og beskytter drivverket og generatoren.	Redusert turbulens. Beskytter drivverk og generator. Mer robust.	Mer materialer, tilvirkning og kostnader.
Med nesekjegle	Nesekjegle som er formet for å lede vindstrømmen mot turbinbladene	God aerodynamikk, som skaper minimalt med turbulens, og leder vinden ut mot propellen uten å skape turbulens	Materialbruk
Uten nesekjegle	Åpen løsning til innvestingen av turbinbladene.	Rimelig og lite materialbruk.	Stopper opp vinden og skaper turbulens, graden dette skjer avhenger av størrelsen på navet.

Generator


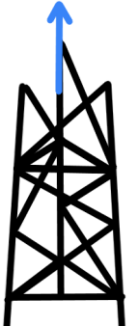
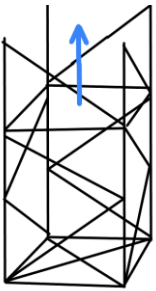
For å generere elektrisitet må vindturbinen ha en generator. I funksjonsanalysen er dette den eneste grønne markeringen under hovedpunktet «generere elektrisitet», og det velges derfor å utredes for løsningsalternativer for generatoren.

I kapittel 4.3.3, side 42 og 43 ble det presentert de tre hovedtypene for generatorer, med funksjonsbeskrivelser og brukerområde, de er som følger:

- 1) **DC-generator:** Enkelt design, billig, lavere virkningsgrad og mer slitasje.
- 2) **AC-generator synkron:** Dyr, høy virkningsgrad, lite vedlikehold, driftssikker og lang levetid.
- 3) **AC-generator asynkron:** Fungerer i direkte drevne vindturbiner.

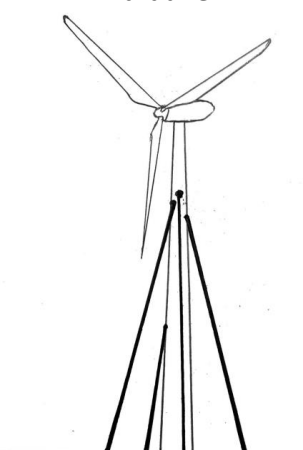
Propelltårn

Tabell 6.8: Løsningsalternativ og evaluering av propelltårn.

Skisse	Løsningsalternativ	Positivt	Negativt
	Rundt (rør)	Estetisk, gjør lite ut av seg. Reduserte spenningskonsentrasjoner.	Utsatt for knekking.
	Trekantet (fagverk)	Sterk konstruksjon	Tar stor plass, visuelt ikke estetisk.
	Firkantet (fagverk)	Sterk konstruksjon	Tar mye plass og er ikke estetisk

Fundament og innfesting

Tabell 6.9: Løsningsalternativ og evaluering av fundamentet og innfestningen til vindturbin-tårnet

Løsningsalternativ	Beskrivelse	Positivt	Negativt
1. Barduner 	<p>Wire som støtter vindturbinen når wire blir strekt. Kan også brukes til å vippe tårnet opp og ned.</p>	<p>Solid mot sterke vinder i motsatt regning av bardun-festet, og kan brukes til å vippe vindturbinen ned ved behov.</p>	<p>Krever et stort areal på bakken til forankring av bardunene.</p>
2. Betong med skruer	<p>Betongelement som tårnet boltes fast i. Tårnet må da være sveiset til en bunnplate eller liknende.</p>	<p>Enkel konstruksjon, kan passe på ulike typer underlag og betongen kan byttes ut med fjell</p>	<p>Høye spenninger i innfestingen mellom tårn og fundament</p>
3. Brukertilpasset	<p>Brukertilpasset montering av tårnet</p>	<p>Gjør at vindturbinen er fleksibel og kan monteres på alle typer underlag</p>	<p>Kostbart å produsere mange ulike typer fundament og forankringer</p>
4. Standard-fundament	<p>Et standard fundament som tårnet festes til. Kan være forsterket med flenser på siden av tårnet for forsterkning</p>	<p>Mindre kostbart å masseprodusere en standard løsning. Kan festes til blant annet både støpt grunn (betong) eller fjell.</p>	<p>Begrenser brukertilpassingen.</p>
5. Kombinasjon standard-fundament og barduner	<p>Kombinasjon av et forsterket standard fundament og barduner.</p>	<p>Sterk konstruksjon, høy sikkerhet. Bardunene kan festes ved behov, f.eks. værutsatte områder. Bardunene kan også brukes til å vippe vindturbinen opp og ned for vedlikehold eller beskyttelse ved ekstremvær.</p>	<p>Mer kompleks løsning.</p>

6.4 Tidlig material- og kjemidrøfting

I denne delen vil det bli gjort tidlige vurdering knyttet til materialer og overflatebehandling av vindturbinen. Vindturbinen vil bli utsatt for høye kraftbelastninger fra vinden, likeledes eksponert for partikler, fukt og kjemiske stoffer som kommer med vind og vær og er belastende på overflate-materialene i vindturbinen.

Turbinblad:

Turbinbladene skal helst ha lav vekt, være elastisk, men samtidig sterke mot bøying. Det vil gjerne bli en sammensetning av ulike materialer som karbon, glassfiber eller polymerer. Det kan også være mulig å bruke mer miljøvennlige alternativ som treverk i turbinbladene. Bladene er utsatt for slitasje og erosjon når de står og beveger seg i vinden, det er derfor viktig at de har en motstandsdyktig overflate, slik at produktet får en lang levetid.

Nacelle og nesekjegle:

Disse elementene har de samme oppgavene i vindturbinen, å redusere turbulens og samtidig beskytte indre komponentene mot fuktighet og andre belastninger. For nacelle og nesekjegle kan glassfiber med overflatebehandling være et alternativ.

Tårn:

Turbintårnet vil bli utsatt for store trykk og bøyepenninger, og må tåle å holde turbinen oppreist i kraftige vinder. Materialene i tårnet bør være elastisk og sterk, samtidig tåle å være i vind og vær i mange år. Det er ikke viktig at tårnet har lav vekt, da det står forankret i bakken og skal ikke flyttes på. Materialene som kan være gode alternativ for tårnet kan være galvanisert stål, eller eventuelt mer miljøvennlig som treverk.

Fundament:

Fundamentet skal holde hele konstruksjonen oppreist. For fundamentet festet til bakken kan galvanisert stål være et godt alternativ, og hvis vindturbinen skal settes på jordbunn kan det brukes betong til å forankre fundamentet til jordbunnen. Hvis turbinen skal ha barduner bør disse være wire med oppheng i rustfritt stål.

I forhold til overflatebehandling og coating er det viktig å ta hensyn til forurensning. Skal dette brukes må det ta høyde for hva som skjer når vindturbinen blir slitt og coatingen havner i naturen.

6.3 Tidligvurdering av brukspåkjenninger

I denne delen av rapporten skal det gjøres grove betraktninger rundt brukspåkjenningene på vindturbiner, og hvilke hensyn som må tas for at produktet skal ha en lang levetid og være skånsom mot natur og miljø.

Vindturbinen vil bli belastet med dynamiske belastninger som svingninger og vibrasjoner fra vinden og varierende belastninger, som over tid fører til utmatting. Drivverket og de roterende komponentene i vindturbinen vil også ha en begrenset levetid på grunn av slitasje og utmatting. Hvor lang levetid vindturbinen og komponentene har bestemmes av hvor godt balansert og stabilisert vindturbinen er, samt hvor godt den fjærer av de vekslende spenningene.

Vindturbinen vil blant annet bli utsatt for partikler fra luften, insekter, salt, nedbør, frost, sterk vind og UV-lys, som kan forårsake korrosjon og erosjon på overflatematerialene. Spesielt utsatt for dette er turbinbladene, og spesielt den siden av bladet som bryter vinden i rotasjonen. Figur 6.2 illustrerer et turbinblad på en storskala vindturbin, hvor overflaten er erodert. Dette er et anerkjent problem innenfor vindkraftindustrien, hvor partikler av plast, glassfiber og kjemikalier fra erosjonen havner i naturen.



Figur 6.2: Illustrasjon av erosjon på vindturbinblad, i forkant. Dette området på bladet er spesielt belastet, og partiklene fra turbinbladet havner ute i naturen [55].

7 EGENSCREENING OG KONSEPTVALG

I dette kapitlet screenes løsningsalternativene gjennom kriterium og vektinger i seleksjonsmatriser fra Pugh's metodikk. Alternativene karakterettes, og sammen med vektingen avgjør dette hvilke løsninger som svarer best til produktmålene.

7.1 Seleksjonsmatrise

På bakgrunn av Pugh's metodikk (jfr. delkapittel 3.2, s.27) og poengskalaene i figur 3.4, side 27, utformes seleksjonsmatriser for hver av løsningene, der alle alternativene listes opp. Vektingen av produkttegenskapene baserer seg på viktigheten ved hver av løsningene, og sammen med karaktersettingen avgjøres det hvilke alternativer som svarer best til de ønskede produkttegenskapene.

Skalaene går fra 1-5 poeng, og midten av begge skalaene, med poeng 3 angir a) kriteriet er viktig, men ikke så viktig at det skal være utslagsgivende og b) løsningen svarer bra på kriteriet, men ikke godt nok til å være utslagsgivende. For mer detaljert rundt poengskalaen, se figur 3.4, kapittel 3.2, side 27.

7.2 Egenscreening av løsningsalternativer

Tabell 7.1: Seleksjonsmatrise for rotasjonsakse.

Rotasjonsakse			
Kriterium	Vekting	HAWT	VAVT
Kompleksitet	3	4	3
Robusthet	4	5	3
Brukervennlig	4	3	3
Effekt	5	5	2
Tåle vind og vær	5	3	2
Natur og fauna	5	2	2
Akustikk	3	3	4
Sum		103	75

HAWT er den løsningen som kommer best ut fra denne vektete evalueringen. Dette er hovedsakelig på grunn av størrelse og virkningsgrad. Det vil kreve et mindre areal for å få en gitt mengde effekt, sammenliknet med VAWT. Dette gjør også at turbinen blir mer robust, har bedre effekt, tåler sterk vind bedre som følge av et mindre sveipeareal.

Tabell 7.2: Seleksjonsmatrise for funksjonsalternativene motvind eller medvind.

Medvind eller motvind			
Kriterium	Vekting	Motvind	Medvind
Kompleksitet	3	3	4
Effekt	5	5	3
Akustikk	3	3	2
Sum		43	33

Det er HAWT designet for motvind som kommer best ut av analysen.

Tabell 7.3: Seleksjonsmatrise for antall propeller.

Antall propeller					
Kriterium	Vekting	1	2	3	4
Kompleksitet	3	4	3	2	2
Modularisering	3	3	4	5	4
Robusthet	4	4	3	3	2
Vedlikehold	3	4	3	3	2
Effekt	5	3	3	4	5
Akustikk	3	2	3	3	2
Sum		70	66	71	63

Det er 3 vindturbiner som kommer best ut av analysen. Dette avgjøres hovedsakelig av kriteriet for modularisering og på bakgrunn av resultater fra markedsanalysen, der tidligere forsøk har vist at fire propeller har en positiv innvirkning på hverandre. Det kan være spennende å undersøke om det samme gjelder 3 propeller. Derfor ble effekten satt litt høyere ved dette antallet propeller enn 1 og 2. Det er kun ett poeng som skiller 1 og 3 propeller fra hverandre, så basert på modulariseringsprinsippet, skal det senere i utviklingen redegjøres for muligheter til å tilpasse antall propeller etter behov.

Tabell 7.4: Seleksjonsmatrise for antall blad i propellen(e).

Antall blad							
Kriterium	Vekting	1	2	3	4	5	6
Kompleksitet	3	3	4	4	3	3	2
Modularisering	4	1	2	3	3	4	4
Robusthet	4	2	3	4	4	4	4
Mobilitet og frakt	2	1	2	3	3	3	3
Effekt	5	3	3	4	3	3	3
Estetikk	3	2	2	3	2	2	2
Akustikk	3	2	3	4	4	4	4
Sum		50	66	87	76	77	77

Resultatet fra denne vektete evalueringen ble 3 propellblad. Dette er et godt utprøvd design, og evalueringen er derfor utslagsgivende på lav kompleksitet, høy effekt og robusthet.

Tabell 7.5: Seleksjonsmatrise for løsningsalternativer for bladdesign.

Bladdesign								
Kriterium	Vekting	1	2	3	4	5	6	7
Kompleksitet	3	4	2	-	-	3	1	5
Robusthet	4	4	2	2	3	3	4	4
Mobilitet/frakt	2	-	-	2	3	3	-	-
Effekt	5	4	2	4	2	5	4	3
Tåle kraftig vær og vind	5	3	2	2	3	3	5	4
Estetikk	3	4	2	5	2	5	3	3
Sum		75	40	57	49	82	73	75

I denne vektete seleksjonsmatrisen er det flere alternativer som skårer høyt, som er uavhengig av hverandre. Derfor trekkes det frem flere vinnere. I alternativ 1, som er at bladet er løft-basert (egentlig

kombinasjon) er foretrukket fremfor et drag-basert design. Videre er et langt og smalt vingedesign mer å foretrekke fremfor et kort og bredt. Alternativ 5, krummet/vridd blad får høy poengskår. Denne vil være med å bidra til et godt lift/drag forhold i alternativ 1. Alternativ 6 og 7 handler først og fremst om oppbremsing ved kraftig vind, og å gjøre propellene robuste og sikre. Vinneren her er et propellblad som er mykt og bøyelig som gir etter ved høy vindhastighet, og som fordeler spenningene i bladet gjennom å være elastisk, men det ene alternativet utelukker nødvendigvis ikke det andre.

Tabell 7.6: Seleksjonsmatrise for nav, og innfesting av propellblad.

Nav og innfesting av propellblad				
Kriterium	Vekting	1	2	3
Kompleksitet	3	4	4	3
Modularisering	4	1	4	3
Robusthet	4	1	3	5
Brukervennlig	4	3	4	3
Sum		32	56	53

I denne seleksjonsmatrisen er det alternativ 2, mange festepunkter i front av nav, som kommer best ut. Denne åpner opp for muligheter til modularisering, hvor det kan tilpasses antall propellblad etter behov, og fordeler kreftene på flere punkter. Denne løsningen er også brukervennlig, enkel å montere og skifte ut blader ved behov. Er det ikke bruk for modularisering av turbinbladene, vil alternativ 3 være et bedre system, da det tillater pitching av turbinbladene.

Tabell 7.7: Seleksjonsmatrise for Nacelle-løsning og nesekjegle.

Nacelle og nesekjegle					
Kriterium	Vekting	1	2	3	4
Kompleksitet	3	2	3	4	3
Robusthet	4	4	2	-	-
Effekt	5	3	3	4	2
Tåle kraftig vind og vær	5	2	4	4	3
Elektrisitet	5	1	3	-	-
Estetikk	3	1	4	4	2
Sum		55	79	64	40

De alternativene som kommer best ut av denne seleksjonsmatrisen er alternativ 2, en lukket nacelle løsning og alternativ 3, en nesekjegle i front av navet.

Tabell 7.8: Seleksjonsmatrise av løsningsalternativer for generator.

Generator				
Kriterium	Vekting	DC	AC synkron	AC Asynkron
Robusthet	4	2	3	3
Vedlikehold	3	2	4	3
Effekt	5	2	4	3
Kompleksitet	3	4	3	2
Sum		36	53	42

Det er synkrongeneratoren som kommer best ut av denne seleksjonsmatrisen. Denne generatoren generere spenning med frekvens som er proporsjonal med turtallet til rotoren. Den fungerer godt i direkte drevne vindturbiner. De er mer effektive, krever mindre vedlikehold enn likestrøms-generatoren. Ulempen er at den er dyrere, men dette kompenseres for i driftssikkerhet og lang levetid.

Tabell 7.9: Seleksjonsmatrise av løsningsalternativer for propelltårn.

Propelltårn				
Kriterium	Vekting	1	2	3
Mobilitet/frakt	2	4	3	3
Vedlikehold	3	4	3	3
Brukervennlig	4	3	3	3
Kompleksitet	3	4	3	2
Robusthet	4	3	3	4
Sum		56	48	49

Det er alternativ 1, sylinder eller rørformet propelltårn som skårer høyest i denne seleksjonsmatrisen.

Tabell 7.10: Seleksjonsmatrise av løsningsalternativer for fundament og innfesting av propelltårn.

Fundament og innfesting						
Kriterium	Vekting	1	2	3	4	5
Kompleksitet	3	2	3	1	4	3
Robusthet	4	4	3	3	3	4
Vedlikehold	3	4	2	3	3	4
Estetikk	3	2	2	4	3	3
Sum		40	33	36	42	46

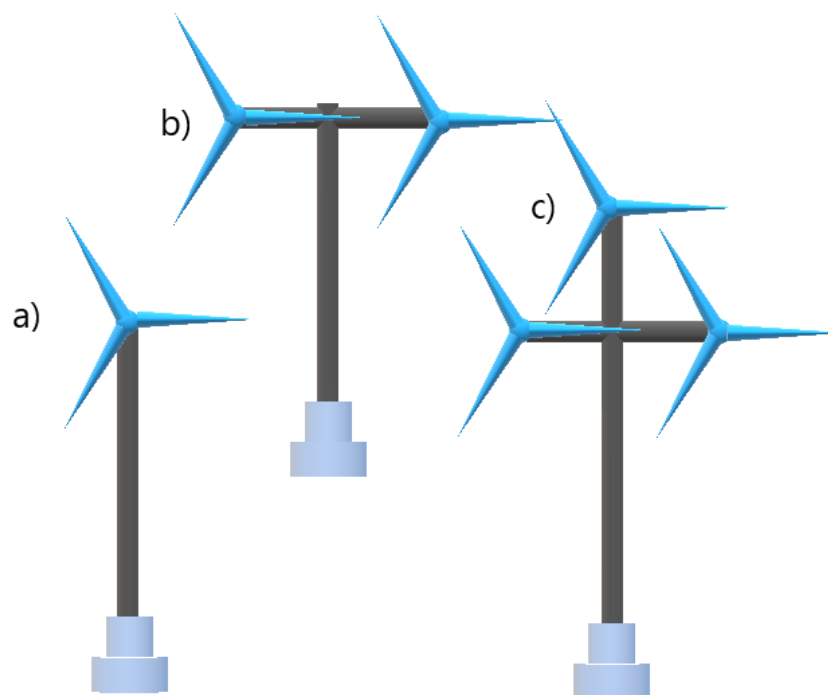
I denne vektete seleksjonsmatrisen er det en kombinasjons-løsning for fundament og innfesting som kommer ut med høyest score.

7.3 Modularisering

I dette delkapittelet vurderes det før løsninger som implementerer modularisering i produktutviklingen. For forbrukere vil det variere hvor mye elektrisitet det er behov for, samt at det vil variere i mengde vindressurser, etter hvor turbinen skal oppføres. Gjennom bruk av modularisering, kan vindturbinen spisses mer mot spesifikke kundebehov og vindforhold i områdene vindturbinen skal stå. I egenscreeningen, kapittel 7.2, var det to funksjonsalternativer som ga gode muligheter for å implementere modularisering inn i produktet; antall propeller og antall blader.

Antall propeller

Ved å variere sveipearealet gjennom å variere antall propeller, for eksempel én, to eller tre propeller vil produktet dekke en større kundegruppe. Hvis én modul inneholder turbinblader, hub, drivverk og generator, samt en nacelle, kan dette settes sammen og fungere som en modul. Dersom en modul produserer 5 kW elektrisitet, kan da effekten på vindturbinen øke til 10kW eller 15kW, dersom modulene kombineres. Videre skisseres opp ulike metoder å kombinere propellene på, se følgende figur 7.2.



Figur 7.1: Modularisering av antall propeller på vindturbinen.

Antall blader

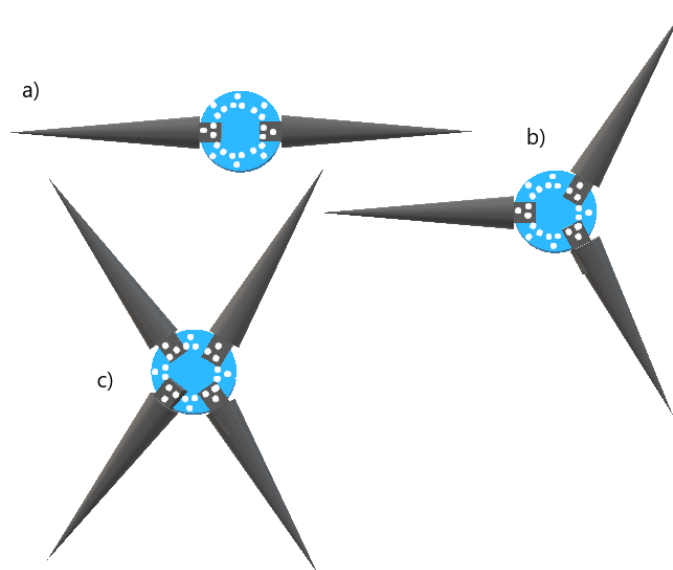
En annen mulighet å tilpasse vindturbinen på, kan være gjennom å variere antall blader i hver propell. Dette vil variere rotasjonshastigheten til propellen, og dermed kan turbinen tilpasses ulike vindforhold og kundebehov. I egenscreeningen var det tre blader som fikk størst poengscore, og hovedgrunnen til dette er at det er det laveste antallet blader, der propellen er både balansert og stabil.

Ved ett blad er propellen ubalansert, noe som gjør at den vil være krevende å få i gang. Løsningen for dette er å balansere propellen med en motvekt, men ulempen med dette er blant annet lite effektiv materialbruk.

Ved å gå fra ett blad til to, så vil propellen være balansert – men ikke stabil. Det er krevende å rotere (yaw-rotasjon) propellen mot vinden, når vinden dreier, på grunn av det varierende treghetsmomentet når bladene står horisontalt og vertikalt. Dette kan føre til ujevn rotasjonsbevegelse, og dermed svingninger i hele tårnet til turbinen. Får å kompensere for dette kan det gjøres gjennom fjærer bak bladene eller ekstra stabilitet i tårnet og de andre komponentene i vindturbinen.

Til tross for disse ulempene er det også fordeler som simplisitet og materialkost ved to blader, og i småskala vindturbiner er kreftene mer begrenset og lettere å kompensere for i sammenlikning med de største vindturbinene.

I teorien kan en turbin være aerodynamisk optimalt designet, med hvilket som helst antall blader. Alle ulike antall blader kan ha samme effektivitet, bare bredden på bladet eller rotasjonshastigheten tilpasses antallet. Jo flere blader, jo smalere må bladene være, og/eller jo saktere roterer propellen. Ulempen når det blir mange smale blader er at det blir krevende å stive opp bladene, og dermed er materialbruken ugunstig. Derfor, ved flere enn tre blader er gjerne materialbruk, tilvirkningstid og monterings-kostnader høyere enn de trenger å være.



Figur 7.2: Modularisering av antall blader på propellen.

For videre arbeid vil det bli brukt modularisering av antall propeller på vindturbinen. Det vil ikke bli videreført modularisering av antall propellblad, grunnet overnevnte ulemper med å variere antall blader.

7.4 Konsept

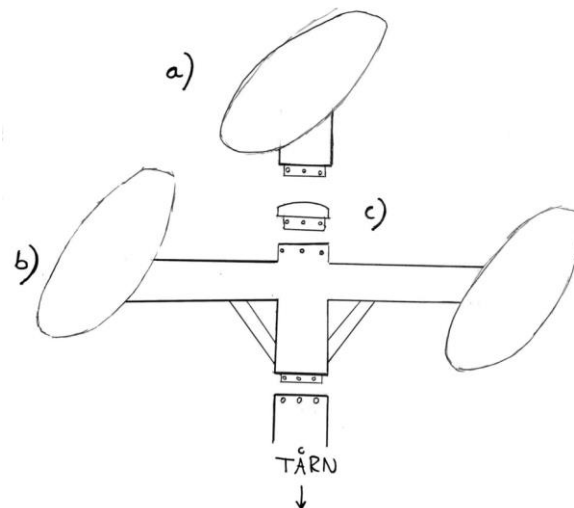
I dette delkapittelet presenteres de foretrukne løsningene for konseptet. Først presenteres de foretrukne løsningene og deretter presenteres en helhetlig skisse av konseptet. For videre beregninger og analyser er det dimensjoner på propell og sveipeareal, tårn, aksel og generator som skal utvikles videre.

Motvind HAWT

For å få høyest mulig virkningsgrad er det basert på litteratur og konkurrerende konsepter valgt at vindturbinen skal være en HAWT som er designet for motvind. Dette er det mest utbredte designet på vindturbiner og har vist seg å ha en totalvirkningsgrad på 45-50%, noe som de andre løsningsalternativene ikke har oppnådd.

Antall propeller og modularisering

For antall propeller er løsningen basert på prinsippet om modulering, der det kan være én, to eller tre propeller. Dette gir muligheten til å tilby kunden 5, 10 eller 15 kW effekt i vindturbin, og kan dermed spisses mot kundens ønsker og behov. Dette betyr at det vil bli produsert to ulike moduler a) og b), se figur 7.3. Disse modulene vil kunne stå alene (for én eller to propeller) eller kombineres (for tre propeller). Modulene festes på et standard tårn. Hvis kun modul b) skal stå alene, vil det bli designet et lokk c) som festet til toppen for å lukke tårnet.



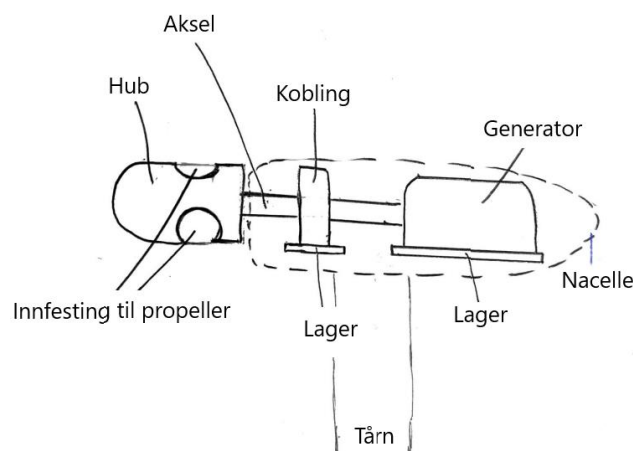
Figur 7.3: Konsept for antall propeller, der a) er 1 propeller og b) er to propeller. Modulene kan kombineres for å få 3 propeller. Skal det være 2 propeller settes lokket c) på toppen.

Propell

Løsningen for propellen er at den er tre-bladet og innfestingen blir i siden av en hub med et design som muliggjør pitching av bladene. Dette gjør at vindturbinen kan redusere arealet på bladene som står vinkelrett på vindretningen, for å redusere rotasjonshastigheten og belastningen på propellen ved sterk vind. Hubben designes slik at den også fungerer som nesekjegle som leder vinden ut mot bladene slik turbulensen rundt innfestingen og nacellen reduseres.

Drivverk og generator

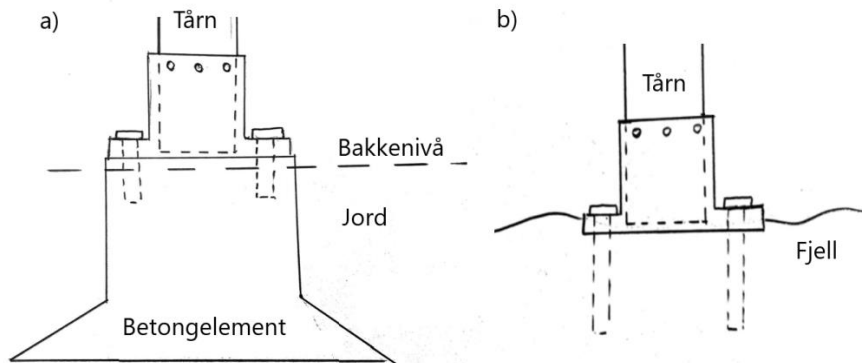
Løsningen for drivverket på vindturbinen er at den skal være direkterevet. Hubben er festet til en aksel, som videre koples inn på en generator. Det vil ikke bli gjort noen utvikling eller dimensjonering av drivverket, men det baseres utelukkende på eksisterende deler. Generatoren som blir brukt er en synkrongenerator som tillater lave rotasjonshastigheter. Dette betyr at det ikke vil være nødvendig med gir, som bidrar til redusert behov for vedlikehold.



Figur 7.4: Systemtegning av vindturbin med benevninger.

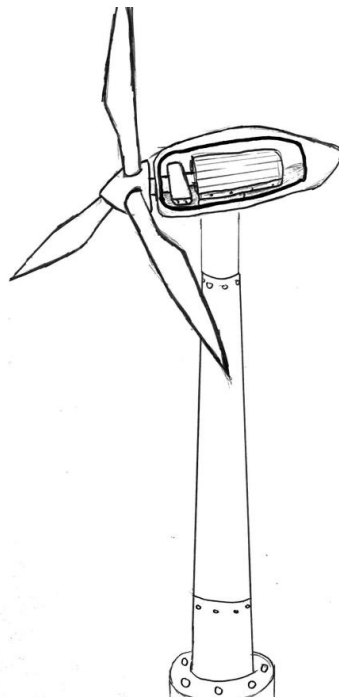
Tårn og fundament

Det vil bli brukt et standard fundament, som kan enten boltes til fjell eller til for eksempel et betongelement senket i jorden. Hvis det er behov, eksempelvis når det er flere moduler koplet på vindturbinen, vil kan det også bli brukt barduner for å støtte tårnet og fundamentet under store belastninger

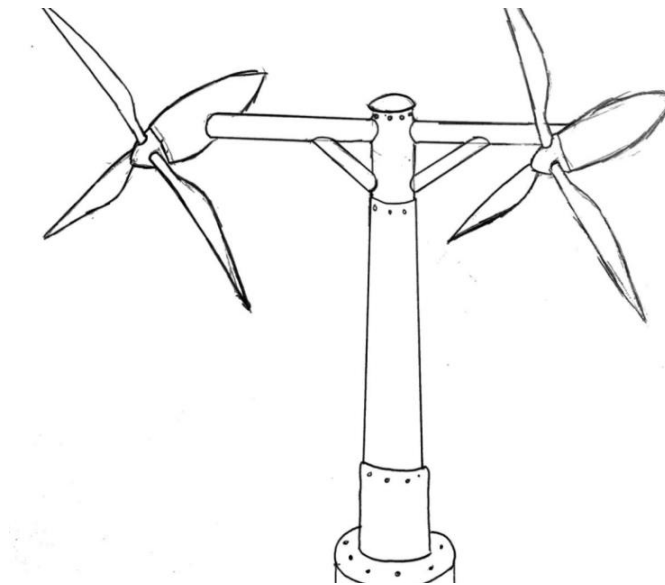


Figur 7.5: Skisse av to alternative løsninger for fundament, som bruker samme standardfundament med to ulike innfestinger til bakken, der a) er løsning for fundament på jord og b) er løsning for fundament festet til fjell.

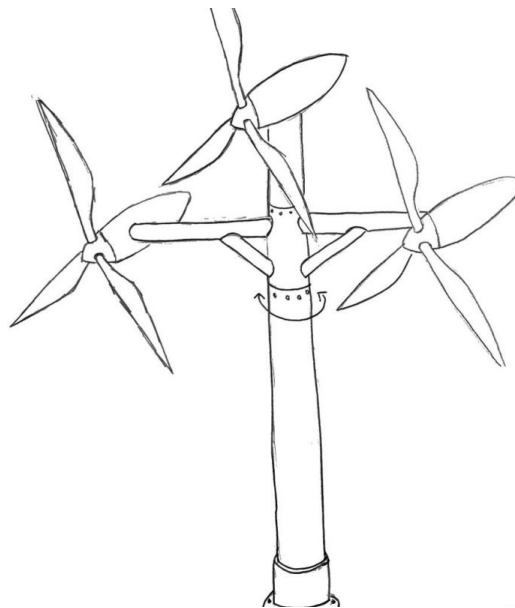
Helhetsskisse



Figur 7.6: Helhetsskisse av konsept med én propell. Utskjæring i nacelle viser aksel, kopling, lager og generator.



Figur 7.7: Helhetsskisse av konsept med modul b), to propeller.



Figur 7.8: Helhetsskisse der modul a) og b) er satt sammen slik at vindturbinen får tre propeller.

Det er tårnet som må tilpasses for de ulike løsningene. Belastningen på tårnet øker når antall propeller øker, og dermed må tårnet styrkes med f.eks. et tykkere tårn eller støttestrukturer som flenser og barduner.

For at vindturbinen skal kunne rotere mot vinden, må rotasjonspunktet være under innfestingen til den horisontale strukturen som holder det doble propellsettet, eventuelt at strukturen som holder de to nederste modulene kan rotere rundt tårnstammen.

8 GRUNNLAGSBEREGNINGER

I dette kapitlet gjennomføres grove betraktninger og enkle beregninger for å få et inntrykk av størrelser, krefter, momenter og andre forhold som vil kunne være med på å påvirke dimensjoneringen og modelleringen av vindturbinen.

8.1 Beregningsmål

I denne delen kartlegges målene for grunnlagsberegningene, og hvilke forutsetninger som settes for beregningene.

Hovedmål

Målet med grunnlagsberegningene er å gjennomføre generelle basisberegninger på sveipeareal og effektforhold. Dette gir et inntrykk av hvor store dimensjoner vi må opp i for å få ønsket effekt. Videre er målet å få en grov oversikt over hvilke belastninger vindturbinen blir utsatt for, hovedsakelig tårn og fundament.

Delmål

- Studere effektforhold og grove bladdimensjoner i forhold til vindkraft.
- Undersøke krefter, moment og spenninger i tårnet.
- Legge til sikkerhetsfaktorer til beregningene, for å legge grunnlag for dimensjonering og materialvalg.

Forutsetninger

- Ser bort fra turbulenseffekter i tidlige grovberegninger.
- Virkningsgraden baseres på antakelser.

8.2 Beregninger

Sveipeareal og effektkurve

Det er satt et produktkrav til vindturbinen om at den skal levere 5kW elektrisk effekt (P_{el}), samtidig er det satt metrisk grovspesifikasjon på rotordiameteren til 3 meter. For å finne ut hvor stor vindturbinen må være for å levere denne effekten må den totale virkningsgraden til turbinen beregnes. For å beregne denne er følgende antakelser gjort:

- Virkningsgraden på propell: $C_p = 0,5$
- Virkningsgraden på generator: $\eta_{gen} = 0,9$
- Virkningsgraden på inverter: $\eta_{inv} = 0,94$

Videre kan vi ved hjelp av formel (8) beregne virkningsgraden:

$$\eta_{tot} = C_p \eta_{gen} \eta_{inv} = 0,5 \cdot 0,9 \cdot 0,94 = \mathbf{0,44}$$

Fra den ønskede elektriske effekten P_{el} , kan vi da ved hjelp av den totale virkningsgraden finne hvor stor potensiell effekt vinden må ha for at vindturbinen skal levere 5 kW elektrisk effekt:

$$P_1 = \frac{P_{el}}{\eta_{tot}} = \frac{5000}{0,44} = 11364 \text{ W} \approx \mathbf{11,4 \text{ kW}}$$

For å avgjøre hvor rotordiameteren turbinen må ha for å oppnå ønsket effekt, settes den nominelle vindhastigheten som skal gi ønsket effekt til 10 m/s. Da blir sveipearealet følgende:

$$A_s = \frac{P_1}{\frac{1}{2}\rho v^3} = \frac{11364}{\frac{1}{2} \cdot 1,2 \cdot 10^3} = 18,9 \text{ m}^2$$

$$D = \sqrt{\frac{4 \cdot A_s}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 18,9}{\pi}} = 4,91 \text{ m}$$

Denne rotordiameteren er nesten 2 meter større enn det som ble satt i metriske grov-spesifikasjoner i kapittel 5.4, tabell 5.3. Der ble rotordiameteren satt til 3 m. **For å komme nærmere den ønskede verdien, settes rotordiameteren til 4 m**, og videre undersøkes effekten ut ifra dette ved ulike vindhastigheter:

Arealet ved rotordiameter på 4 m:

$$A_s = \frac{\pi \cdot D^2}{4} = \frac{\pi \cdot 4^2}{4} = 12,57 \text{ m}^2$$

Da blir P_1 ved 10 m/s:

$$P_1 = \frac{1}{2}\rho A_s v^3 = \frac{1}{2} \cdot 1,2 \cdot 12,57 \cdot 10^3 = 7542 \text{ W}$$

$$P_{el} = P_1 \eta_{tot} = 7542 \cdot 0,44 = 3314 \text{ W} \approx 3,3 \text{ kW}$$

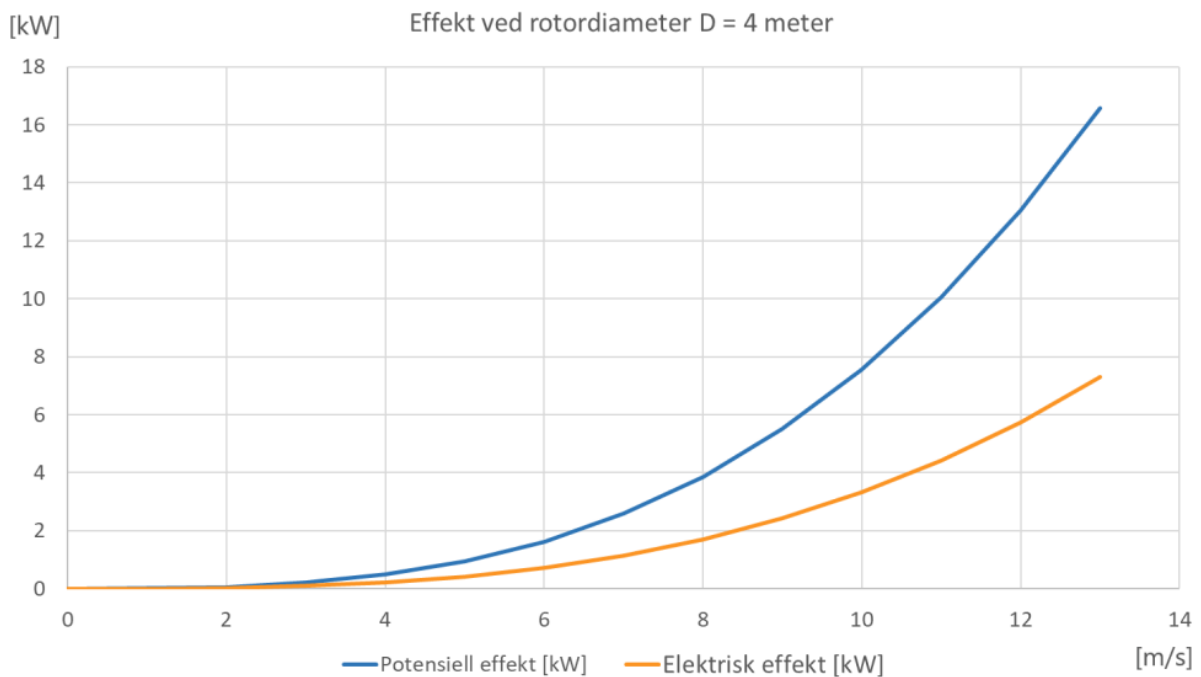
Videre presenteres resultatene av beregningen av potensiell effekt i vinden (P_1) og den elektriske effekten (P_{el}) ved ulike vindhastigheter:

Tabell 8.1: Utregninger av effekter ved en rotordiameter på 4 meter, og med én propell. I gult er det markert området for vindhastighet som gir 5 kW.

Vind [m/s]	Areal [m ²]	Massetetthet luft [kg/m ³]	Total virkningsgrad	Potensiell effekt [kW]	Elektrisk effekt [kW]
0	12,57	1,2	0,44	0,00	0,00
1	12,57	1,2	0,44	0,01	0,00
2	12,57	1,2	0,44	0,06	0,03
3	12,57	1,2	0,44	0,20	0,09
4	12,57	1,2	0,44	0,48	0,21
5	12,57	1,2	0,44	0,94	0,41
6	12,57	1,2	0,44	1,63	0,72
7	12,57	1,2	0,44	2,59	1,14
8	12,57	1,2	0,44	3,86	1,70
9	12,57	1,2	0,44	5,50	2,42
10	12,57	1,2	0,44	7,54	3,32
11	12,57	1,2	0,44	10,04	4,42

12	12,57	1,2	0,44	13,03	5,73
13	12,57	1,2	0,44	16,57	7,29

Fra utregningene i tabellen ser vi at for å oppnå en elektrisk effekt på 5 kW, må vindhastigheten være mellom 11 m/s og 12 m/s når rotordiameteren er 4 meter. Dette er grove og forenklete utregninger, og det er grunn til å anta avvik mellom disse teoretiske beregningene og virkeligheten. Videre presenteres resultatene i et diagram.



Figur 8.1: Diagram som viser hvordan kurvene for potensiell effekt (blå) og elektrisk effekt (oransje) opptrer ved økende vindhastighet.

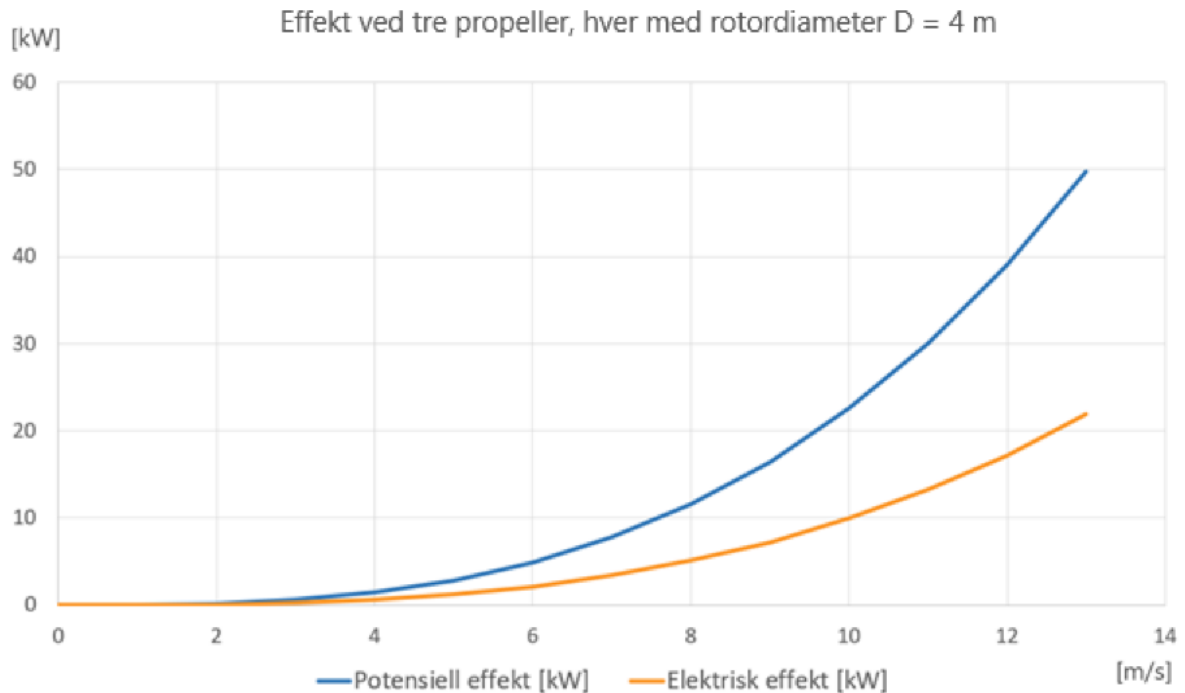
Til tross for at det kreves vindhastighet mellom 11 og 12 m/s for å oppnå ønsket nominell effekt, så **velges det å bruke rotordiameter på 4 m.**

Tre moduler:

Ved tre propeller vil sveipearealet bli tre ganger så stort, og den ønskede elektriske effekten 15 kW. Dette gir tilsvarende krav om en vindhastighet på mellom 11 og 12 m/s. Nedenfor presenteres dette i tabell og diagram.

Tabell 8.2: Effektutregning av vindturbinen med 3 moduler, i tabellen er det presentert effektene ved vindhastigheter på 11 m/s og 12 m/s.

Vind [m/s]	Areal [m ²]	Massetetthet luft [kg/m ³]	Total virkningsgrad	Potensiell effekt [kW]	Elektrisk effekt [kW]
11	37,71	1,2	0,44	30,12	13,25
12	37,71	1,2	0,44	39,10	17,20



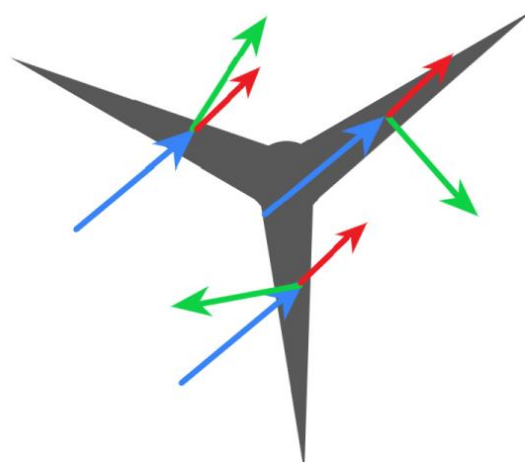
Figur 8.2: Diagram som viser hvordan kurvene for potensiell effekt (blå) og elektrisk effekt (oransje) opptrer ved økende vindhastighet når vindturbinen har 3 moduler.

Statiske belastninger

For å få et innblikk i de statiske belastningene må vi finne ut hvilke krefter som virker på vindturbinen. Det vil kun bli gjort beregninger ved én turbinmodul på tårnet.

Den horisontale vindkraften som treffer vindturbinen kan deles i to samlede krefter. Kraftene som treffer propellbladene, har et angrepspunkt midt i rotasjonsaksen til propellen (V_1) (når det er tre blader). Den andre kraften kommer fra den horisontale vinden som treffer tårn-konstruksjonen (V_2).

Når vinden treffer propellen dekomponeres kreftene til dragkraft (horisontal kraft) og løftkraft (tangential kraft). Dragkraften er parallell med vindretningen. Løftkraften er tangentiell i rotasjonsplanet, 90° på vindretningen. Det er løftkraften som skaper rotasjonen i propellen.



Figur 8.3 som illustrerer hvordan vindkraften (blå) dekomponeres til parallell dragkraft (rød) og tangentiell løftkraft (grønn).

For å beregne vindkreftene som virker vinkelrett på vindretningen, altså dragkraften, kan formel (6) brukes:

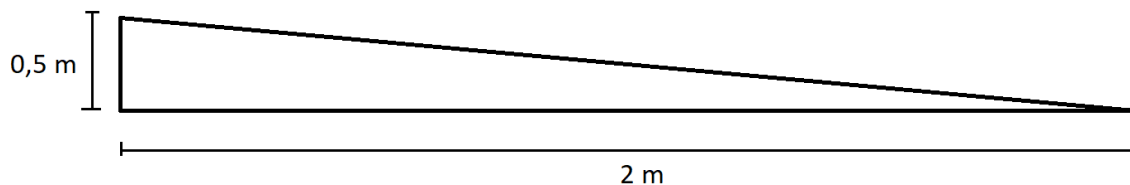
$$F_D = V = \frac{1}{2} \rho A v^2 C_D$$

V er horisontal thrustkraft bakover, som gir bøyning av tårnet, A står for det projiserte arealet av elementene som blir truffet og C_D er drag-koeffisienten. Størrelsen på drag-koeffisienten bestemmes av formen på elementet vinden beveger seg forbi. På grunn av usikkerhet omkring drag-koeffisienten, settes denne til 1 i beregningene på propellen og tårnet. Det er lite sannsynlig at drag-koeffisienten vil overstige denne verdien i realiteten, da formene er runde og skaper lite turbulens i motsetning til en flat vegg.

Vindkraften kan også beregnes ut ifra trykket multiplisert med Arealet vinden trykker på, utledet fra formel (2):

$$V = pA$$

For bladene kan vi forenklet estimere et projisert areal, ved bruk av trekanten. Vi vet at lengden på bladet skal være ca. 2 meter. Arealet på propellen som står vinkelrett på vindretningen estimeres ved hjelp av en lang, rettvinklet trekant:



Figur 8.4: Et antatt og forenklet projisert areal av turbinblad

Totalt areal ved tre blader estimeres videre til:

$$A_{3xblad} = \frac{1}{2} \cdot 0,5 \cdot 2 \cdot 3 = 1,5 \text{ m}^2$$

I tillegg til propellene vil også vinden treffe hub og nacelle. Dette projiserte arealet tar utgangspunkt i en diameter på hubben på 0,3 m:

$$A_{hub} = \pi \cdot 0,15^2 = 0,07 \text{ m}^2$$

Totalt projisert areal for propellen blir:

$$A_{propell} = A_{3xblad} + A_{hub} = 1,57 \text{ m}^2$$

For tårnet er høyden ca. 12 meter og diameteren estimeres til 0,24 m. Dette gir et projisert areal:

$$A_{tårn} = 0,24 \cdot 12 = 2,88 \text{ m}^2$$

For å estimere kreftene som virker på propellen og tårnet er det fordelaktig å bruke høy vindhastighet. Vindhastigheten settes til 25 m/s, som defineres som storm i Beaufort vindskala. Vindhastigheten settes høyt, fordi det er ønskelig at vindturbinen skal tåle store belastninger, stå på værutsatte steder og ha lang levetid. Dermed blir vindkreftene som virker vinkelrett på rotasjonsplanet til propellen følgende:

Fra formel (2) defineres det at kraft (F) er det samme som trykk (p) multiplisert med et areal (A):

$$F = p A$$

Videre viser bernoulliligningen (3) at dynamisk trykk er følgende:

$$p = \frac{1}{2} \rho v^2$$

Fra formel (2) og (3) kan vindkraften som treffer vindturbinen beregnes som følgende, der V_1 er kraft på propellen og V_2 er kraften på tårnet:

$$V_1 = \frac{1}{2} \rho v^2 A_{propell} = \frac{1}{2} \cdot 1,2 \cdot 25^2 \cdot 1,57 = 588,75 \text{ N} \approx \mathbf{0,6 \text{ kN}}$$

$$V_2 = \frac{1}{2} \rho v^2 A_{tårn} = \frac{1}{2} \cdot 1,2 \cdot 25^2 \cdot 2,88 = 1080 \text{ N} \approx \mathbf{1,1 \text{ kN}}$$

For å finne momentet i bunn av tårnet må vi vite hvilke høyder kreftene virker på. Angrepspunktet vil V_1 er midt i hubben, som settes til 12 meter over bakkenivå (H). V_2 kan ses på som en jevnt fordelt last, men fordi vinden som regel er kraftigere med økt høyde, så settes angrepspunktet $2/3$ av hubhøyden (h); 8 meter.

Momentet i bunn av tårnet (i fundamentet) blir da fra formel (10):

$$\curvearrowright M_{fundament} = V_1 \cdot H + V_2 \cdot h = 0,6 \cdot 12 + 1,1 \cdot 8 = \mathbf{16 \text{ kNm}}$$

For å finne ut hvilke dimensjoner tårnet skal ha, må vi se på materiale og tillatt bøyespenning. I vedlegg 2 er det en tabell for tillatte belastninger for ulike materialer, belastningstyper og spenninger. For ståltypen S235 den tillatte bøyespenningen ($\sigma_{b,till}$) er mindre enn 75 MPa for belastningstype C, hvor det er lagt til sikkerhetsfaktorer for hurtig vekslende belastninger, se vedlegg 3, side II.

Vi vet fra likning (11) og (12) følgende:

$$I = \frac{M}{\sigma_{b,till}} y = \frac{\pi}{64} (d_y^4 - d_i^4), \text{ der } y = \frac{d_y}{2}$$

Hvis vi setter den ytre diameteren til 240 mm, og den indre diameteren til 220 mm, får vi følgende bøyespenning når momentet fremdeles er 16 kNm:

$$\sigma_b = \frac{M}{I} y = \frac{M}{\frac{\pi}{64} (d_y^4 - d_i^4)} \frac{d_y}{2} = \frac{16 \cdot 10^6 \cdot 240}{\frac{\pi}{64} (240^4 - 220^4) 2} = \mathbf{40,1 \text{ MPa}}$$

Dvs. at på bakgrunn av disse grove, forenklete beregningene vil det kun være nødvendig med 1 cm tykkelse på stålroret ved en ytre diameter på 24 cm. Dette gir en omtrentlig sikkerhet med faktor 2 i forhold til tillatt bøyespenning i belastningstype C.

Gjør vi en forenkling og sier at momentet vil bli 3 ganger så stort når alle tre modulene er koplet på vindturbinen får vi følgende bøyespenning:

$$\sigma_{b,3 \text{ moduler}} = \frac{3 \cdot 16 \cdot 10^6 \cdot 240}{\frac{\pi}{64} (240^4 - 220^4) 2} = \mathbf{120 \text{ MPa}}$$

Dette overstiger den tillatte bøyespenningen, men for det konseptuelle designet beholdes de satte dimensjonene på tårnet, da det kan forsterkes med barduner og/eller støttestrukturer på innsiden av røret.

Når det nå er gjort grove estimater og antakelser, kan presset som virker på propellen også beregnes. Dette kan være nyttig for å sammenlikne med videre simuleringer for å gi en innsikt i hvor godt beregningene samsvarer med de utregningene datamaskinen gjør.

Det projiserte arealet på turbinbladene ble estimert til $A_{3xblad}=1,5 \text{ m}^2$ som virker vinkelrett på turbinbladene, da blir arealet på ett blad:

$$A_{blad} = \frac{1}{2} \cdot 0,5 \cdot 2 = \mathbf{0,5 \text{ m}^2}$$

Dragkraften som virker på bladet blir dermed:

$$F_D = \frac{1}{2} \rho v^2 A_{blad} = \frac{1}{2} \cdot 1,2 \cdot 25^2 \cdot 0,5 = 187,5 \text{ N} \approx \mathbf{0,19 \text{ kN}}$$

Det er da den kraften vinden presser på bladet, som virker parallelt med vindretningen. Presset på turbinbladet blir følgende:

$$p_{blad} = \frac{F_D}{A} = \frac{187,5}{0,5} = \mathbf{375 \text{ Nm}^2}$$

9 EKSPERTTESTING OG INPUT

I dette kapitlet planlegges og gjennomføres eksperttesting, samt at det hentes input fra eksperter innenfor de respektive fagområdene. Hensikten med dette er å kvalitetssikre utrednings- og utviklingsarbeidet gjennom kommentarer og tilbakemeldinger på det gjennomførte arbeidet, i tillegg tips og råd for videre utviklingsarbeid.

9.1 Testmålsetninger

Det settes mål for eksperttestingen for at få oversikt over hva som skal testes, slik at de riktige personene blir kontaktet og at konseptet treffer hovedmålsetningen til produktet så godt som mulig. Ved å dele opp hovedmålet for testingen til delmål blir det mer konkretisert og ryddigere i dialogen med ekspertene.

Hovedmål:

Hovedmålet med eksperttestingen er å få tilbakemeldinger på det foreløpige konseptet og de betraktningene som har blitt gjort i utrednings- og utviklingsarbeidet. Videre undersøkes eventuelle forbedringer i konseptet og løsningsalternativene.

Delmål:

- Gjennomgå funksjonsanalyse og valg av løsningsalternativer og vurderingen av dem.
- Få tilbakemeldinger på egenscreening, både vekting og karaktersetning av løsningene.
- Gjennomgå grunnlagsberegningene og de forutsetningene og antakelsene som har blitt satt.
- Få innspill til videre finberegning
- Få råd og tips til FEM-analyser og simuleringer.
- Få innspill til produksjonsmetoder i forbindelse med modellering for realistisk design.

9.2 Ekspertgruppe

Ekspertgruppen som har blitt involvert i testingen er utvalgte ansatte ved NMBU.

Tabell 9.1: Oversikt over ekspertgruppe med tilhørende tittel og fagområde.

Navn	Tittel	Fagområde
Egil Stemsrud [56]	Senioringeniør	Statikk og beregninger
Henrik Folke Holmberg [57]	Senioringeniør	Konstruksjon og design
Øyvind Hansen [58]	Overingeniør	Produksjon og verksted

Møtene med ekspertene gjennomføres over teams, zoom eller epost. Grunnlagsmateriale for testingen, og rapporten sendes på forhånd ved behov. Referat og resultat fra eksperttestingen dokumenteres i neste delkapittel.

9.3 Resultater

I denne delen presenteres resultatene fra eksperttestingen.

Tabell 9.2: Resultater fra eksperttesting.

Fagområde/tema	Innspill
Statikk og beregninger	<ul style="list-style-type: none"> Tilbakemelding og rettelse på kraft og moment tegninger (figur 4.10 og 4.11, kapittel 4.3.4) Innspill på likninger til spenningsberegninger i aksel og tårn. Gjennomgang av statiske forhold ved en vindturbin
Konstruksjon og design	<ul style="list-style-type: none"> Oppfriskning av Simulasjonsverktøyet i SolidWorks. Tilbakemelding på at jeg bør legge til lager på akselen så tett inntil rotoren etter propellen som mulig. Det kan lønne seg å legge inn et planetgir for å øke rotasjonshastigheten til generatoren, selv om det er en generator som fungerer på lave hastigheter.
Produksjon og verksted	<ul style="list-style-type: none"> Turbinblader er kostbare å produsere fordi man må støpe form. Kan lønne seg i stor grad å kjøpe ferdig produserte blader. Nacelle og Hub bygges opp av stål i kraftoverførende konstruksjoner og glassfiber i konstruksjonen som er beskyttende og som reduserer turbulens. Det er smart å bruke rørkonstruksjoner for å begrense verkstedsarbeider.

Konseptendringer som følge av eksperttestingen:

- Det legges inn et planetgir i drivverket på den konseptuelle vindturbinen, som øker turtallet fra propellen til generatoren.
- Det legges inn et lager tett inntil hubben som tar opp kreftene fra hub og turbinblader, for å ta opp moment og dynamiske belastninger fra propellen.

10 DESIGN, ESTETIKK OG MILJØHENSYN

For at produktet skal appellere til kunden er det nyttig at det har design som gjenspeiler produktets hensikt. Vindturbiner er i utgangspunktet forstyrrende for naturen både visuelt og for mennesker og dyr rundt. I dette kapittelet kartlegges de hensyn som kan og eventuelt må tas når det gjelder design, estetikk og miljø for at vindturbinen skal være estetisk og minst mulig sjenerende for mennesker, dyr og miljøet omkring.

10.1 Grønt design

For at produktet skal være så bærekraftig og miljøvennlig som mulig, er det viktig at vindturbinen har lang levetid. For å oppnå dette er det avgjørende å bruke materialer som tåler de belastningene komponentene blir utsatt for. Det er også viktig at turbinen enkelt kan vedlikeholdes og at deler kan skiftes ut for å underbygge lang levetid.

Vindturbinen skal være så miljøvennlig som mulig, så langt det er forsvarlig kostnads- og kvalitetsmessig. Det er det også viktig med så optimalt aerodynamisk design som mulig, slik at turbinen får en høy virkningsgrad. Dette gjør at det produseres mer elektrisitet, og videre gir så mye grønn energi som mulig til forbrukeren og evt. strømmettet. For å oppnå dette er hub og nacelle designet for å ha lite drag og skape lite turbulens, samt lede vindstrømmen ut til propellbladene fremfor at vinden skal stoppe opp. Tårnet bør ikke være overdrevet stort eller sterkt, da dette vil være unødvendig bruk av materialer, og er tårnet unødvendig bredt (høy diameter), vil det påvirke vindstrømmene og øke belastningene.

10.2 Estetikk

Det er ønskelig med myke, organiske linjer i designet, samt bruk av materialer og farger som skli inn i naturen. Likevel er det hensyn som må tas, som eksempelvis at det bør være synlig for fugler slik at de ikke forveksler vindturbinen med en tretopp. Myke linjer er også ofte aerodynamiske og underbygger ønsket om å skli inn i naturen med organiske former. Slike former vil også gjøre at produktet kan gjenspeile et fremsteg mot en grønnere energiproduksjon, og virke appellerende til kunder.

10.3 Miljøhensyn

Små vindkraftverk kan ha negative konsekvenser for dyreliv. I veilederen for mindre vindkraftanlegg, fra olje- og energidepartementet og moderniseringsdepartementet står det følgende i forbindelse med dette:

«Mindre vindkraftanlegg kan ha negative konsekvenser for naturmangfold. Bestemmelsene i naturmangfoldloven §§ 8-12 må legges til grunn som retningslinjer i kommunens behandling, jf. naturmangfoldloven § 7. Forvaltningsmålene i naturmangfoldloven §§ 4 og 5 skal være del av skjønnsvurderingen der det er relevant. Omfanget av vurderingene skal tilpasses verdiene som kan berøres av tiltaket. Riktig plassering av vindkraftanlegget, lite behov for ny infrastruktur og avbøtende tiltak medfører mindre negativ påvirkning på naturmangfold. Mindre vindkraftanlegg kan medføre kollisjonsfare for fugl» [54].

«Bygging og beslaglegging av areal til turbiner og infrastruktur kan videre ha konsekvenser for truet eller annen verdifull natur. I tråd med naturmangfoldloven § 8 skal kunnskap om naturen i området legges til grunn i vurderinger av hvilke konsekvenser anlegget med infrastruktur kan ha på naturen på

stedet. I tillegg skal det gjøres vurderinger av den samlede belastningen av alle påvirkninger på naturen i det konkrete området, jf. § 10. Dersom det finnes verneområder, prioriterte arter, fredete arter eller utvalgte naturtyper i området, gjelder det særskilte regler for dette» [54].

Støy er også et viktig element å ta hensyn til i utviklingen av en vindturbin. I overnevnte veileder for små vindkraftverk står det en grense på 45 dB, og i kapittelet 4.6 ble det definert en anbefalt grense på 40 dB (på natten). Det er uansett ønskelig at en vindturbin har så lite støy som mulig, da et slikt konsept sannsynligvis vil bli oppført i nærhet til boliger.

11 SIMULERING OG OPTIMERING

I dette kapitlet blir det gjennomført FEM-analyser og simuleringer på utvalgte elementer i vindturbinen. Resultatene fra analysene skal sammenliknes med beregninger for å få et inntrykk av hvor store avvik det er mellom estimer/håndberegninger og hva dataprogrammet beregner.

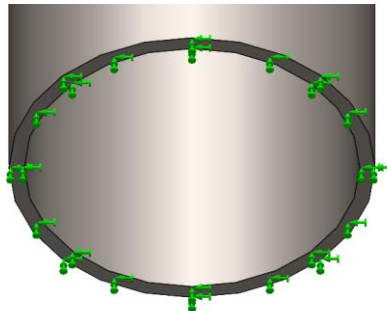
11.1 FEM-analyse på tårn

I denne delen blir det gjennomført FEM-analyse på tårnkonstruksjonen i SolidWorks. I disse beregningene vil det kun bli analysert hvordan kreftene og spenningene opptrer dersom det er koplet én turbinmodul på tårnet.

Innstillinger:

Følgende trinn ble gjort i simuleringen:

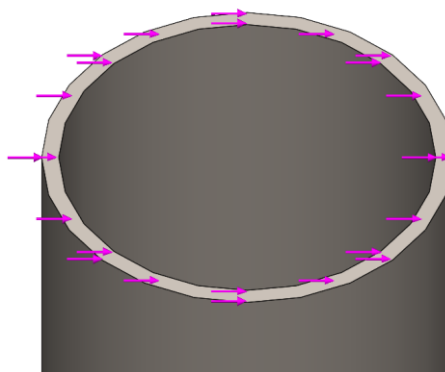
- Tårnet ble forlenget med én meter slik at det ble 12 meter langt, dette ble gjort for å kompensere for at fundament og nacelle ikke er med i beregningene.
- Geometrien i bunn av tårnet ble fiksert.



Figur 11.1: Fiksert geometri i bunnen av tårnet.

- Det ble lagt inn horisontal kraft i positiv y-retning (surge) på tårnet:
 - Kraft på toppen av tårnet (12 m over origo): 1333,3 N, Denne kraften gir tilsvarende moment i bunn av tårnet som det som ble beregnet i håndberegningene:

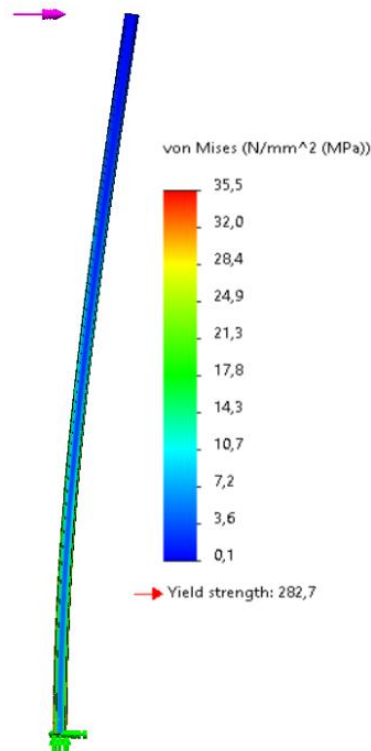
$$V = \frac{M}{H} = \frac{16 \cdot 10^3}{12} = 1333,3 \text{ N}$$



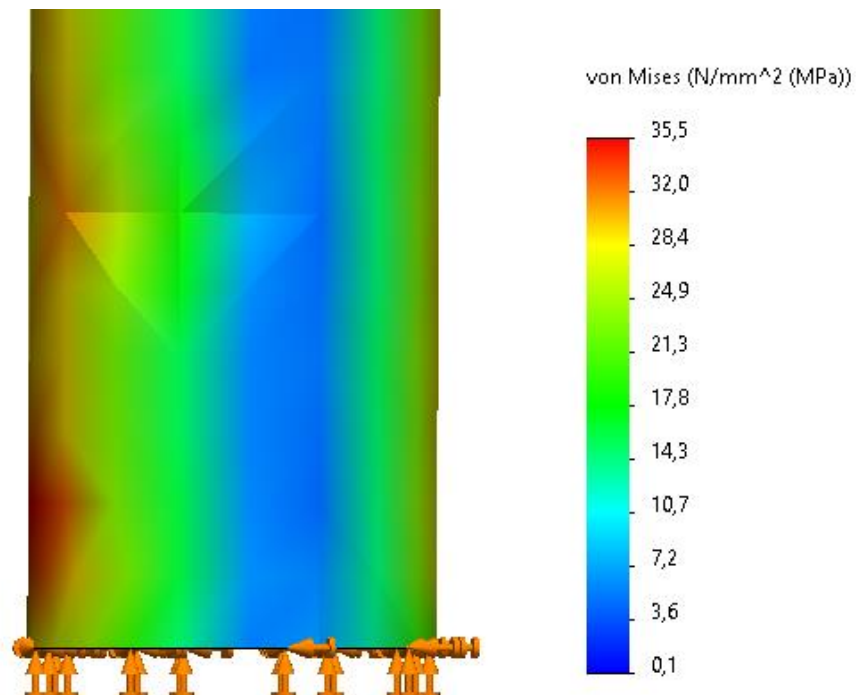
Figur 11.2: Kraft på toppen av tårnet.

- Materialet ble satt til galvanisert stål, (E-modul: $2e+11$ N/m²), dette skal ikke ha noen innvirkning på resultatet av simuleringen, men kreves av programvaren.
- Genererte automatisk mesh.

Simuleringen ga følgende resultat:



Figur 11.3: Resultat av FEM-analyse og simulering av tårnet. Maks. spenning er 35,5 MPa.



Figur 11.4: Detaljbilde av spenningskonsentrasjon (35,5 MPa) i bunnen og i front av tårnet, der tårnet strekkes mest som følge av bøyning.

Simuleringen viser at det er størst jevnførende spenning (σ_{jf}) i bunn av tårnet, dette samsvarer med det som var forventet, da det er her bøyemomentet er størst. Den største jevnførende spenningen i simuleringen er **35,5 MPa**

Sammenliknet med håndberegningene ga simuleringen følgende avvik:

$$\frac{\sigma_{jf} - \sigma_b}{\sigma_b} \cdot 100\% = -13,6 \%$$

Dette avviket kan blant annet komme av at simuleringen tar hensyn øvrige spenninger som oppstår i konstruksjonen, og håndberegningene ser kun på bøyepeningen.

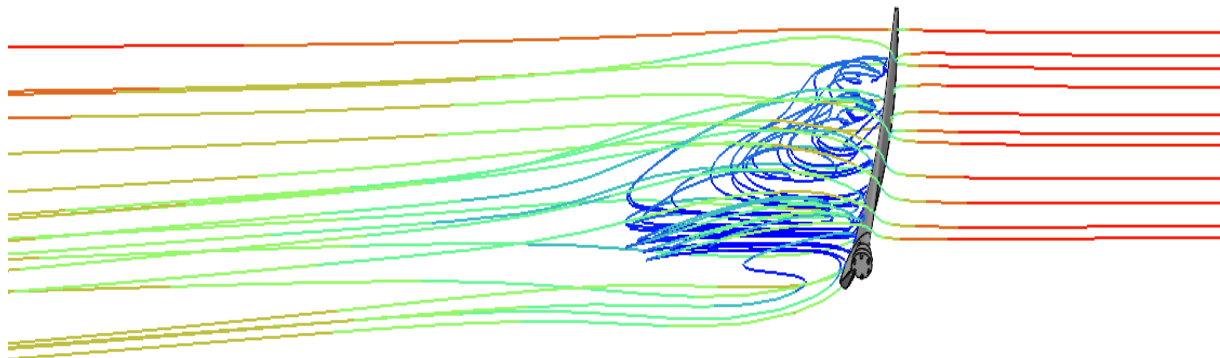
11.2 Flow-simulering av turbinblad

Turbinbladet ble modellert med lengde (inkludert monteringsenheter) på 1,96 meter. I forhold til vinden så er det ca. 1,85 meter av lengden til turbinbladet som vil virke på rotasjonen. I forhold til sveipearealet så vil det reduseres noe, da bladene blir festet med en vinkel på 5° i forhold til yz-planet, for å forhindre at de treffe tårnet når de blir bøyd av sterk vind. Det blir ikke tatt hensyn til denne vinkelen i analysene av bladprofilen.

I simulering av bladprofil for å se på luftstrøm, vindtrykk og vindkrefter er følgende gjort:

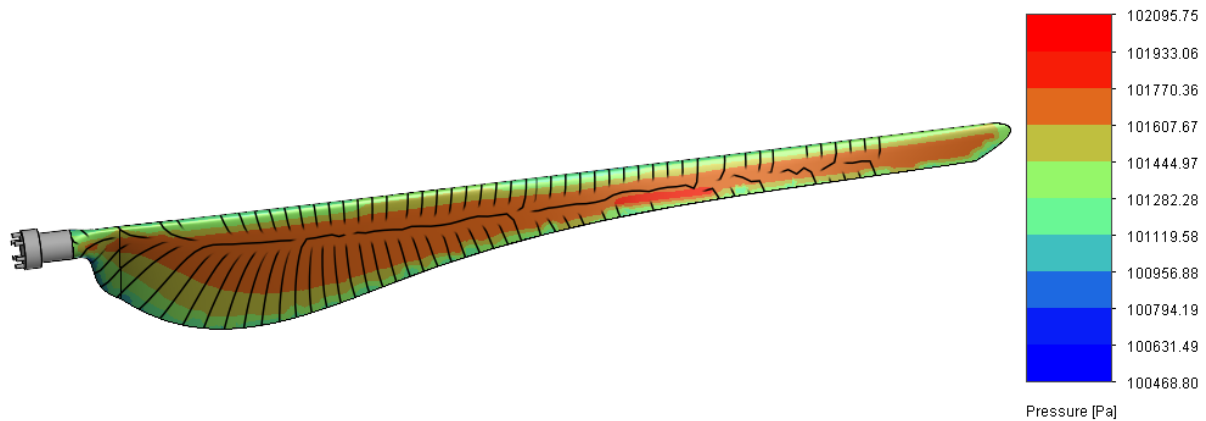
- Objektet beveger seg i luft (20°C) med hastighet 25 m/s i positiv y-retning.
- Lager et mesh med level 6.

Resultatene fra simuleringen viser hvordan vinden beveger seg (fra høyre mot venstre) forbi bladprofilen.

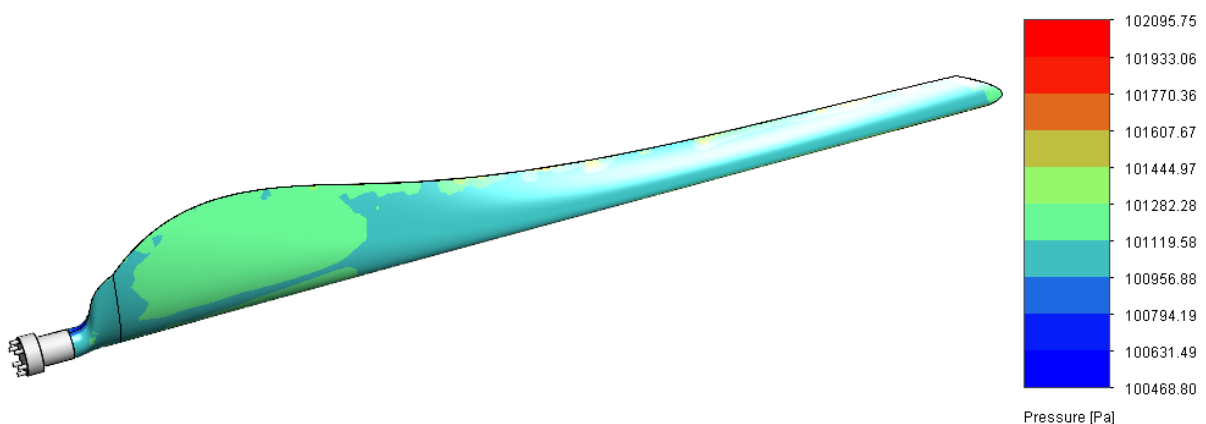


Figur 11.5: Viser hastighet (går fra høyre mot venstre) og retningsendringene på luftstrømmen når den treffer bladet. Det vises turbulens bak bladet, og hvordan hastigheten på vinden blir redusert

Videre, på neste side illustreres det hvordan lufttrykket og strømningslinjene virker på bladet:



Figur 11.6: Illustrasjon av lufttrykk på turbinbladets side som står mot vinden, samt linjer som viser hvordan vindstrømmen beveger over bladets overflate.



Figur 11.7: Illustrasjon av lufttrykk på turbinbladets bakside.

For å sammenlikne resultatene fra flow-simuleringen med håndberegningene presenteres simuleringsresultatene i følgende tabell.

Tabell 11.1: Resultater fra flow-simulering på turbinblad.

	Enhet	Verdi
Dynamisk trykk	[Pa]	1008,3
Kraft (z-retning)	[N]	114,2

Fra håndberegningene ble det dynamiske trykket på bladet beregnet til 375 Pa, og kraften på bladet ble beregnet til 190 N. Dette gir respektive avvik på 169% og -40%.

Det er forventet med relativt store avvik mellom analysene og håndberegningene, da håndberegningene ble gjort med sterke forenklinger.

En videre utfordring er å få gjennomført mer nøyaktige simuleringer, og dette vil kreve spesialprogramvarer. Det eksisterer i dag flere ulike kommersielle versjoner for dette formålet, og i tillegg gjøres det også ekspertutvikling av programvare for slike analyser ved RealTek, NMBU. Av kommersielle tilgjengelige spesialprogrammer anbefales det å undersøke kvalitet og bruk i blant annet disse [59]:

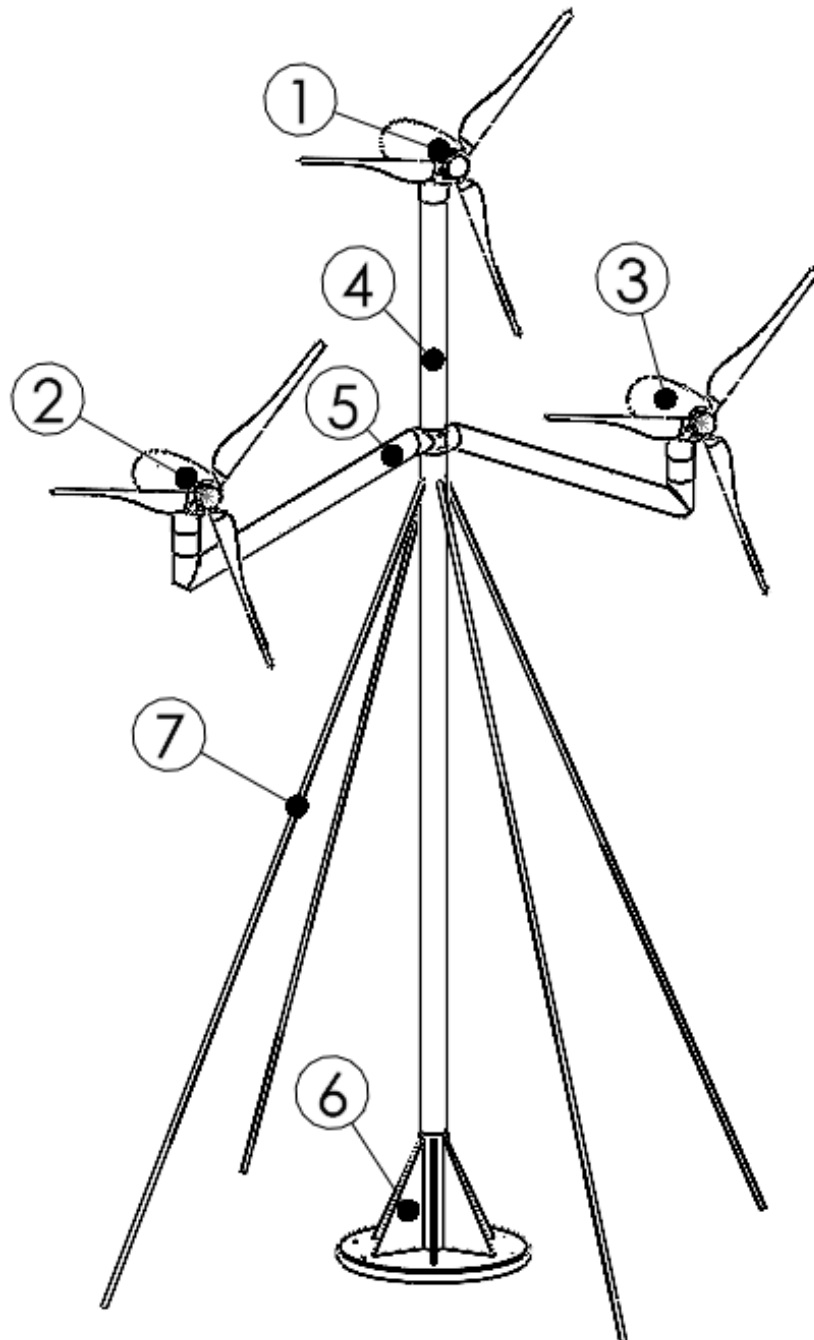
- WASP, Sesam Wind og Qblade.

12 PRODUKTARKITEKTUR OG KONSEPTDESIGN

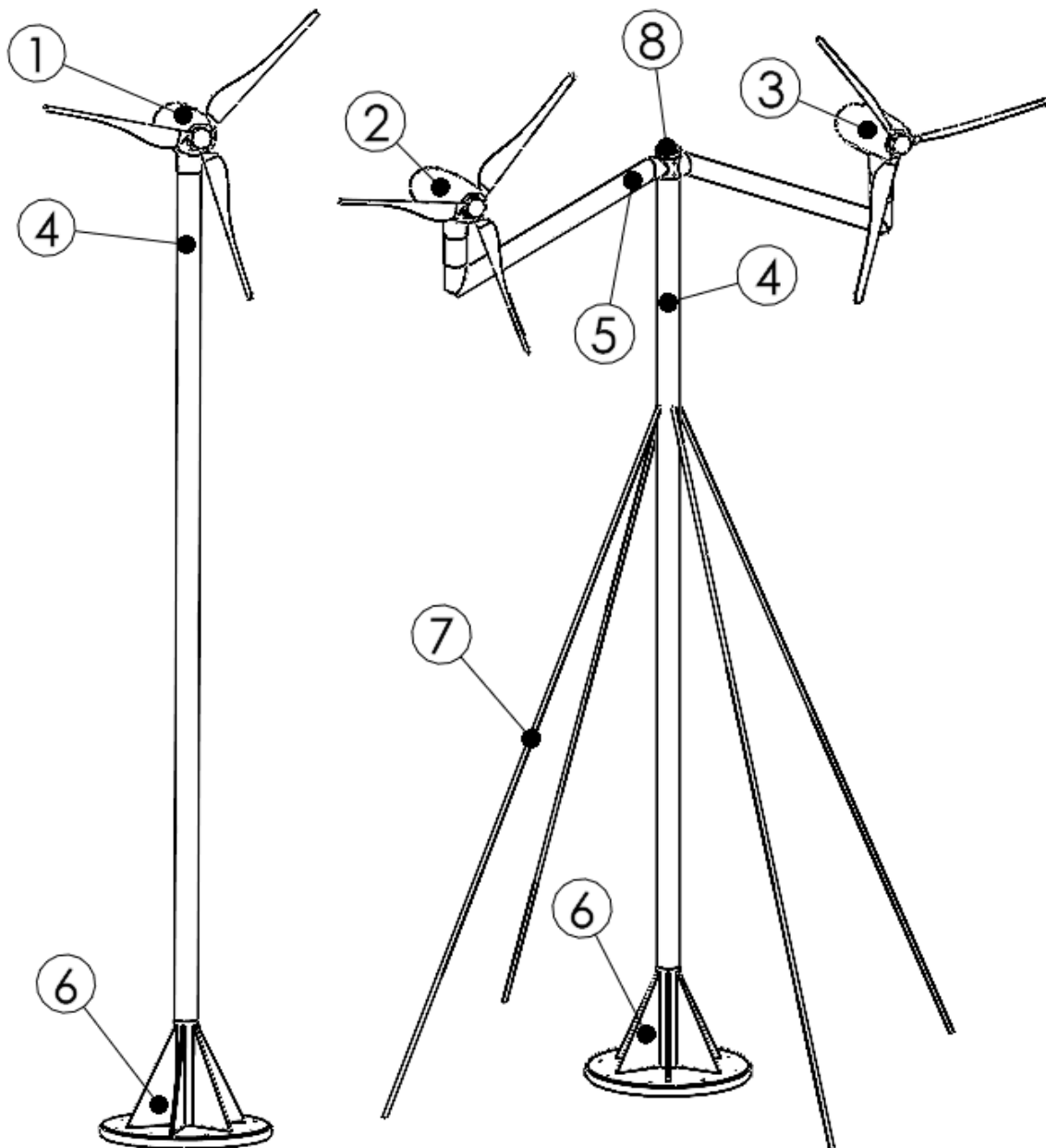
I dette kapitlet presenteres vindturbin-konseptet, med oversikt over hovedkomponenter og arkitektur. Konseptdesignet er modellert opp i SolidWorks, og basert på valgte løsningsalternativer fra egen-screening, innspill fra ekspertgruppen, samt videre utvikling underveis i modelleringen. Hensikten med dette er å vise konseptdesignet av vindturbinen, og hvordan den er bygd opp.

12.2 Sammenstilling

I dette delkapitlet illustreres vindturbin-konseptet, med tilhørende anvisninger av nummer og del-navn i tabeller.



Figur 12.1: Sammenstillingsteigning av vindturbin med tre moduler.



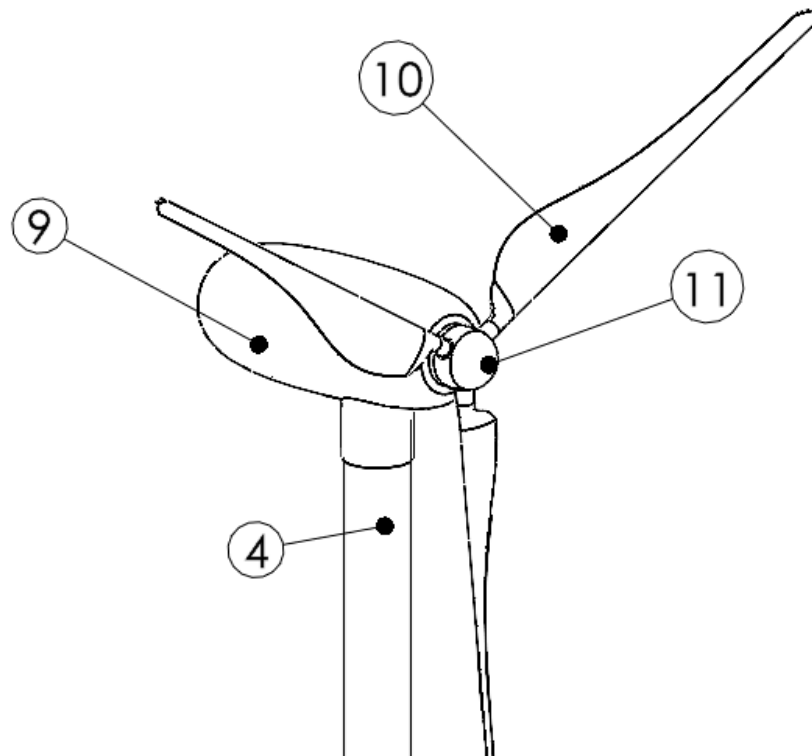
Figur 12.2: Sammenstilling av én modul (venstre) og to moduler (høyre).

Videre i tabellen listes hovedkomponentene opp med del nummer og navn.

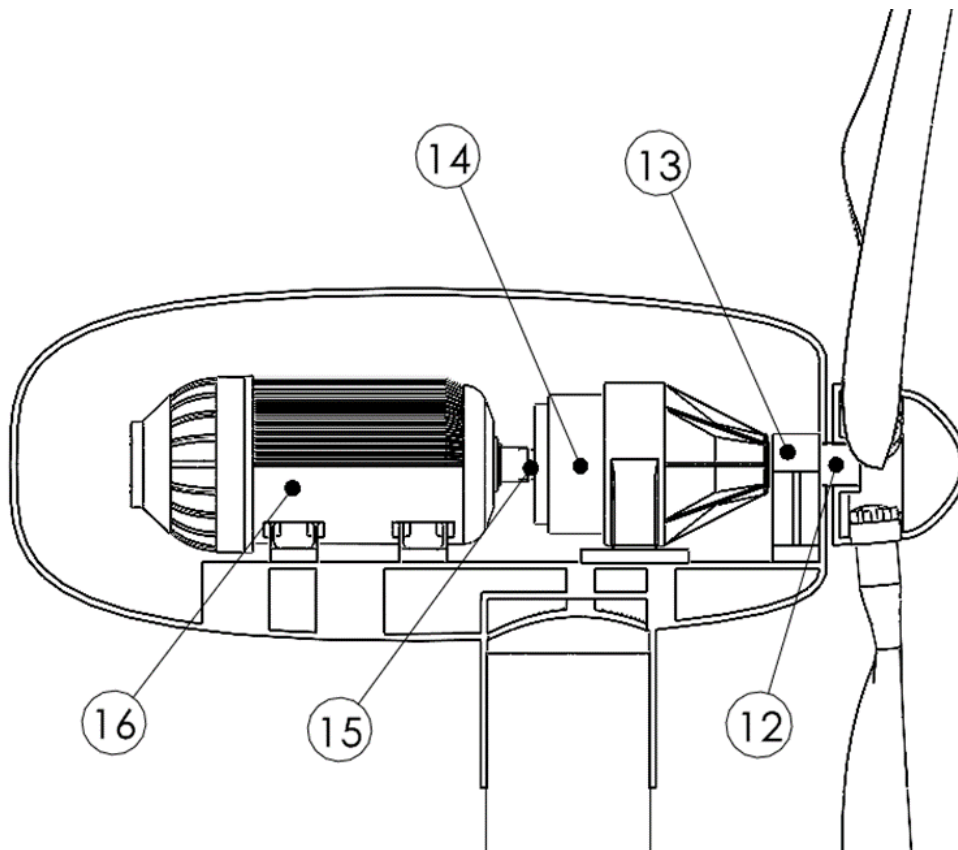
Tabell 12.1: Strukturelle hovedkomponenter med nummer og navn.

Del nr.	Navn	Del nr.	Navn
1	Turbinmodul nr. 1	5	Modulstativ
2	Turbinmodul nr. 2	6	Fundament
3	Turbinmodul nr. 3	7	Bardun
4	Tårn	8	Topplukk

Videre presenteres sammenstilling av detaljer på turbinen, som videre beskrives i tabell 12.2 med del nummer og navn.



Figur 12.3: Sammenstillingstegning av én modul som består av tre propellblader, nacelle og hub.



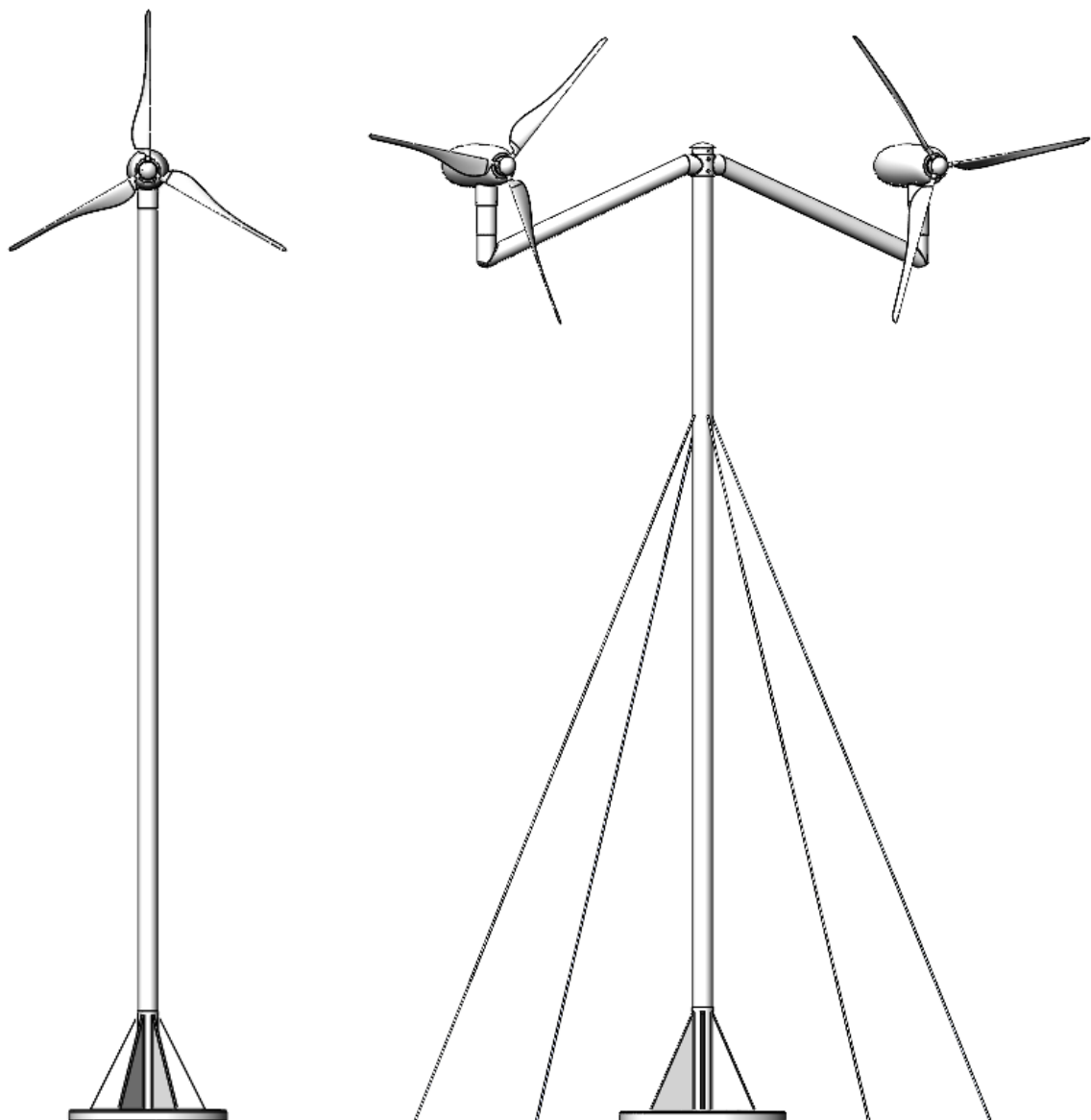
Figur 12.4: Sammenstillingstegning av elementene i drivverket.

Tabell 12.2: Modulkomponenter med delnummer og navn.

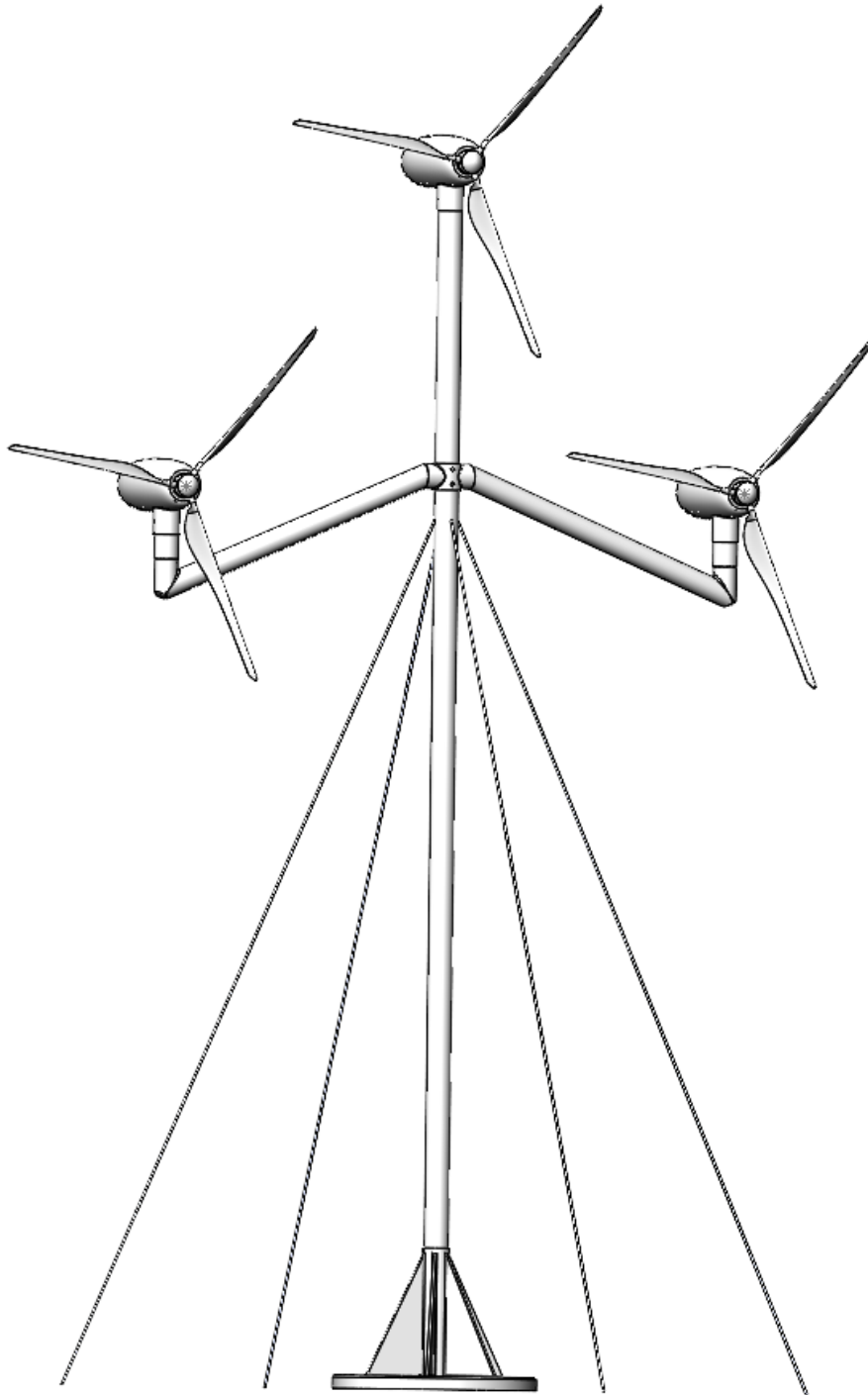
Del nr.	Navn	Del nr.	Navn
9	Nacelle	13	Lager
10	Turbinblad	14	Girhus
11	Hub	15	Aksel (høyhastighet)
12	Aksel (lavhastighet)	16	Generator

12.3 Helhetsdesign i 3D

I dette kapitlet presenteres det helhetlige designet av vindturbin-konseptet, med tre ulike sammenstillinger av modulene.



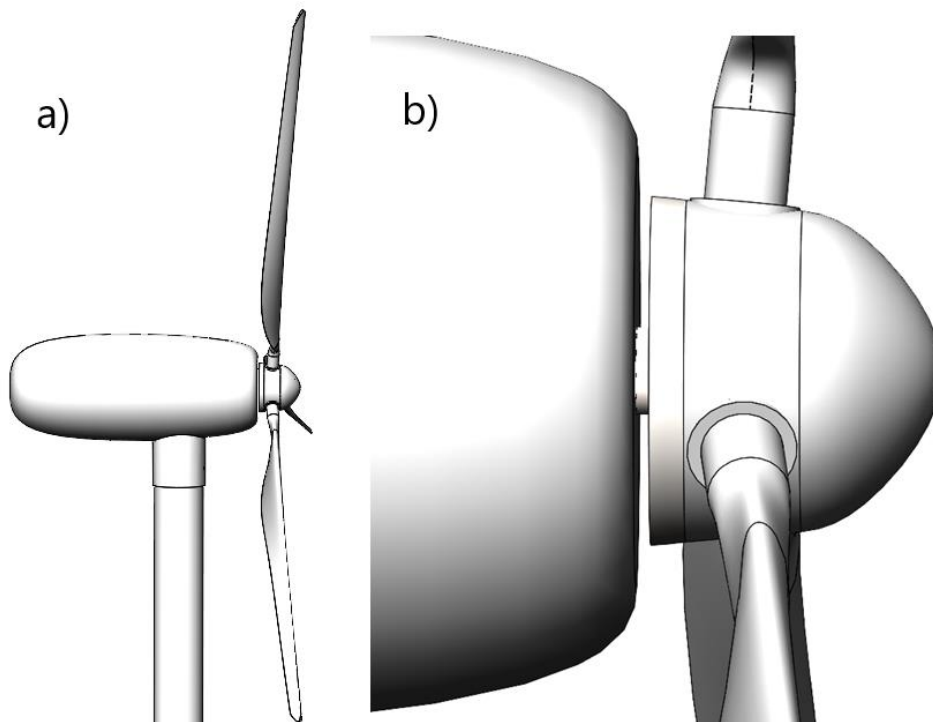
Figur 12.5: Helhetsdesign av den konseptuelle vindturbinen med én modul til venstre og to moduler til høyre, med barduner.



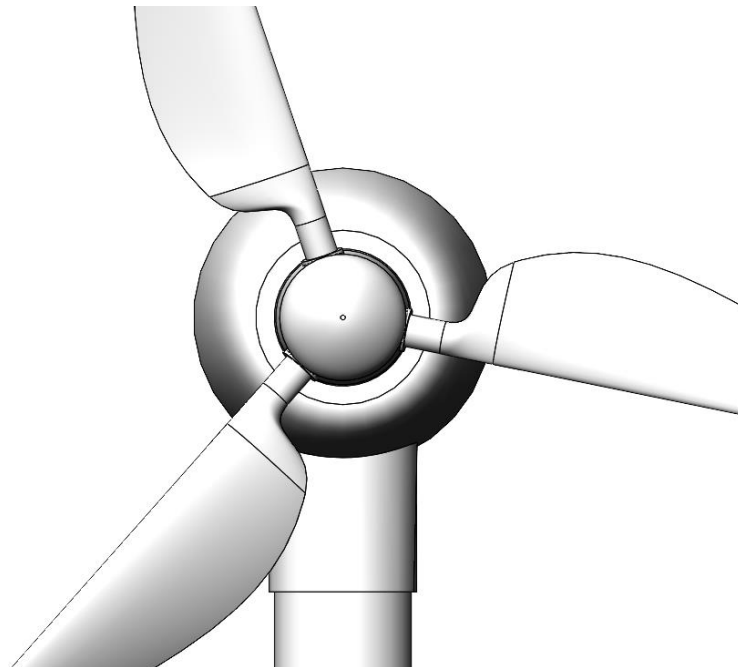
Figur 12.6: Helhetsdesign av den konseptuelle vindturbinen med tre moduler.

12.4 Design av strukturelle komponenter

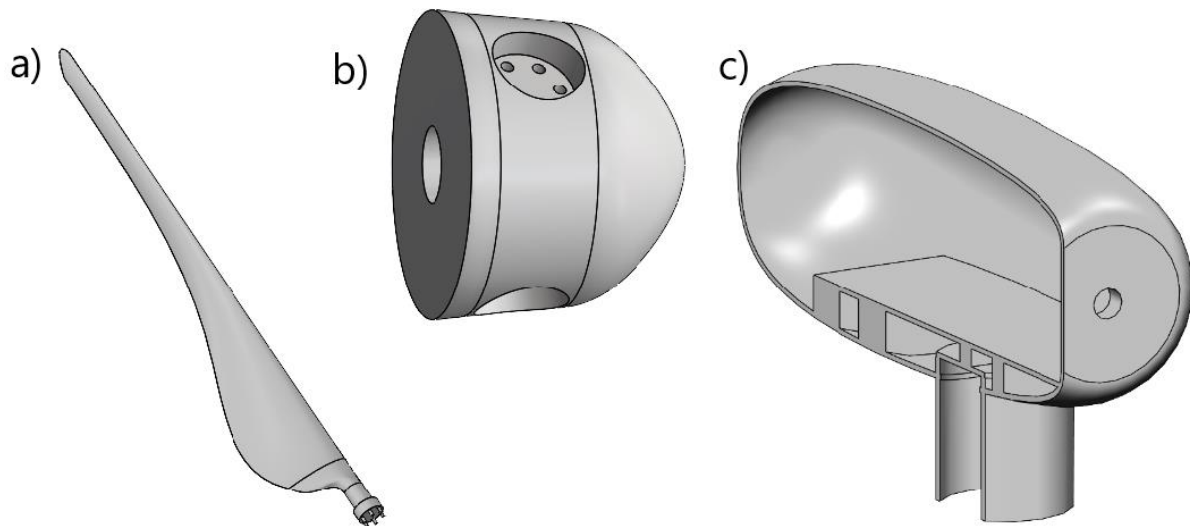
Turbinmodulen består av nacelle med maskinelementer fiksert til bunnplaten, som videre går via en aksel og inn til en hub med tre turbinblad festet til siden med en helning på 5 grader, slik at bladene ikke skal treffe tårnet når de blir utsatt for vind og blir bøyd bakover. Bladene er festet med 120 grader imellom hverandre og pitchet for å et mest mulig optimalt løft-drag forhold.



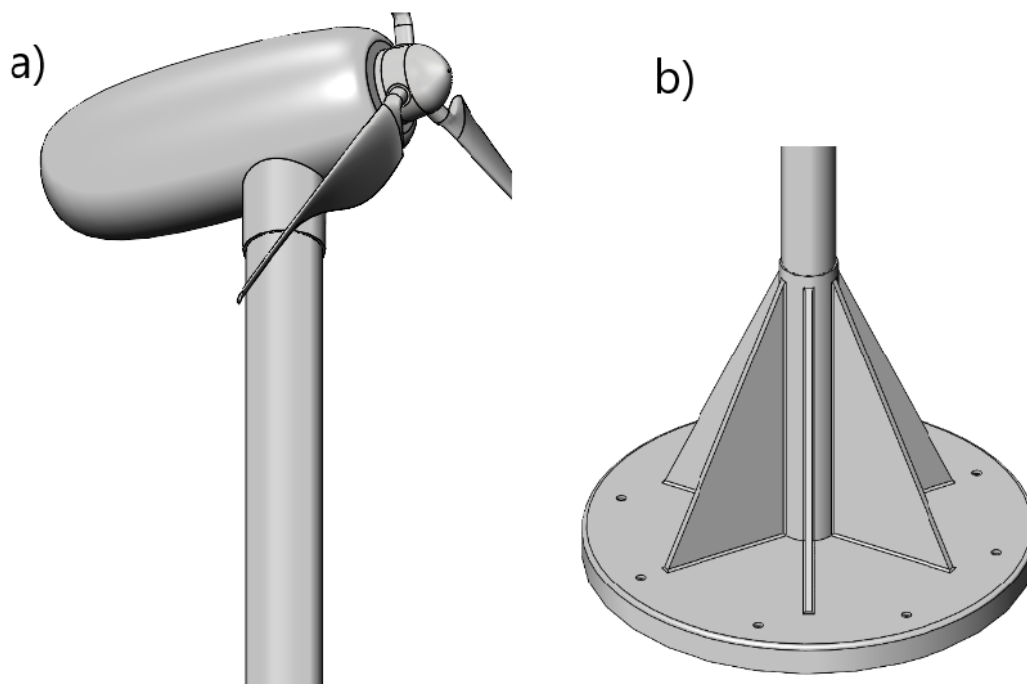
Figur 12.7: Figuren viser helhetsbilde av turbinmodulen fra siden. Til venstre viser a) viser toppen av turbinen der en kan se vridningen av turbinbladene og at de er festet med 5° vinkel i forhold til rotasjonsplanet. b) Viser detaljert hub med innfestede blader, og akselen som går fra hubben og inn i nacellen.



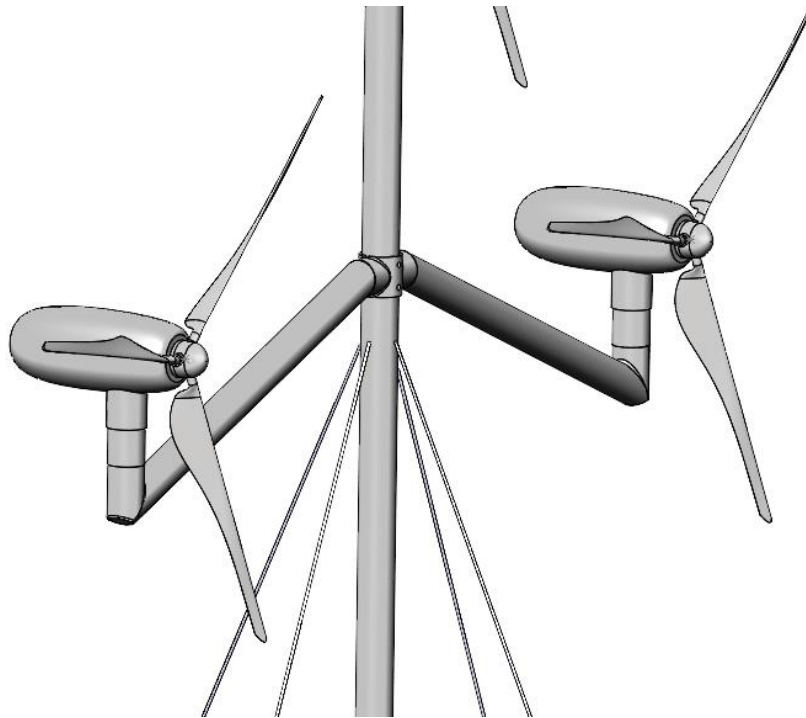
Figur 12.8: Illustrasjon av turbinmodulen fra posisjonen vindretningen kommer inn mot turbinen. Nacelle og hub er designet for å skape lite turbulens og lede vindstrømmen ut mot turbinbladene.



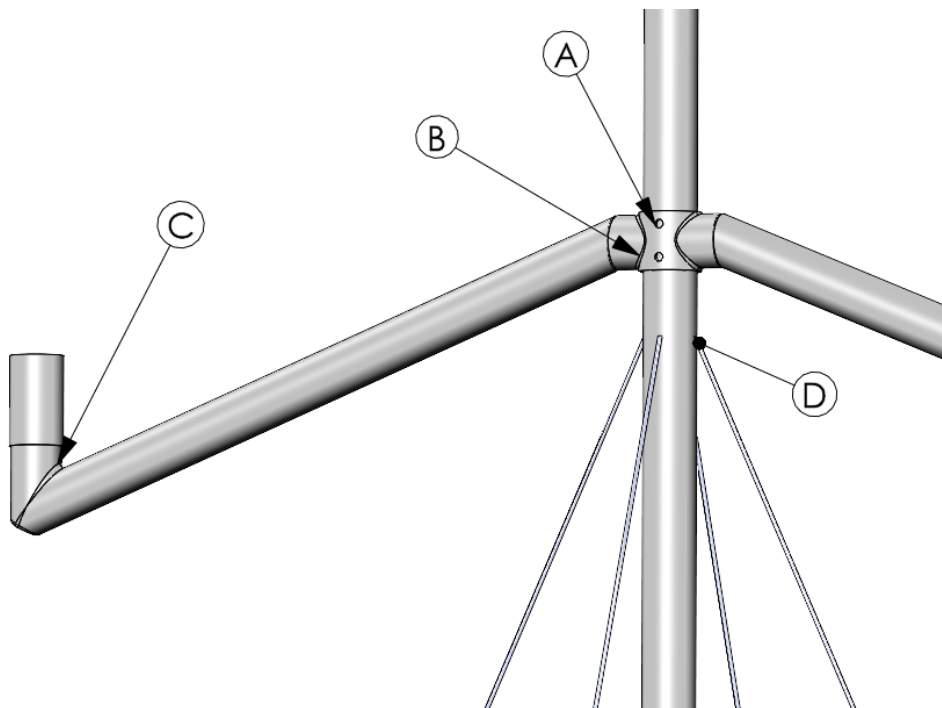
Figur 12.9: Detaljert oversikt over komponentene i modulen som fanger vindkrefter. I a) er det illustrert turbinblad, med en enkel illustrasjon av hvordan innfestingen til hubben kan gjøres. Hubben i b) er designet forenklet, hvor innfestingen til propellbladet er illustrert, samt utgangen til akselen inn mot nacellen. Denne komponenten vil bestå av flere deler, noen som overfører krefter, og en annen del som skjermer og leder vind. Nacellen i c) er formet for å lede vinden forbi strukturen, og består av en bunnplate med forsterkninger for innfesting til maskinelementene som er illustrert i snittet i illustrasjonen.



Figur 12.10: Illustrasjon av innfestingen av tårnet i topp og bunn. Nacelle står på tårnet og tårnet står i fundamentet som er forsterket med flenser og har hull for å boltes fast i fjell eller betongelement. Innfestingen kan gjøres med skrue- eller boltforbindelser, eller med sveis. For videre utredning må det sees på løsninger for retningsorientering og dette vil naturlig bli et kopleingspunkt mellom nacelle og tårn.

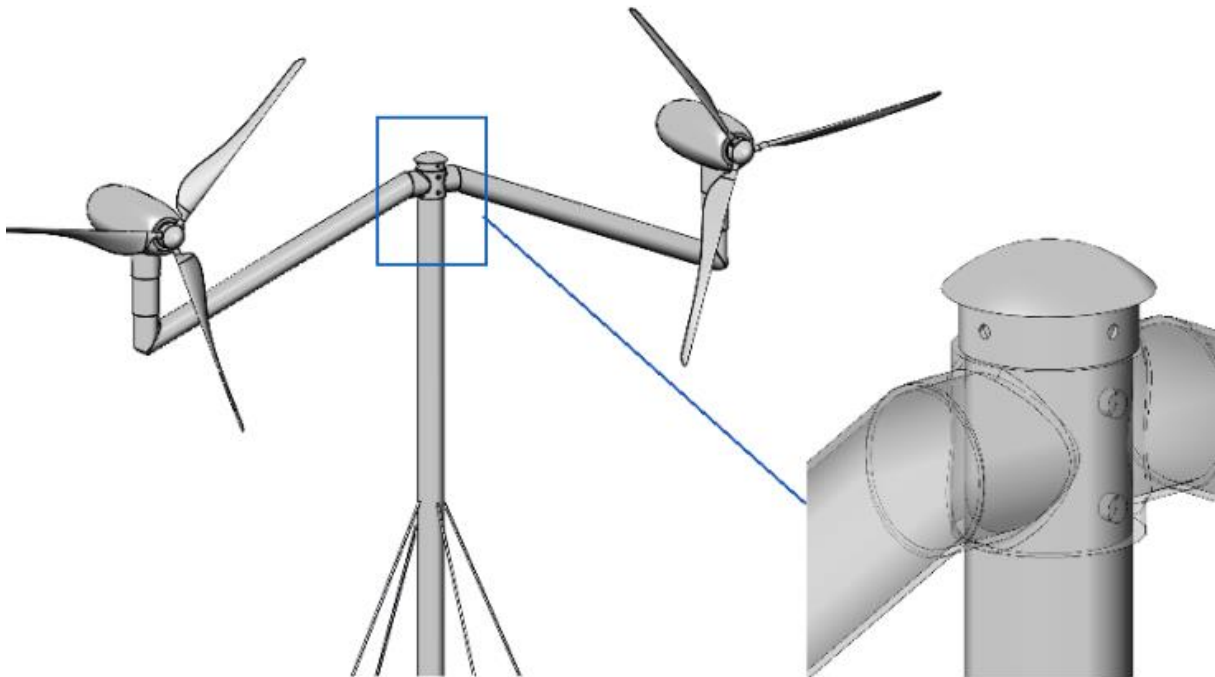


Figur 12.11: Illustrasjon av stativ festet til tårnet som holder to turbinmoduler. På grunn av at tårnet nå vil bli utsatt for opp mot 3 ganger så mye krefter fra vinden er tårnet forsterket med barduner. For å legge til rette for senere retningsorientering, er modulstativet formet slik at festet til tårnet er forhøyet for at det skal være plass til retningsorienterende komponent i tårnet mellom modulstativ og barduner.



Figur 12.12: Detaljert illustrasjon av modul stativ, tårn og barduner, hvor A) er innfesting av modul stativ til tårn, B) og C) illustrerer sveisede overganger mellom rørdelene i stativet, og D) er innfestingen av barduner, det er fire barduner med 90 graders mellomrom.

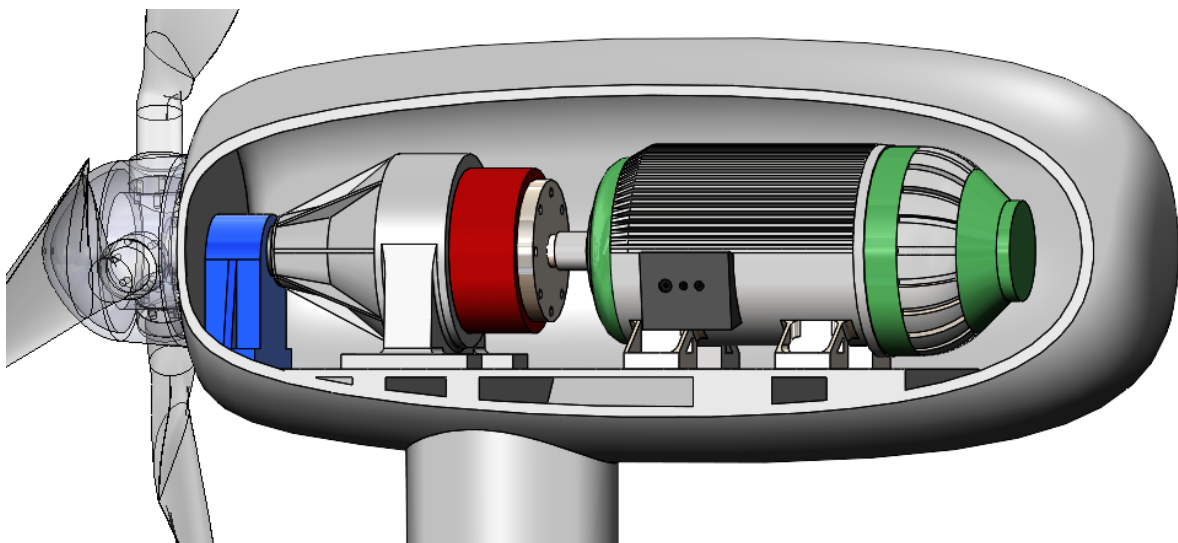
Når vindturbinen er koplet med to moduler, kan de horisontale modulene stå høyere enn ved 3 moduler.



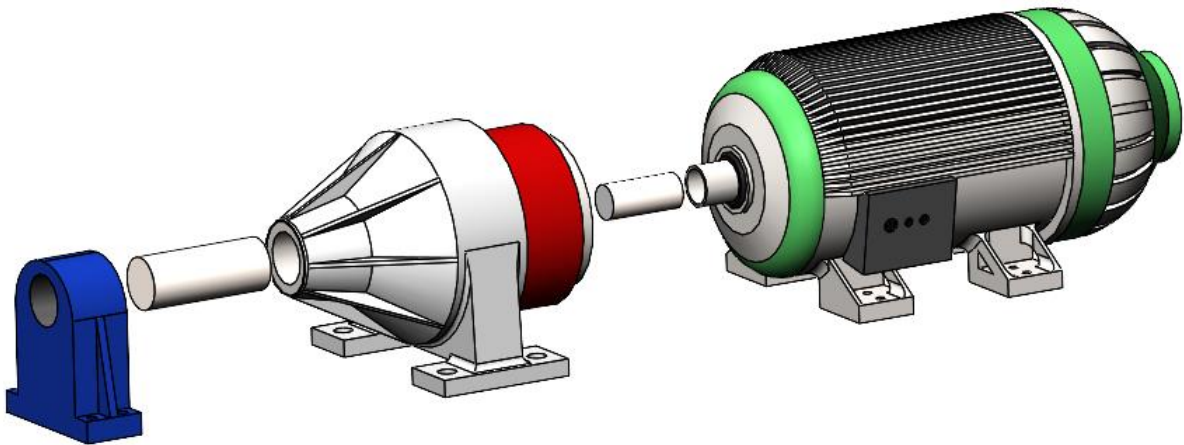
Figur 12.13: Illustrasjon av vindturbin med to moduler. Modulstativet er festet høyere enn ved 3 moduler, og det er også satt et topplokk på toppen av tårnet for å hindre at vann og partikler skal komme inn i tårnet og forstyrre de elektriske ledningene og komponentene.

12.4 Maskinelementer

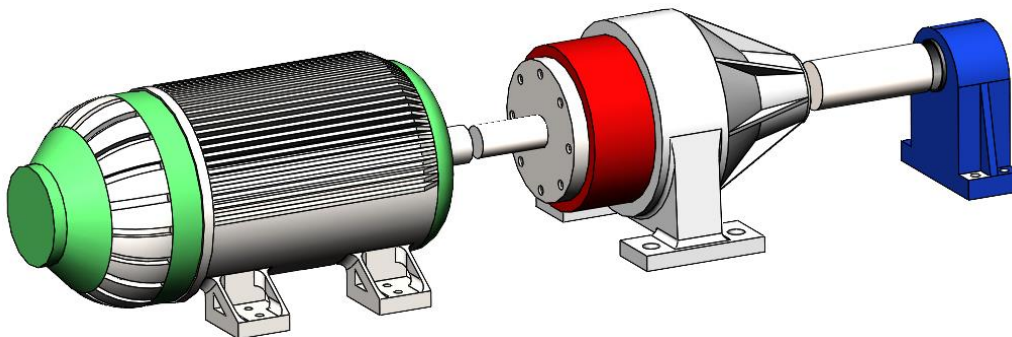
I dette delkapittelet presenteres de elementene som går fra hubben til og med generatoren. For å få et innblikk i dimensjonene for en turbinmodul som skal levere 5 kW, er det designet et lager, girhus og generator, hvor det er tatt utgangspunkt i mål og form likt en generator som kan kjøpes i dag med tilsvarende effekt, Jfr. Vedlegg 3, s. III



Figur 12.14: Illustrasjon av maskinelementene plassert i nacellen og festet til bunnplaten.



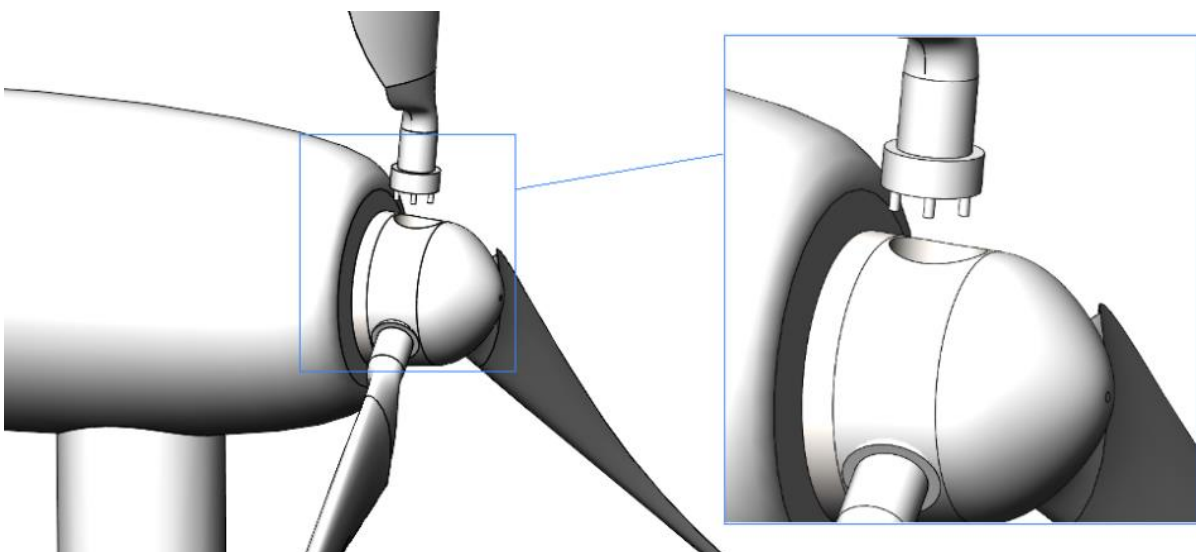
Figur 12.15: Eksplosjonstegning av maskinelementene sett skrått forfra med lager helt til venstre og generator helt til høyre. Delen i midten med rød ting er girhuset.



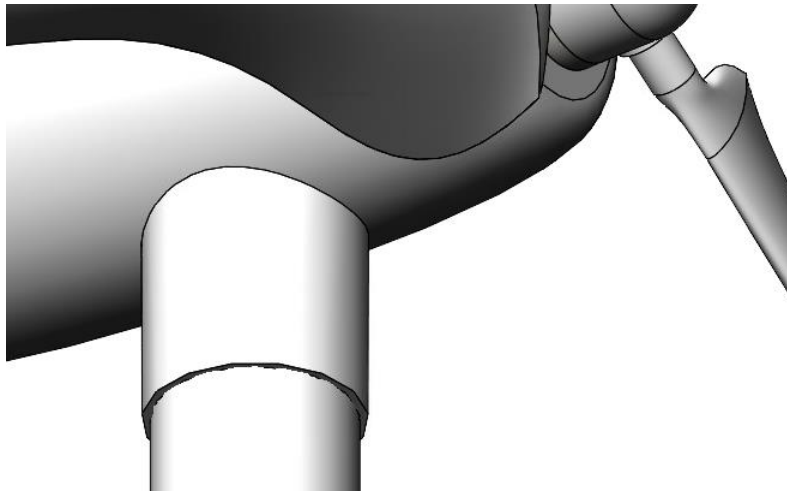
Figur 12.16: Eksplosjonstegning av maskinelementene sett skrått bakfra

12.5 Mindre elementer og designdetaljer

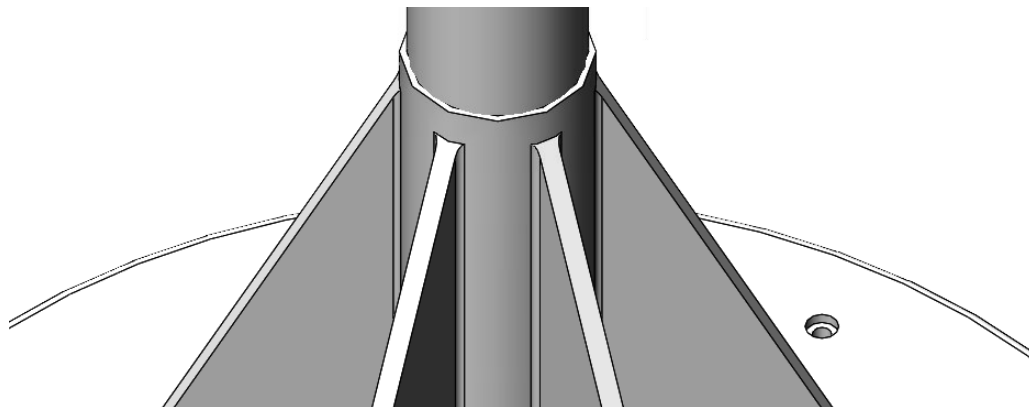
I denne delen blir det presentert mindre delementer og designdetaljer ved de ulike komponentene.



Figur 12.17: Eksplosjonstegning av ett turbinblad ut fra hub, med detaljert nærbilde.

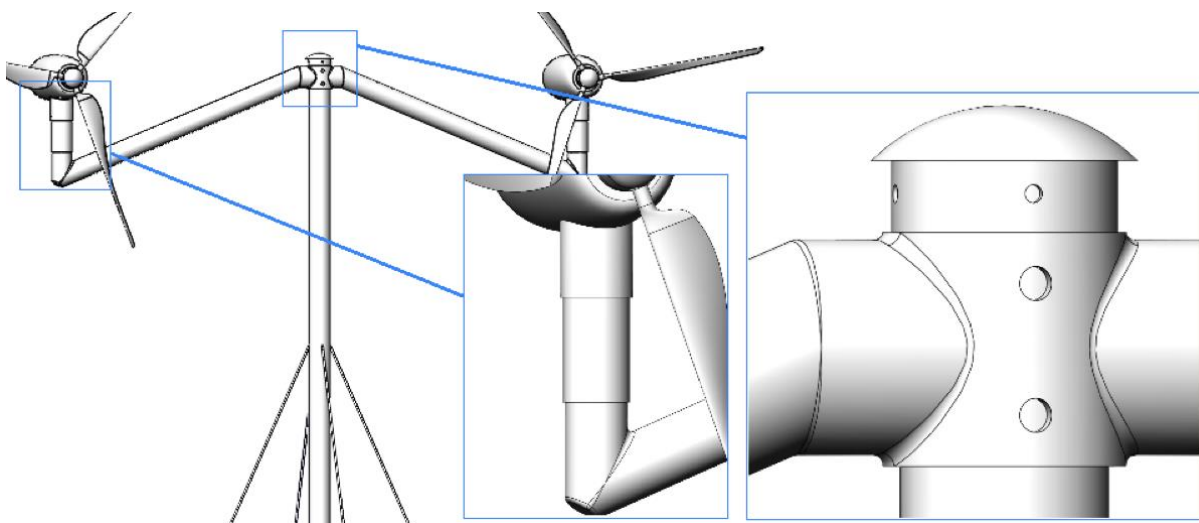


Figur 12.18: Nacellen er festet til tårnet ved at et rør som er fast forankret til nacellen er tredd på utsiden av tårnet.



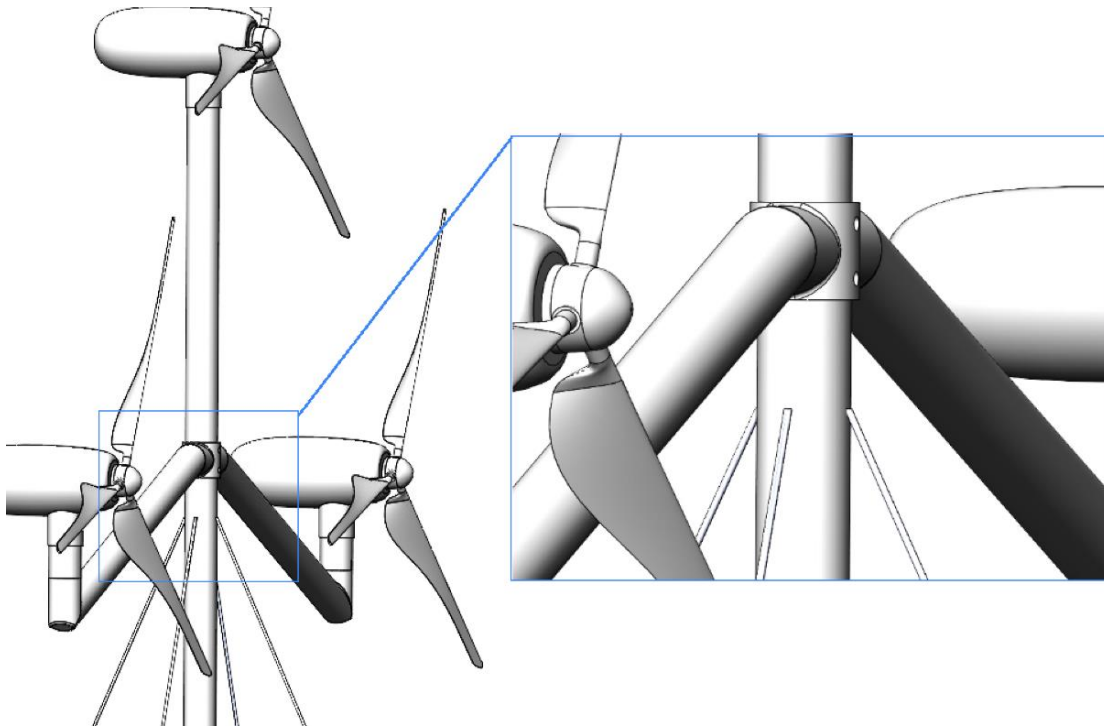
Figur 12.19: Tårnet er plassert i et fundament. Fundamentet er støttet opp med flenser. Fundamentet er designet for å kunne boltes fast i ulike underlag, f.eks. støpt såle av betong, et betongelement gravd ned i jorden eller til fjell.

Ved to moduler montert på turbinen er modulstativet montert i toppen av tårnet (samme plassering som turbinmodul 1 er montert på).



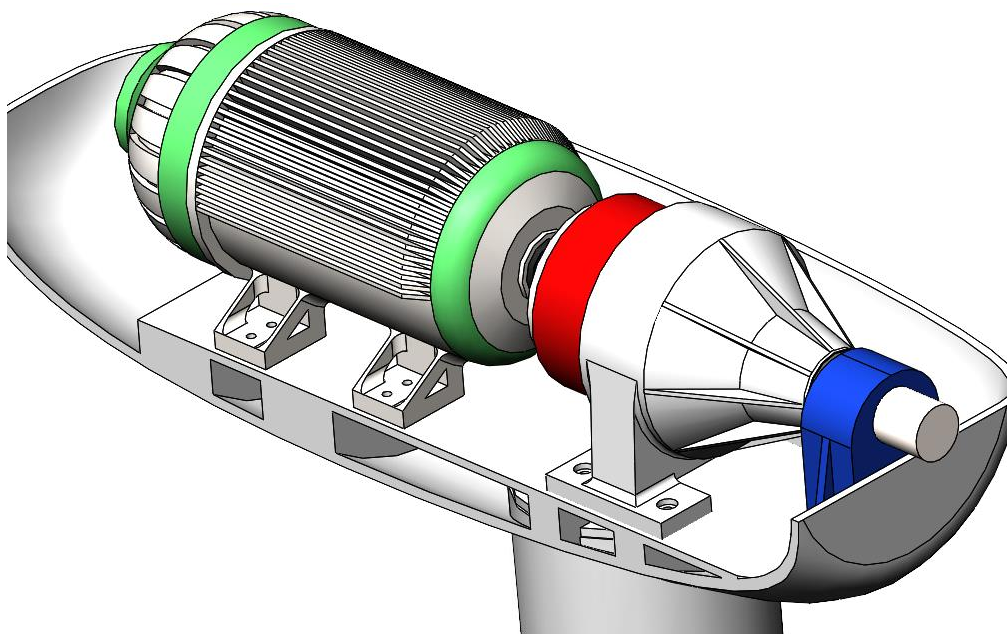
Figur 12.20: Detaljer om hvordan turbinmodul 2 og 3 monteres til modulstativet, og hvordan modulstativet igjen er plassert på tårnet. Øverst på detaljbildet til høyre er det også illustrert topplokket som sitter på tårnet.

Ved tre moduler montert på tårnet må modulstativet monteres lavere ned på tårnet. Dette er for at propellene ikke skal kollidere, og for å ha litt avstand mellom dem, så ikke turbulensforhold reduserer effekten



Figur 12.21: Detaljbilde av vindturbinen, med alle modulene montert. Modulstativet er montert nærmere innfestingen til bardunene. Bardunene må være festet i underkant for å tillate vindturbinen i å rotere mot vindretningen.

For å visuelt illustrere hvordan lager, gir og generator kan festes til nacellen, er det konstruert en plate i nacellen med støttestrukturer og forankringer til nacellen. I forbindelsene mellom maskinelementene og deres forankringspunkter vil det gå krefter. Disse må det ta høyde for i videre utvikling av turbinen.



Figur 12.22: Generator, girhus og lager er festet til en bunnplate i nacellen med forsterkninger.

13 ROBUSTHET, VEDLIKEHOLD OG SIKKERHET

I dette kapittelet blir det utredet for elementer som vil påvirke driftssikkerheten og levetiden til vindturbinen. Det vil også bli beskrevet faktorer som vil påvirke sikkerheten. Hensikten med denne kartleggingen er å lage et grunnlag for videre optimering av vindturbinen, dermed redusere risiko og vedlikeholds- og reparasjonsintervaller.

Vekslende belastninger

For å redusere risiko for sikkerhetsmessige problemer i vindturbinen er det viktig å bruke sikkerhetsfaktorer i beregninger under dimensjoneringen av vindturbinen. I vurderingen av tillatt bøyespennning i håndberegningene av tårnet ble det tatt utgangspunkt i en belastningstype for hurtigvekslende belastninger. Denne belastningstypen hadde en sikkerhetsfaktor på over 2 i forhold til belastningstypen for statiske belastninger.

Vekslende belastninger fra vinden kan gi vibrasjoner knyttet til svinginger i tårnet. Disse vibrasjonene antas å være lavfrekvente for tårnet, og at mye av disse kan tas opp av barduner. I elementer der det kan oppstå mer høyfrekvente svingninger (eks. maskindeler og drivverk), bør det brukes ståldeler med høy E-modul og masse for å ta opp disse vibrasjonene. Det kan også koplet på avfjærende koplinger for å ta opp de vekslende frekvensene. Det som er kritisk ved vekslende belastninger er tilfeller der tårnet får resonans, og det vil også bli mer utmatting på deler som er utsatt for kraftige vibrasjoner.

Resonans, eller egenfrekvens utledes med følgende formelen:

$$\omega = \frac{C}{m} 0,5$$

Der ω er egenfrekvens, C er fjærkonstanten/E-modul og m er massen.

Vesentlig frekvenspåvirkning vil komme fra turbinbladene og rotasjonshastigheten (estimert til 40-50 rpm), noe som underbygger antakelse om lave frekvenser. Generatorens turtall går opp mot 400-500 rpm. Dette er fremdeles relativt lave turtall, og mye av vibrasjonene herfra kan dempes av blant annet spesialforinger og ISO-fester, men dette må ses videre på i senere utvikling.

Materialer

I beregningene av vindturbinen har det tatt utgangspunkt i ståltypen S235. Denne typen er et karbonstrukturstål, og brukes innenfor et vidt spekter. Den er formbar og sveisbar. Utfordringene med stål er korrosjon fra fukt, syrer/baser og salter. Det vil være behov for overflatebehandling av konstruksjonen dersom vindturbinen skal kunne stå i mange år. Overflatebehandlingen kan blant annet være galvanisering eller zink.

Vedlikehold

Vedlikehold av vindturbinen bør gjøres ved faste intervaller. Dette vil bidra til at turbinen opprettholder kvaliteten og forlenger levetiden. Videre bør det utredes for muligheter til å vippe ned vindturbinen eller for en monteringsmulighet til stige i tårnet.

14 PRODUKTUTVIKLINGSKOSTNADER

Dette kapitlet tar for seg eget-estimater av produksjonskostnadene for utviklingen av den konseptuelle vindturbinen. Dette gir innsikt i hvordan tiden til rådighet ble prioritert i prosjektarbeidet.

Mastergradsarbeidet er på 30 stp. Det er definert at hvert studiepoeng tar 25 timer. Ut ifra dette settes det en brutto tidsramme på 900 timer. Normalt vil effektiv tid være ca. 60% av oppgitt tid.

Tabell 14.1: Eget-estimat over produksjonskostnader i utviklingen av konseptvindturbinen.

Konseptutvikling	Timer	Pris [NOK]	SUM [NOK]
Utrekningsarbeid	300	550	165 000
Utviklingsarbeid	200	550	110 000
Analyser	50	550	27 500
Tekning og design	100	550	55 000
Rapportering	300	550	165 000
Sum	900	550	495 000

15 MARKEDS- OG MILJØPRESENTASJON

I dette kapitlet presenteres det modulære vindturbin-konseptet med renderte bilder fra ulike miljøer turbinen kan stå i, samtidig med ulike fargekombinasjoner for å blende inn i omgivelsene.



Figur 15.1: Turbinmodulen med tre-liknende farge på turbinbladene og tårnet.



Figur 15.2: Vindturbinen med én monterert modul. Plassert ute på en åker, ved en gård. Fargene på turbinen blander inn i terrenget.



Figur 15.3: Vindturbinen med tre modul montert. Vindturbinen står i et hytteområde i fjellandskap. Fargene er tilpasset omgivelsene duse grønne turbinblader og lyst metall på tårn, stativ og nacelle.



Figur 15.4: Vindturbinen står i et hytteområde i fjellandskap og forsyner hyttefeltet med elektrisitet. Turbinen er forankret med barduner til bakken.



Figur 15.5: Vindturbinen står montert på toppen av en ås, og er montert med to moduler. Vindturbinen blander inn med himmelen med den lyse fargen.



Figur 15.6: Vindturbinen står montert med tre moduler ute på et jorde. Turbinen forsyner gården med elektrisitet, og har tilgang på gode vindressurser på grunn av åpent og flatt landskap.

16 PROSESSEVALUERING OG DISKUSJON

I dette kapitlet gjennomgås utrednings- og utviklingsprosessen for å belyse viktige forbedringspotensialer i prosessen, likeledes for resultatene av arbeidet. Dette er for å gi oversikt over svakheter og usikkerhetsmomenter i de vurderingene som har blitt gjort i de ulike prosessene.

16.1 Læring og kompetanseutvikling

I dette delkapitlet vil det punktvis bli presentert personlige erfaringer fra prosjektarbeidet. Det vil bli fokusert på de erfaringene som har bidratt til økte kunnskaper og læring gjennom de ulike produktutviklingsprosessene.

- Den tidlige oppgavedefineringen av prosjektet var svært åpen, noe som gjorde at det var mange usikkerhetsmomenter rundt vurderingen av hvilken retning prosjektet skulle ta i de tidlige fasene. I ettertid ser jeg at jeg kunne vært mer konkret når jeg definerte de tidlige problemstillingene.
- Det var utfordrende å få en god progresjon og flyt i arbeidet på grunn av oppgavens kompleksitet. Dette gjenspeiler seg gjennom hele prosjektet, da jeg gikk mye frem og tilbake og var redd for å trekke konklusjoner for tidlig, men ser i ettertid at jeg kunne vært tryggere i valgene som ble tatt og heller gjort vurderinger av dem senere i arbeidet for å spare tid.
- I utredningen av teori og teknologi var det spennende å sette seg inn i et nytt tema, men samtidig var det utfordrende da jeg satt med følelsen av at jo mer jeg leste, jo flere spørsmål og usikkerheter ble jeg klar over. Det var utfordrende å begrense tidsbruket og rapporteringen av teoriinnhenting på grunn av dette.
- Når prosjektmål og planleggingen var satt var det enklere å få flyt i arbeidet og jobbe mer rettet mot de målene som var satt. Likevel ble tiden knapp mot slutten av prosjektet, som følge av blant annet optimistisk tidsplanlegging og mange usikkerhetsmomenter.
- Grunnen til at planleggingen ble urealistisk er også på grunn av økende kompleksitet av arbeidet og delvis ny og krevende metodikk.
- Etter prosjektarbeidet har jeg etablert erfaringer som gir meg bedre evne til å sette realistiske tidsplaner i forhold til mengde arbeid og hvor mye tid de ulike fasene tar.
- Utfordringene i masterarbeidet omkring å ta valg og sette begrensninger var uforventet, de siste ukene av masterarbeidet ble svært hektiske og det var krevende å jobbe med å opprettholde samme kvalitet gjennom hele rapporten. Jeg ser også i ettertid at jeg burde vært flinkere til å samle tankene mine og skrive dem ned underveis i prosjektet.

16.2 Utredningsprosessen

- Som nevnt i kapitlet ovenfor var den tidlige oppdragsbeskrivelsen svært åpen. Dette gjorde utredningsfasen utfordrende og tidsmessig krevende da det var mye ny informasjon å sette seg inn i.
- Utover i utredningsfasen økte kompleksiteten i oppgaven, og det kom til et punkt hvor det kunne vært nyttig å hente inn mer spesiell kompetanse, da man kommer til grensen for metodeforskningen.
- Progresjonen i prosjektarbeidet dro klart nytte av arbeidsplanen da den ble satt, men den ble også satt urealistisk i forhold til tiden det tok å utarbeide det metodiske- teoretiske og teknologiske grunnlaget.
- Videre ble nødvendig å gå tilbake til arbeidsplanen for å gjøre endringer underveis i prosjektet.

- Etter at utregnings- og utviklingsfasen er fullført, ser jeg i etterkant at den tidlige målsetningen var i overkant stor, og burde fra et tidlig tidspunkt vært mer konkretisert og begrensende. Dette resulterte i en optimistisk prosjektplan, spesielt i forbindelse med utredning av teori og konseptgenerering.
- I kartleggingen av teoretiske og tekniske grunnlag var det utfordrende å finne god litteratur, spesielt i forhold til småskala vindkraft. Det ble bestilt bøker fra utlandet, som tok lang tid å få. Det ble derfor benyttet mye internett i starten, noe som virket litt forvirrende, da det ble veldig mye og bred informasjon å sammenfatte og kartlegge på en oversiktlig måte.
- På grunn av koronavirus-pandemien som pågikk under planleggingen og gjennomføringen av dette masterarbeidet, er det benyttet alternative kommunikasjonsverktøy, som Teams, i kommunikasjon med veileder og eksperter.
- Kommunikasjonsflyt er et viktig moment i IPD, og på grunn av den begrensede kommunikasjonen, har muligheten for løpende og spontan kontakt, samt samtaler med med-studenter i lunsjen har vært redusert til minimum, noe som har vært et savn i arbeidsprosessen.

16.3 Utviklingsprosessen

- Produktspesifiseringen og funksjonsanalysen var utfordrende å gjennomføre, på grunn av kompleksiteten og store antall ulike løsninger for vindturbiner. Det ble nødvendig å velge ut noen bestemte elementer fra funksjonsanalyse til videre utvikling av løsningsalternativer.
- I utviklingen av funksjonsanalysen var det også vanskelig å skape innovative tanker og ideer, da det etter teoriutredningen var fort gjort å tenke i retning tradisjonelle og kommersielle vind-turbiner.
- Utviklingsfasen er preget av en kontinuerlig læring, som fører til at en i ettertid så mangler i den tidlige produktspesifiseringen, og dette begrenset de innovative tankegangene ytterligere i genereringen av løsningsalternativer.
- Utfordringen med egenscreeningen var også knyttet til den kontinuerlige læringsfasen, som førte til at jeg i det ene øyeblikket var bestemt på en vekting, så kom det hele tiden ny informasjon som skapte usikkerhet i vektingen av løsningene. Flere av valgene i egenscreeningen ble også basert på egne antakelser og hypoteser, da det kunne være vanskelig å få gode underlag til mange av vurderingene.
- Flere av produktmålene som ble satt for vindturbinen var motstridende. Vindturbinen skulle ha lav kompleksitet, være teknologisk ukomplisert og samtidig være effektivt, dvs. ha høy virkningsgrad, samtidig som vindturbinen skulle ikke være sjenerende for mennesker og ikke skade dyreliv og natur. Vindturbinen skulle heller ikke være sjenerende for mennesker, men ved lokal vindkraftproduksjon vil det sannsynligvis være elementer som forstyrrer vinden og gjør at det krever en viss høyde for å få lineære vindstrømmer – noe som vil underbygge visuell sjenanse.
- Enkelte elementer i egenscreeningen ble vurdert litt frem og tilbake, ettersom det samtidig ble vurdert muligheter for å implementere modulariseringsprinsippet i vindturbinen. Denne delprosessen bar også preg av usikkerhetsmomenter, og ved screening og valg rundt drivverk og generator kunne det med fordel blitt kontaktet eksperter på området.
- Mot siste halvdel av utviklingsfasen, spesielt ved grunnlagsberegninger begynte jeg å kjenne på tidspress, og dette resulterte i at progresjonen i arbeidet herfra bar preg av litt kaos og mange løse tråder. Prosessdiagrammet kom i bakgrunnen i arbeidet, og det hadde vært nyttig å ta et steg tilbake og få oversikt over arbeidet så fort det ble kaotisk. Det pågikk litt for mange prosesser

samtidig, noe som gjorde det utfordrende å holde seg til prosjektplanen, og det var derfor nødvendig å sette begrensninger rundt hvilke elementer som skulle vurderes i grunnlagsberegningene.

- Til tross for kaoset, så ble DAK-arbeidet ble startet opp samtidig som grunnlagsberegningene. Dette var fordelaktig, da de var avhengig av hverandre, og gjorde at DAK-arbeidet ble effektivt uten behov for endringer av komponenter og dimensjoner.

16.4 Analyse- og ferdigstillingsprosessen

- Grunnlagsberegningene ble kun gjennomført på effektforhold i sammenheng med turbinpropellen, og styrkeberegningene ble kun gjort forenklet på tårnkonstruksjonen. Derfor ble det også begrenset FEM-analyse og simulering til disse elementene.
- Simuleringene viste at beregningene av tårnet hadde god nøyaktighet og tilfredsstilte i forhold til sikkerhetsfaktorer. Flow-simuleringene hadde store avvik, noe som var forventet, da grunnlagsberegningene av bladprofilet var grovt forenklet, og samtidig vil det kreve et mer spesialisert vind-simuleringsprogram enn SolidWorks, for å få mer presise resultater.
- Løsninger for miljøhensyn som støy, dyreverk, miljøvennlige alternativer for materialvalg som treverk osv. ble ikke utredet like dypt som det var tenkt fra tidlig i prosessen. Dette kommer av begrensningene fra funksjonsanalysen, og bør bli utredet for tidlig i videre arbeid, da det er svært viktige faktorer i forhold til konseptets potensiale.

Designrevisjoner

- Tårnet til vindturbinen kan vurderes i forhold til å lage en svak kjegleform, der diameteren reduseres høyere opp i tårnet (pga. lavere bøyepenninger høyere opp). Det kan også vurderes om det bør bli designet med støttestrukturer på innsiden, da det er ikke tatt høyde for trykkspenninger og dynamiske belastninger i beregningene av tårnet. Når tårnet får vekten fra nacelle, propell og drivverk kan det bli spesielt utsatt for knekking dersom det i tillegg belastes med vibrasjoner fra vinden.
- I designet av modulstativet er det ikke blitt gjennomført beregninger eller spenningshensyn. Det er kun designet for å illustrere konseptet med modulbasert løsning. Det vil være mange faktorer som spiller inn i denne konstruksjonen, og videre må det også gjøres nye beregninger av tårnet med modulene montert på.
- Det kan også bli vurdert muligheter for hybridløsninger sammen med vindturbinen for mer optimal utnyttelse av den fornybare energien, som eksempelvis solcellepanel.
- Det kan også bli vurdert kreativt hvordan strømmen kan håndteres. Nå som det etter hvert begynner å komme el-biler som har blitt «kjørt opp», kan det vurderes om batteriene i disse bilene kan konverteres til å brukes som strømbuffer i eneboliger eller hytter. Da vil det være mulig å lagre overskuddsenergi fra dager med mye vind.

16.6 Sluttdiskusjon

- Det har vært givende å gjennomføre et prosjekt som har gitt så mye læring og ny kunnskap innenfor vindkraft, spesielt også i høstsemesteret 2021, som skulle vise seg å ha rekordhøye strømpriser, med mye fokus på dette i politikk, debatter og nyhetsbilder.

17 KONKLUSJON

Gjennom dette prosjektarbeidet er det utredet, utviklet, grovdimensjonert og designet et modulært småskala vindturbinkonsept. Konseptet har potensialet til å gi miljømessige fordeler gjennom å produsere elektrisitet fra grønn vindenergi. Vindturbinen er utviklet og designet for å fange vindenergi på en mest mulig effektiv måte, og for å produsere lokal strøm. Alle trinn i utrednings- og utviklingsarbeidet er blitt dokumentert i denne prosjektrapporten.

Det modulære småskala vindturbinen er designet med én standard modulenhet som inneholder tre stk.-turbinblader, hub, drivverk m. generator og en nacelle som beskytter maskindelene og elektriske komponenter. Modulene kan monteres på et tårn i tre ulike kombinasjoner. Hver modul gir en effekt på 5 kW, og ved alle modulene montert på vindturbinen, vil den teoretisk kunne gi 15 kW elektrisk effekt. Montering av modulene er konseptuelt designet og hovedkonstruksjonen er grovdimensjonert gjennom håndberegninger og FEM-analyse. For å støtte konstruksjonen er det benyttet barduner festet til tårnet.

Med det foreslåtte designet er det tilstrebet å legge et grunnlag for at vindenergien skal bli fanget opp på en skånsom måte for miljø, omgivelser og natur. Konseptet er videre designet for å være brukervennlig, driftssikkert og teknisk ukomplisert. Det er designet for høy kvalitet og robusthet, for å sikre lang levetid, minimalt med vedlikehold og reparasjoner.

17.1 Resultater og anbefalinger

Det er oppnådd følgende hovedresultater:

- Vindturbinkonseptet er motstrøms og horisontalakslet, det gir 5kW, 10kW eller 15kW elektrisk effekt.
- Turbinmodulen har en rotordiameter på 4 meter, som gir et sveipeareal på 12,6 meter.
- Fra bakkenivå og opp til øverste rotorsenter måler vindturbinen 12 meter, som gir en total høyde med turbinblad på 14 meter.
- De horisontale modulene har måler 6 meter mellom rotoraksene, og det varierer hvor høyt de monteres til tårnet etter om det er to eller tre moduler koplet på tårnet.
- Med det foreslåtte designet vil vindenergien kunne fanges på en skånsom måte for miljø, omgivelser og natur, samt at det er vurdert for sikkerhetsforhold.
- Konseptet er designet for å ha en total virkningsgrad på mellom 40-45%. Det er konstruert for å være driftssikkert og robust, ha lang levetid og være brukervennlig gjennom teknisk simplisitet, sjeldne vedlikeholds-intervaller og enkel operativ funksjon.

17.2 Videre arbeid

For videre arbeid settes følgende anbefalinger:

- Utarbeide økonomiske analyser som blant annet ser på produksjons- og installasjonskostnader, nytteverdi, nedbetalingstid ved ulike grenselinjer for antall timer produsert effekt.
- Gjennomføre grundige kartlegginger og vurderinger av løsningsalternativer for drivverk, el-komponenter og strømhåndtering, i tillegg vurdering av- og beregninger på monteringsløsninger for delementene.

- Gjøre grundige styrkeberegninger av alle komponenter i- og sammenstilling av vindturbinen, hvor det også utredes for dynamiske belastninger og utmatting, samt monteringer og sammenkoplinger.
- Gjennomføre grundige aerodynamiske beregninger og analyser for optimering av bladprofiler, samt analysere sammenstillinger for å undersøke hvordan moduleringen påvirker systemet i forhold til turbulens.
- Utarbeide løsninger for retningsorientering mot vindretningen, og eventuell pitching av turbinblader.
- Utrede hvordan start-, stopp- og oppbremsing av vindturbinen skal skje, og hvordan turbinen skal tåle ekstremvær uten å måtte demonteres eller vippes ned.
- Kartlegge hvor store vindressurser som kreves for at det skal være økonomisk- og miljømessig forsvarlig å produsere vindturbinen.
- Produsere en skala-prototype for testing av vindturbinen.

18 REFERANSER

I dette kapittelet oppføres alle skriftlige kilder, personlige meddelelser og nettbaserte kilder som er blitt benyttet i arbeidet og rapporteringen.

18.1 Skriftlige kilder

- [3] K. Lund og A. V. Skriverhaug, «Langsiktig Kraftmarkedanalyse 2020-2040,» NVE, Oslo, Oktober 2020.
- [12] S. B. Dybesland, «Vindkraft i Norge, Kartlegging av historisk bruk - med særlig vekt på Jæren og Sunnmøre,» *Rapport utarbeidet av Jærmuseet på oppdrag fra NVE, publisert april 2008, s. 16-17.*
- [30] E. Andersen, K. Grude og K. Haug, «Målrettet prosjektstyring», 7. utgave, Oslo, NKI-Forlaget, 2015, s. 285.
- [31] W. Eversheim, «Innovating Management for Technical Production: Systemic and Integrated Product development and Production Planning (RWTH-edition)», 1. edition, Berlin, Heideberg, Tyskland, Springer Verlag, 2009, s. 444.
- [33] Department of Defense, «DoD Guide to Integrated Product and Process Development, Version 1.0,» i *Office of the Undersecretary of Defense, Acquisition and Technology*, Washington DC, USA, 1996, s. 42.
- [34] S. Pugh, «Total design: Integrated Methods for Successful Product Engineering,» Essex, United Kindom, Pearson Education, 1991, s. 296.
- [35] G. Dieter og L. Schmidt, «Fifth Edition,» *Engineering design*, New York, USA, McGraw-Hill International Edition, 2013, s. 825 + vedlegg
- [36] L. Cohen, «Quality Function Deployment,» *How to Make QFD Work for You*, USA, Addison-Wesley Publishing Company, First edition, Prentice Hall, 1995, s. 368
- [37] A. Osborn, «Applied Imagination, Principles and Procedures of Creative Problem-Solving», 3rd Revised edition, New York, USA, Charles Scriber's Sons, 1979, s. 417.
- [38] M. Baxter, «Product Design (Design Toolkits),» *2nd Reprint, CRC Press*, Cheltenham, United Kingdom, Nelson Thorne Ltd, 1995, s. 308.
- [39] D. Chiras, «Achieving Energy Independence: A Practical Guide to Small-Scale Energy Production» *Power from the Wind*, Gabriola Island, Canada, New Society Publishers, 2017, s. 30-44.
- [41] T. Wizelius, «Developing Wind Power Projects,» i *Theory and Practice*, London, UK, Earthscan, 2007, s. 40.
- [42] H. Young og R. Freedman, «University Physics, Volume 1, With Modern Physics,» i *12th Edition*, San Fransico, USA, Pearson Addison-Wesley, 2008, s. 472-475.
- [44] T. Wizelius, «Developing Wind Power Projects,» *Theory and Practice*, London, Earthscan, 2007, s. 68-119.

- [46] D. Bartmann, D. Fink, «Homebrew Wind Power», A Hands-on Guide To Harnessing The Wind», 2009, Buckville Publications LLC, Masonville, CO, s. 59-66
- [48] T. Wildi, «Electrical Machines, Drives, and Power Systems,» *Sixth Edition*, Upper Saddle River, New Jersey, USA , Pearson Prentice Hall, 2006, s. 71-74
- [50] J.Johannessen, Tekniske tabeller, Cappelen, 2002, s. 62.

18.2 Personlig meddelelse

- [56] Egil Stemsrud, Senioringeniør, Statikk og beregninger, 24.11.2021
- [57] Henrik Folke Holmberg, Senioringeniør, Konstruksjon og design, 01.12.2021
- [58] Øyvind Hansen, Overingeniør/verksmester, produksjon og verksted, 06.12.2021

18.3 Nettbaserte kilder

- [1] Miljødirektoratet, «FNs klimapanelers nye rapport - enkelt forklart», publisert 08.09.2021, sitert 13.09.21. Tilgjengelig: <https://www.miljodirektoratet.no/aktuelt/arrangementer/2021/september-2021/fns-nye-klimarapport--enkelt-forklart/>
- [2] H. F. Andreassen, K. Linnerud; Cicero, «Vet vi egentlig nok om havvind? Her er fem punkter til en bedre forståelse», publisert 25.04.2021, sitert 01.09.2021. Tilgjengelig: <https://www.tu.no/artikler/vet-vi-egentlig-nok-om-havvind-her-er-fem-punkter-til-en-bedre-forstaelse/509539>
- [4] H. Norum, «Derfor er det ko-ko strømpriser nå», NRK, publisert 16.09 2021, sitert 19.09.2021. Tilgjengelig: <https://www.nrk.no/norge/derfor-er-det-hoye-strompriser-na-1.15633622>
- [5] Strømpriser, Hafslund, Strøm-Kundeorientering, sitert 12.10.2021. Tilgjengelig: www.hafslund.no
- [6] U.S. Energy Information Administration, «Wind explained - History of wind power», publisert 03.17.2021, sitert 01.09.2021. Tilgjengelig: <https://www.eia.gov/energyexplained/wind/history-of-wind-power.php>
- [7] The University of Edinburgh, «James Blyth (1839 - 1906)», publisert 30.10.2018, sitert 01.09.2021. Tilgjengelig: <https://www.ed.ac.uk/alumni/services/notable-alumni/alumni-in-history/james-blyth>
- [8] S. Patel, «Early Wind Technology» MasterResource, publisert 10.05.2011. Tilgjengelig: <https://www.masterresource.org/long-history/early-wind-technology/>
- [9] K. Hofstad, «Vindkraftverk», Store norske leksikon, publisert 29.11.2019, sitert 18.09.2021. Tilgjengelig:

<https://snl.no/vindkraftverk>

- [10] Vestas Wind Systems, «V236-15.0 MW», sitert 22.09.2021. Tilgjengelig:
<https://www.vestas.com/en/products/offshore/V236-15MW>
- [11] Vestas Wind Systems, «News and Media - Images», sitert 22.09.2021. Tilgjengelig:
<https://www.vestas.com/en/media/images>
- [13] K. M. Hovland, «Nansen først med vindkraft», Teknisk Ukeblad, publisert 06.05.2011, sitert 17.09.2021. Tilgjengelig:
<https://www.tu.no/artikler/nansen-forst-med-vindkraft/249192>
- [14] Norges vassdrags- og energidirektorat, «Museumsordningen» NVE, publisert 02.11.2020, sitert 03.10.2021. Tilgjengelig:
<https://museumsordningen.wordpress.com/2011/09/12/norges-forste-vind-elektrisitetsverk/>
- [15] Øyfjellet Vindpark, «Fakta om prosjektet», Øyfjellet Wind AS, sitert 20.09.2021. Tilgjengelig:
<https://oyfjellevind.no/fakta-om-prosjektet/>
- [16] Equinor, «Vi akter å bli en global aktør innen vindkraft til havs. Slik skal vi klare det», sitert 25.09.2021. Tilgjengelig:
<https://www.equinor.com/no/what-we-do/wind.html>
- [17] Wikipedia, «IEC 61400», publisert/sist endret:12.09.2021, sitert 22.09.2021. Tilgjengelig:
https://en.wikipedia.org/wiki/IEC_61400
- [18] J.D. Pitteloud, S. Gsänger, «Small Wind World Report» World Wind Energy Association, Bonn, Germany, publisert juni 2017, sitert 19.08.2021. Tilgjengelig:
<https://wwindea.org/wp-content/uploads/2014/10/SWWR2017-SUMMARY.pdf>
- [19] P. P. Revheim, «Muligheter for småskala vindkraft i Møre og Romsdal», Nasjonalt Vindenergisenter AS, publisert 2017, sitert 18.09.2021. Tilgjengelig:
<https://nves.no/site/wp-content/uploads/2019/07/Sm%C3%A5skala-vindkraft-i-M%C3%B8re-og-Romsdal.pdf>
- [20] Urban Green Energy, «Urban Green Energy VisionAIR5 UGE-3M 3.2kW 3200 Watt Wind Turbine» UGE, sitert 25.09.2021. Tilgjengelig:
<https://www.renugen.co.uk/urban-green-energy-visionair5-uge-3m-3-2kw-3200-watt-wind-turbine/>
- [21] Enova, «El-produksjon», Enova, sitert 05.10.2021. Tilgjengelig:
<https://www.enova.no/privat/alle-energitiltak/solenergi/el-produksjon-/>
- [22] Power Controls, «SD Wind Energy», Power Controls, sitert 14.09.2021. Tilgjengelig:
<https://www.powercontrols.no/vindturbin-3-6kw>
- [23] Tesup Norge, «ATLAS2.0 Vindturbin», sitert 11.10.2021. Tilgjengelig:
<https://www.tesup-norge.com/product-page/atlas2-2kw-48v-vindturbin-elektriskkjoretoy-Norge>

- [24] Tesup Norge, «MAGNUM 5 Vindturbin», sitert 11.10.2021. Tilgjengelig:
<https://www.tesup-norge.com/product-page/magnum-5-vindturbin-12v-24v-48v-Norge-5KW>
- [25] Halo Energy, «The Innovative Halo 6kW Wind Turbine», sitert 15.10.2021. Tilgjengelig:
<https://www.halo.energy/project-gallery-page>
- [26] D. Weston, «Measurable power gains found in multi-rotor Vestas concept», Windpower Monthly, publisert 12.02.2018, sitert 05.10.2021. Tilgjengelig:
<https://www.windpowermonthly.com/article/1521072/measurable-power-gains-found-multi-rotor-vestas-concept>
- [27] DTU, «4-Rotor Concept Turbine» DTU Wind Energy, sitert 05.10.21. Tilgjengelig:
<https://windenergy.dtu.dk/english/Research/Research-Facilities/Konceptmoellen>
- [28] Vortex Bladeless, «How it works», sitert 23.09.1021. Tilgjengelig:
<https://vortexbladeless.com/technology-design/>
- [29] Amazon, «Pikasola Wind Turbine 200W max 220W 12V 5 Blade Wind Vertical Axis Generator», Pikasola, sitert 11.10.2021. Tilgjengelig:
https://www.amazon.com/PIKASOLA-Vertical-Generator-Permanent-Controller/dp/B07ZPSGJZK/ref=sr_1_7?dchild=1&keywords=pikasola&qid=1633985100&sr=8-7
- [32] NPD-Solution, «The Principles of Integrated Product Development», 2019, sitert 13.10.2021, Tilgjengelig:
<http://www.npd-solutions.com/principles.html>
- [40] Ø. Byrkjedal, E. Åkervik og K. Vindteknikk, «Rapport nr 9/2009, Vindkart for Norge, NVE,» Oktober 2009, sitert 05.10.2021. Tilgjengelig:
https://www.nve.no/media/2470/vindkart_for_norge_oppdagsrapporta10-09.pdf
- [43] M.V. Bøe, «Energi», Store Norske leksikon, publisert/endret 07.08.2020, sitert 05.10.2021. Tilgjengelig:
<https://snl.no/energi>
- [45] P. Dvorak, «Vertical axis wind turbine technology continues to improve,» Wind Power Engineering & Development, publisert 07.07.2017, sitert 06.10.2021. Tilgjengelig:
<https://www.windpowerengineering.com/vertical-axis-wind-turbine-technology-continues-improve/>.
- [47] Electrical Academia, «Horisontal-Axis Wind Turbine (HAWT) Working Principle», sitert 15.10.2021, Tilgjengelig:
<https://electricalacademia.com/renewable-energy/horizontal-axis-wind-turbine-hawt-working-principle-single-blade-two-blade-three-blade-wind-turbine/>
- [49] Wikipedia, «Generator», publisert/endret 08.03.2021, sitert 03.12.2021. Tilgjengelig:
<https://no.wikipedia.org/wiki/Generator>
- [51] T. Holtebekk, S.K Myren og T. Ulseth, «Desibel», Store Norske Leksikon, publisert/endret: 11.05.2020, sitert 01.12.2021. Tilgjengelig:
<https://snl.no/desibel>

- [52] Miljødirektoratet; «Fakta – Støy fra vindmøller», Faktaark utarbeidet av SFT og NVE, sitert 10.12.2021. Tilgjengelig:
<https://www.miljodirektoratet.no/globalassets/publikasjoner/klif2/publikasjoner/luft/1738/ta1738.pdf>
- [53] T. Gjestland, «infralyd», Store Norske Leksikon, publisert/endret 24.09.2019, sitert 01.12.2021. Tilgjengelig:
<https://snl.no/infralyd>
- [54] Olje- og energidepartementet, Moderniseringsdepartementet, «Veileder for kommunal behandling av mindre vindkraftverk», sitert 10.12.2021. Tilgjengelig:
<https://www.nve.no/media/2248/veilder-mindre-vindkraftanlegg.pdf>
- [55] Armoured Edge, «Leading Edge Erosion – A serious and expensive issue», sitert 05.11.2021. Tilgjengelig:
<https://armourededge.com/leading-edge-erosion/>
- [59] 6+ Best Wind Simulation Software Download, Download Cloud, sitert 15.12.2021. Tilgjengelig:
<https://www.downloadcloud.com/wind-simulation-software.html>
- [60] Alibaba.com, «2kW 3KW 4KW 5KW 10KW High Efficient Permanent Magnet synchronous Generator», sitert 10.10.2021. Tilgjengelig:
https://www.alibaba.com/product-detail/2kW-3KW-4KW-5KW-10KW-High_60684683852.html

19 VEDLEGG

Her presenteres alle vedlegg og underlag for rapporten.

Tabell 19.1: Vedleggs-oversikt

Vedlegg nr.	Innhold	Side
V1	Tabeller med fylkesvis oversikt over vindressurser i Norge, publisert av NVE i 2009 [40].	I
V2	Tekniske tabeller med tillatte belastninger [50].	II
V3	Teknisk tegning av synkrongeneratoren som det er utgangspunktet for modelleringen, hentet fra kilde [60].	III
V4	Teknisk måltegning med anvisning av hovedmålene i vindturbinen med tre monterte moduler.	IV

Vedlegg 1:

Tabell 2 Fylkesvis oversikt over arealer. "Totalt areal" er fylkets totale areal. "Utnyttbart areal" er den andelen av fylkets areal hvor det vil være mulig å bygge ut vindkraft etter at GIS analysen med utvalgsriterier er gjennomgått. "Areal med U>6 m/s" er andelen av utnyttbart areal hvor vindressursene er tilstrekkelig gode (årsmiddelvind > 6 m/s). "Areal med U>7 m/s" er det utnyttbart areal med årsmiddelvind større enn 7 m/s. "Areal med U>8 m/s" er det utnyttbart areal med årsmiddelvind større enn 8 m/s. Tallene er oppgitt i km².

Fylke	Totalt areal	Utnyttbart areal	Areal med U>6	Areal med U>7	Areal med U>8
Østfold	4170	24	23	0	0
Akershus	4910	47	10	0	0
Oslo	454	0	0	0	0
Hedmark	27400	5300	3630	1790	430
Oppland	25230	6670	4980	2430	790
Buskerud	14930	2560	2340	1520	540
Vestfold	2210	5,7	5,0	0,9	0
Telemark	15330	1680	1530	1010	370
Aust-Agder	9170	510	460	290	66
Vest-Agder	7280	1540	1480	1250	440
Rogaland	9400	2760	2440	1960	940
Hordaland	15420	5150	3840	2180	420
Sogn og Fjordane	18660	8470	5580	3590	1670
Møre og Romsdal	15100	5880	4280	2570	750
Sør-Trøndelag	18790	4820	4470	3150	1120
Nord-Trøndelag	22350	5940	5380	3520	1140
Nordland	38180	16600	13710	8550	2720
Troms	25880	12680	9880	4850	770
Finnmark	48790	26030	24060	15050	4810
Hele landet	323600	128200	88100	53700	16980

Tabell 4 Beregnet fylkesvis vindkraftpotensial ved å anta en utbyggingstetthet på 8MW/km². "Potensiale U>6" angir fylkets vindkraftpotensiale ved utbygging av alle utnyttbare arealer innenfor fylket med årsmiddelvind større enn 6 m/s. Beregningene er også gjort for områdene med årsmiddelvind høyere enn 7 m/s og 8 m/s. Tallene er gitt i TWh produksjon per år. Det er ikke tatt hensyn til eventuelle tap som følge av ising i produksjonsberegningene.

Fylke	Potensiale U>6	Potensiale U>7	Potensiale U>8
Østfold	0,4	0	0
Akershus	0,2	0	0
Oslo	0	0	0
Hedmark	72,9	41,3	10,8
Oppland	101	55,2	19,1
Buskerud	49,1	35,4	13,3
Vestfold	0,1	<0,1	0
Telemark	32,9	23,9	9,2
Aust-Agder	9,8	6,8	1,6
Vest-Agder	32,6	29,4	11,1
Rogaland	55,1	46,8	23,7
Hordaland	81,3	50,3	10,4
Sogn og Fjordane	120	84,0	41,2
Møre og Romsdal	86,9	57,4	17,5
Sør-Trøndelag	97,8	74,1	27,7
Nord-Trøndelag	116	82,7	28,3
Nordland	289	197	66,6
Troms	202	109	18,4
Finnmark	500	349	120
Hele landet	1847	1243	419

Vedlegg 2:

Tillatte belastninger

Tillatte belastninger for stålkonstruksjoner i N/mm²

Materiale	Belastningstype	Strekk σ_s	Trykk σ_t	Bøying σ_b	Vridning/ skjæring τ
NS-EN10025 S235JRG2	A I	100–150	100–150	110–160	65– 95
	B II	65– 95	65– 95	70–105	40– 60
	C III	45– 70	45– 70	50– 75	30– 45
NS-EN10025 S355J0	A I	140–205	140–205	150–215	80–125
	B II	90–130	90–130	100–150	55– 85
	C III	65– 95	65–95	70–105	40– 60
NS-EN10025 E360	A I	205–300	205–300	225–340	125–190
	B II	130–200	130–200	150–215	80–125
	C III	90–140	90–140	105–125	60– 90
NS-EN10083-1/-2 Seigherdingsstål 42Cr4Mo	A I	345–590	345–590	380–650	205–350
	B II	220–380	220–380	240–410	160–240
	C III	160–260	160–260	170–235	100–190
NS-11645 Sst 450	A I	80–120	105–160	90–130	50– 70
	B II	50– 80	60– 90	55– 85	30– 50
	C III	30– 50	30– 50	40– 60	20– 35
NS-11650 Sst 520	A I	90–130	120–180	100–140	45– 70
	B II	60– 90	70–110	70–110	35– 50
	C III	35– 60	35– 60	50– 75	25– 40
NS-11100* SjG 200	A I	20– 40	–110	45– 70	30– 45
	B II	10– 20	30– 60	30– 45	20– 30
	C III	5– 15	5– 15	20– 30	15– 20

Tabellen har begrenset gyldighet og kan benyttes der det ikke blir gjort nøyaktige beregninger etter bruddhypotesen. Verdiene må reduseres hvis overflatene ikke er glattpolerte, og hvis det er muligheter for kjervirkning.

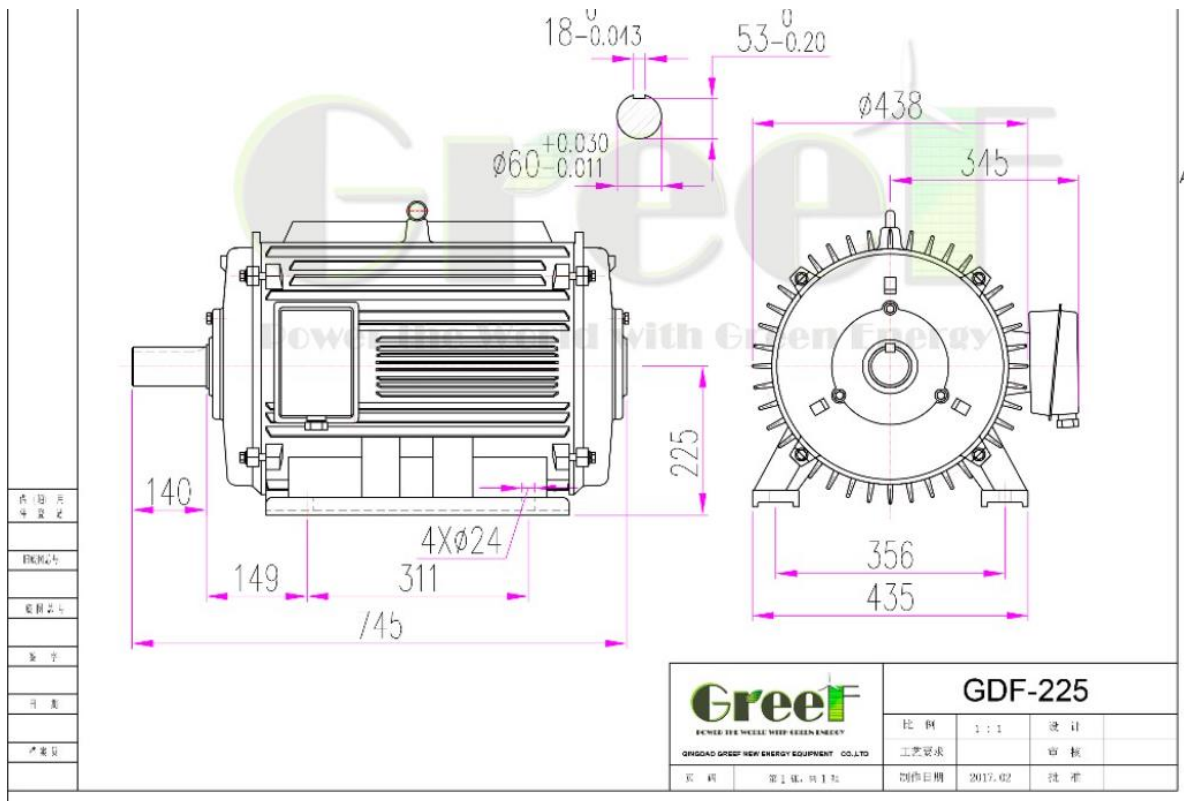
Belastningstype A gjelder for statiske belastninger.

Belastningstype B gjelder for hurtig utsvingende belastninger.

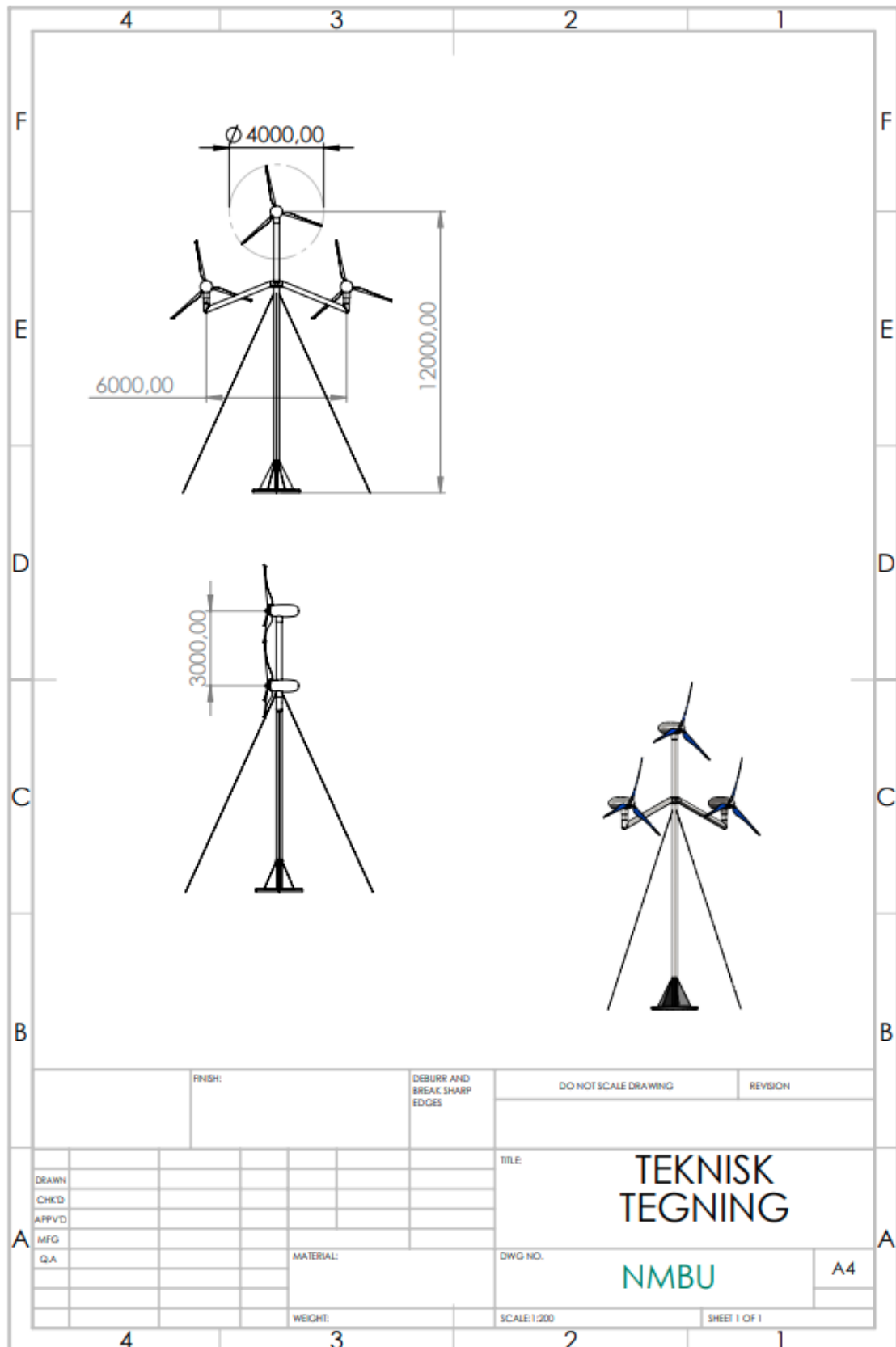
Belastningstype C gjelder for hurtig vekslende belastninger.

*) Verdiene for bøying, vridning og skjæring gjelder sirkelformede tverrsnitt. Ved bøying må verdiene reduseres med 20 % for rektangulære tverrsnitt og med 40 % for I-formet tverrsnitt. Ved vridning og skjæring reduseres verdiene for kvadratisk tverrsnitt med 40 % og for rektangulære tverrsnitt med 40–60 %.

Vedlegg 3:



Vedlegg 4:





Norges miljø- og biovitenskapelige universitet
Noregs miljø- og biovitenskapelige universitet
Norwegian University of Life Sciences

Postboks 5003
NO-1432 Ås
Norway