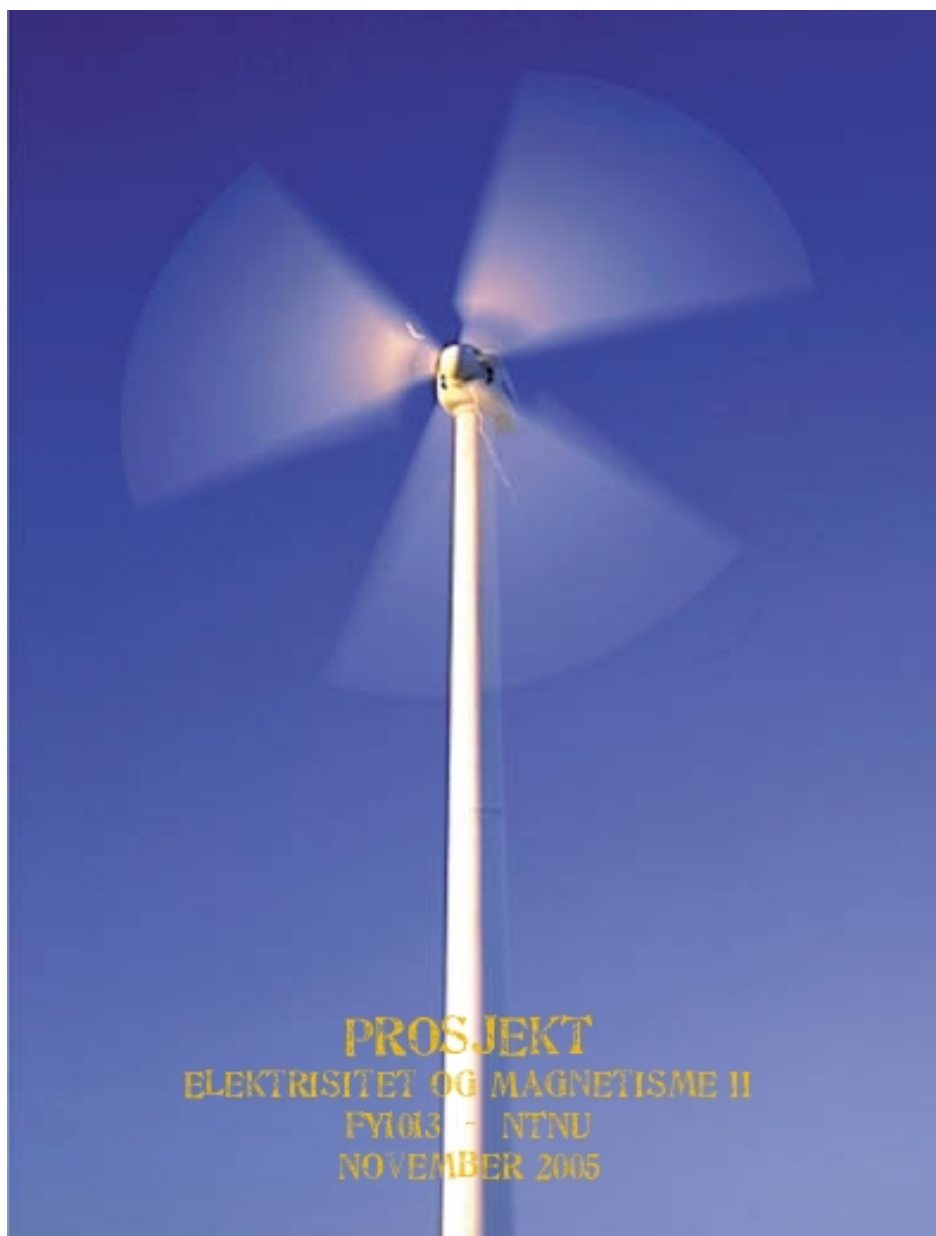


VINDKRAFTEN UTNYTTES



OLAV ANDREAS SÆTHER OG NILS BJARNE GUNNUFSEN



Abstrakt

Vinden bærer med seg store mengder energi. De siste drøye tusen år er denne energien blitt utnyttet av mennesker, i størst grad i kornmøller, pumper, skipsfart og i den senere tid også til elektrisitetsproduksjon. Frem til forrige århundre var Norge en stor vindnasjon med sin store flåte av seilskuter.

Vindenergien blir utnyttet ved å overføre den til mekanisk bevegelsesenergi. Dette blir gjort ved hjelp av seil som gir vinden stor motstand. I vindmøller festes seilene til en roterende aksling, og det finnes vindmøller til alle formål som roterer med både horisontal og vertikal akse. Den horisontale er i dag mest utbredt.

I elektriske vindmøller gjøres kraften i rotasjonen om til elektrisitet i generatoren ved magnetisk induksjon. En roterende magnet omgis av elektromagneter tilknyttet det elektriske nettet. Når denne roterer endres magnetfeltet rundt den, slik at det blir induert elektrisk spenning ut på elektrisitetsnettet. Det vanlige er å bruke en generator som produserer strøm i tre forskjellige faser, og da i de aller fleste tilfeller den asynkrone varianten, som inneholder en kortslutningsrotor. Dette fordi vinden yter en varierende effekt. Derfor bruker man også i stor grad indirekte tilknytning til elektrisitetsnettet.

Historisk er vindmøller et nytt fenomen i det Norske landskapet. Mens Nederland og andre land på kontinentet tok i bruk vindmøller i kverning av av korn foretrakk nordmenne å temme vannets krefter og bygge små møllehus i elver og bekkefar. Dette tok vi med oss videre inn i den elektriske tidsalder, og 99% av vår elektriske kraft kommer i dag fra vandkraftanlegg. Mens Norge har bygd vannkraft har land som Danmark og Tyskland måtte satse på metoder som ikke stilte krav til fjell og fossefall. Vindkraft ble et naturlig valg.

I Norge opplever vi nå at kraftbehovet øker, og det er ikke ønskelig med flere store oppdemninger av elver og fossefall. Vi blir altså nødt til å satse på andre former for miljøvenlig energiproduksjon, og vindkraft er et av flere alternativer. Den tekniske utviklingen har komnt langt, og prisnivået sunket betraktelig. Offentlige rapporter antyder at det finnes potensial til å doble Norges kraftproduksjon ved integrasjon av vindkraft alene. Investeringslysten hos kraftselskapene er stor, men kapasiteten på det eksisterende kraftnettet setter begrensninger. Skal hele potensialet hentes ut trengs det politisk vilje til statlige utbygginger.

Videre medfører den norske geografien med holmer, skjær og fjell betydelig større kostnader til fundamentering og utbygging forøvrig, sammenlignet med land som har åpne slettelandskaper. Det antydes at en utbygging av vindkraft i dag vil gi en pris på om lag 27-34 øre pr kWh, noe som ligger over dagens spotpris. Men forventninger i markedet er at utbyggingskostnadene vil fortsette å synke de kommende år, ettersom man får mer erfaring og ytterligere ny teknologi.

Innholdsfortegnelse

Abstrakt.....	2
Innledende.....	4
Historikk.....	4
Vikinger.....	4
Persere.....	5
Kinesere, tibetanere og europeere.....	6
Amerikanske vindroser.....	7
Teknisk.....	7
Rotorbladene.....	7
Generatoren.....	9
Trefaset synkrongenerator.....	12
Trefaset asynkron kortslutningsgenerator.....	14
Indirekte nettilkobling.....	14
Transformator.....	15
Kjøling.....	15
Anemometer.....	15
Lokale vindforhold.....	16
Vindens effekt.....	17
Betz' lov.....	18
Vindmølleparker.....	19
Norske tilstander.....	19
Potensialet for vindkraft i Norge.....	19
Eksisterende vindkraft, og planer for vindkraft i Norge.....	20
Offshore vindturbiner.....	23
Integrasjon av vindkraft i eksisterende nett.....	24
Vindkraft og energilagring.....	26
Konkluderende.....	28
Kildehenvisninger.....	32

Innledende

En åker med halvmodne havrekorn. Vinden feier gjennom den. Mennesket ser hvordan kornene bøyer seg etter tur, og danner seg i bølgeformasjoner i stråmassivene. I det ene øyeblikket befinner en slik bølge seg ett sted. I det neste et annet. Med en annen fart. I ny retning.

Vinden er veldig inkonsekvent både når det gjelder styrke, hastighet, tidspunkt og retning. Det eneste man visste om den, var at den alltid var der, at den var sikker og kraftful. Og man fant etterhvert ut flere måter å gjøre seg nytte av energien den bar på.

Med dette prosjektet ønsker vi å se på hvordan mennesket gjennom tidene har benyttet seg av kreftene som finnes i vinden, og hvordan vinden i dag brukes til å lage elektrisitet. Vi vil også vurdere Norges fremtid som vindkraftsprodusent.

Historikk

Vikinger

Naturfenomenet vind har dermed betydd mye for menneskenes sivilisasjoner. Seil har fraktet folk i båter til helt ukjente havner og kontinenter. Et folkeslag fra Skandinavia var rundt år 1000 beryktet på verdenshavet for sine for samtiden svært så stabile seilbåter som de brukte på plyndringstoktene sine. I tillegg til motivasjonen fra sin klokkeetro på lovdordene i mytologien, var vikingene godt bereiste i Europa, og hadde god kunnskap om båtkonstruksjon og navigering.

Litt lenger frem i tid, for et par hundre år siden, fraktet de stolte seilskutene folk og fe over havene med last og passasjerer. I seilskipsnæringen var Norge en av de virkelig store aktørene. Særlig langs kysten sør og øst i landet hadde man ypperlige forhold for å drive skipsverft. Forekomstene av tømmer var store, og det var enkelt å føre tømmeret til kysten med de mange vannveiene. En stor prosentandel av seilskipene som seilte på sjøen på verdensbasis hadde derfor hjemhavn i Norge.

Tiden med seilskutene var over da dampmaskinen gjorde innpass. Men det betydde ikke slutten på å utvinne vindenergi, slik mange dengang trodde. Allerede på da skuta Fram gjorde sin banebrytende polferd, var vinden tilbake på banen her til lands. Skipet hadde fått installert en elektrisitetsproduserende vindturbin som sørget for belysningen ombord. Selv den dag i dag spekulerer man i å la kontainerskip ha seil for å spare dyrebart drivstoff til motorene.

At det var på det åpne hav at man først utnyttet vindkraften her til lands var nok mer tilfeldig. Men det kan være nyttig å tenke over hva som skiller vinden til havs fra den på land. Det er nemlig store friksjonskrefter ute og går når vinden blåser. Vinden bremses av alt som står i dens vei, være seg skjærgård, trær, busker, hus, vindmøller, fjell osv. , og de stedene på jordens overflate hvor man har minst friksjon over større områder er da nettopp sjøene. Med andre ord er det der de kraftmessige forutsetningene for å utnytte vind i teorien er best.

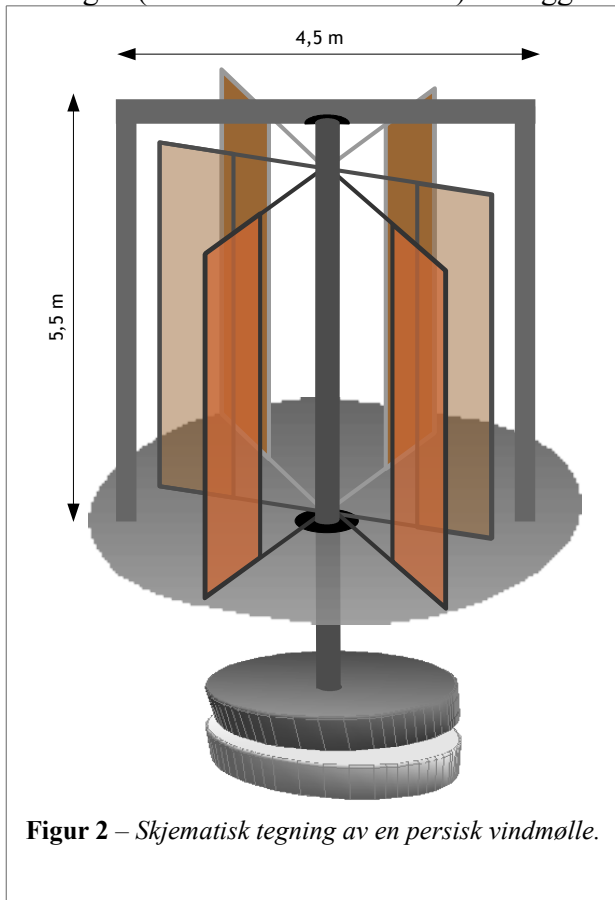
Persere

Men det blåser da riktignok på land også. De første sporene på bruk av vindenergi har vi fra Persia rundt år 950. Flere geografer fra den tiden har i sine notater nevnt hvordan folket i Seistan lot vinden drive møller som hentet vann opp fra kanaler under jorda.

Det ble rapportert om flere måter å konstruere møller på i Persia allerede den gang. Den ene typen forsvant med tiden, mens den andre eksisterte frem til vår tid (Man regner med at den siste ble satt ut av drift en gang på 1970-tallet). Mølletypen var et vanlig syn i et stort område som blant annet omfatter Iran, Herat og Afghanistan. Det mest kjente mølleområdet i regionen er Neh, hvor man hadde en linje på hele 75 slike møller.

Mølla (se figur 1) hadde til hensikt å male opp

mais. Den ble satt sammen slik at møllestenen var plassert under skovlene. Dette innebar at akslingen (som er i senteret i aksen) i tillegg til å bære vekta av seilene også gikk gjennom et hull i



steinsenga(som den hvilte på) og også bar vekta til den øvre møllestenen. Stenene kunne være inntil halvannen meter i diameter og spindelen var tilrettelagt slik at når man skulle reparere eller bytte ut en slitt møllesten, kunne man huke den av uten å måtte ta ned seilene.

Seilene på de persiske møllene var om lag fem-seks meter høye, og diameteren varierte fra tre til noe over fire meter. Som vist i figur 3 dekker seilene bare det ytterste området på bladene. Seilene er ganske enkelt laget av flere tynne tømmerstokker som er blitt bundet sammen.

Rundt seilkonstruksjonen måtte man oftest bygge vegger som sendte vinden gjennom en åpning som ble trangere og trangere mot seilene for å få mest mulig kraft (og mølla krevde likevel meget sterk vind for å fungere). Se figur 2 til høyre. Noen møller ble bygget med en åpning på hver av de fire veggene, slik at den kunne brukes i vind fra flere retninger.



Figur 1 -Mann ved siden av en klassisk persisk vindmølle. Denen typen møller var operative fra rundt år 950 til på 1970-tallet.¹

¹ Figur 1 er fra boken *History of Windpower*, Cambridge University Press 1994

Med tanke på at hver mølle hadde ganske kort levetid, og man stadig måtte bygge nye, har en del sett på det som litt bemerkelsesverdig at det ikke oppstod endringer i byggetradisjonen på møller i regionen før på slutten av nittenhundretallet, nesten tusen år etter den første er konstatert at ble bygd.

Kinesere, tibetanere og europeere

Det påstås at det var korsfarererne som introduserte vindmøllene for den europeiske sivilisasjonen, men det hersker en del usikkerhet rundt akkurat dette. Likeså er man skeptiske til teorier om at Tibet hadde en stor vindmølletradisjon allerede på 400-tallet, dette bygget på nedskrevne tekster som nevner vindmøller samt de vinddrevne bønnehjulene man har tradisjon på å bruke i landet. De fleste regner med at det er snakk om feiloversettelser av tekstene. Det har i alle fall ikke blitt funnet noen spor som tyder på at det fantes vindmøller der så tidlig. Uansett tilegnet man seg kunnskapen fra Persia, og laget møller som betegnes som “strømlinjeformede” ettersom seilene var konstruert slik at man fanget vinden på den ene siden, mens den andre var glattere eller laget i kurve for å gi mindre motstand enn den andre.

I Kina tok man til seg lærdommen fra Persia etter at en minister (som var en meget god matematiker) under Chinghi Khan kom med en persis beskrivelse av møllene, som han riktingok som en feiltakelse presenterte som europeiske, og kommenterte hvor godt det skulle være hvis Kina kunne begynne å bruke den. Kina fikk sin egen vindmølletradisjon, og møllene ble hovedsakelig brukt for å heise opp vann. Disse tok også en annen form enn de persiske, og kalles av historikere for velutrustede.

Europeerne tok den beste lærdommen fra alle tre. De laget etterhvert svært driftsikre, glidende og velutrustede møller. I stor grad ble møller med horisontale akser brukt, og oftest med fire vinger/



Figur 3 - Tradisjonell europeisk vindmølleutforming.²

seil. Se figur 3. Disse viste seg å være mer effektive enn de vertikale. Man unngikk blant annet problemene med å måtte konstruere vingene slik at de både måtte kunne bevege seg med og mot vinden, slik de stående møllene måtte. Nøyaktige håndverkere laget tannhjul som styrte rotasjonen fra å gå horisontalt til vertikalt inne i mølla, og ned til møllehjulet. I utviklingen av bedre byggeteknologi hadde vindmøllene god drahjelp fra land med mange småelver, hvor samme teknologien ble brukt i møller som var drevet av fossekraft.

² Figur 3 er fra <http://www.biopix.dk/>

Amerikanske vindroser

Olje ble med tiden et innbringende stoff å pumpe opp av jorda. Mange vindmøller ble bygd til dette formålet. Et typisk syn fra den amerikanske landsbygda er rotorene som blir brukt til slike pumper, for ikke snakke om vannpumper. Disse har mange blader, og kalles vindrosetypen (figur 4).

Denne typen rotor ble også brukt til elektrisitetsproduksjon i begynnelsen. Det var først en danske, Poul la Cour, som innså at vindmøllene blir mer effektive når de har få rotorblader, og dermed beveget seg mye hurtigere. De kjente vindkraftverkene med tre blader i propellen regnes som dansk standard, men de fleste land har tatt etter. Danskene var tidlig ute med sin elektrisitetsproduksjon med vindmøller. Allerede før 1920 hadde mer enn hundre lokale elverk installert en vindmølle. Disse dekket den gang hele 3 % av det danske energiforbruket.



Figur 4 - Vindroser i California roterer saktere enn de danske propellene, med flere blader.³

Interessen for vindkraft internasjonalt har gått i berg og daler, med en stor økning i interessen de siste år, i stor grad som følge av alt fokuset på miljøvern og menneskeskapt klimaforandringer.

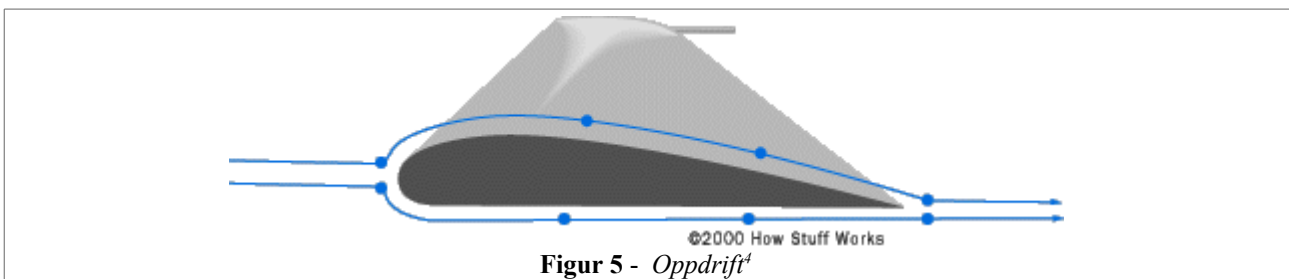
Teknisk

Energi er den mengde arbeid et fysisk system kan utføre. Arbeid defineres som kraft gange strekning og får da dimensjonen $nM = J$

Energi kan ikke oppstå, og kan ikke forsvinne. Altså kan den heller ikke forbrukes, den kan bare omgjøres til en annen form. Vindmøllas oppgave er å omdanne luftmolekylenes bevegelsesenergi om til rotasjonsenergi på rotorsystemet i vindmølla. (Rotoren er betegnelsen på alt i vindmølla som dreier som direkte følge av vinden).

I elektriske vindmøller skal denne rotasjonsenergien igjen omdannes til elektrisk energi. De neste delkapitlene ser vi på hvordan dette gjøres.

Rotorbladene



Se nå på figur 5. Luftmolekylene som passerer på oversiden av vingen må bevege seg hurtigere enn

³ Figur 4 er fra <http://www.qmarkstudio.com/Kunst.htm>

⁴ Figur 5 er hentet fra <http://travel.howstuffworks.com/airplane6.htm>

luftmolekylene på undersiden, ettersom de har en lengre vei å forflytte seg enn de under. Dette medfører at lufttrykket på undersiden av vingen vil være høyere enn det over, og vi får slik en kraft som trekker vingen oppover, vinkelrett på den virkende vindretningen.

Et annet fysisk faktum som må få følger for utarbeidelsen av propellbladene kan illustreres med reklameflaggene til enkelte busselskap. På taket av bussen har noen funnet ut at de kan feste en liten vimpel. Når bussen er i fart, flagerer flagget bakover i motsatt retning av den bussen kjører. Det er ikke vind, men luftmotstanden som oppstår når bussen kjører. Hvis bussen nå kjører med en konstant fart, og vi lar det komme inn en vind vinkelrett på bussens kjøreretning, vil flagget slå skrått ut. Vindkreftene som virker på det vil være vektorsummen av "kjørevinden" og vinden som vi sendte fra siden. Resultantkraften vil være et sted mellom bakover og vinkelrett på kjøreretningen i samme retning som vinden blåser. Hvis vi endrer vindhastigheten, vil vinkelutslaget til flagget variere.

Det samme skjer når rotorbladene beveger seg. Det er ikke nok at vinden virker på dem, de får også en vindkraft på dem takket være rotasjonsbevegelsen. Hvis man ser på to punkter på et rotorblad, ser man at et punkt helt ytterst på propellbladet, beveger seg mye raskere i forhold til luften rundt punktet, enn et punkt valgt lengre inne på propellbladet. Derfor vil resultantkraften være forskjellig fra de to stedene selv om den ytre vinden har samme hastighet mot begge punkter.

Når vi nå slår sammen disse to elementene over, skjønner vi at rotorbladet er formet med en form som ligner på det i figur 5, men at denne formen er vridd, slik at resultantkraften som virker på bladet og slik lager en oppdrift, vil være i samme retning for hele bladet.



Figur 6 - Rotorbladene er vridd og kan dreies for å øke ytelsen.⁵

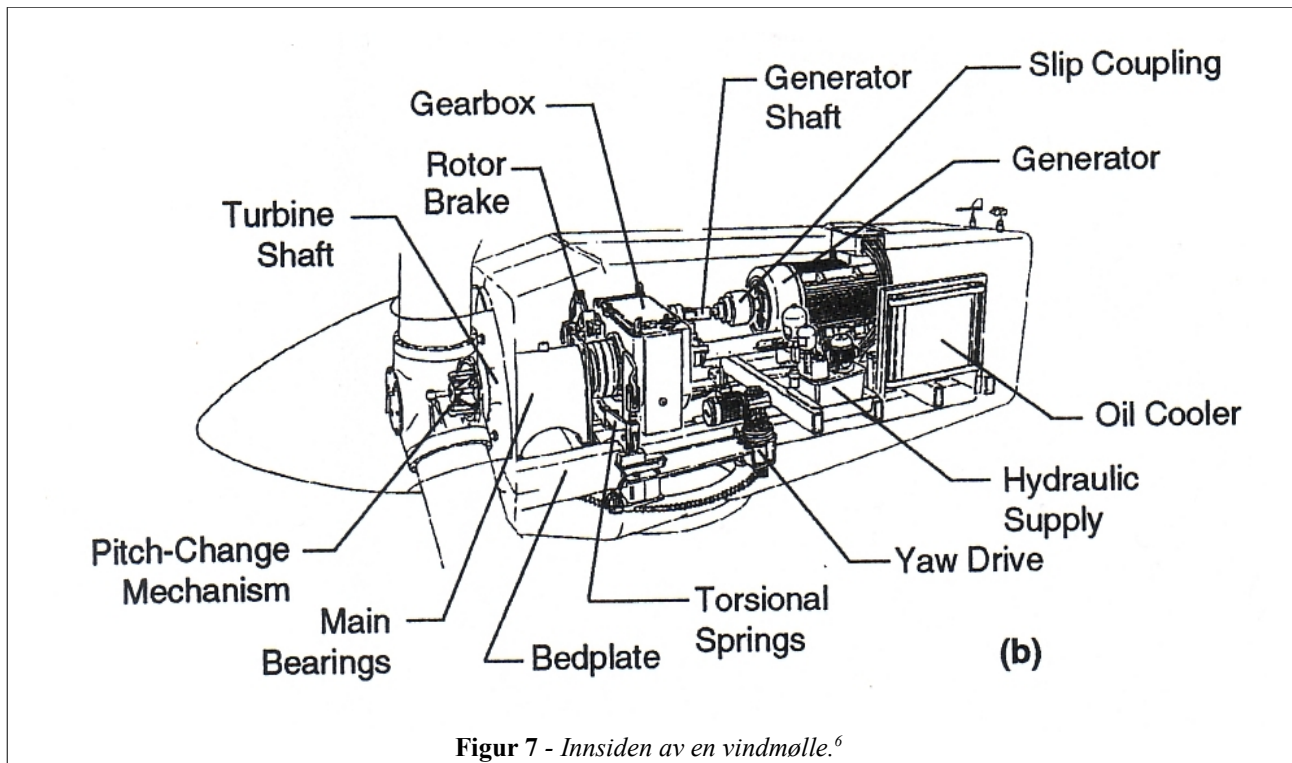
Rotorbladene var ofte konstruert i metall. I tillegg til å veie uønsket mye, lå problemer som metalltretthet og lurte. Det er store krefter som virker på bladene, særlig turbulens sliter på konstruksjonene. Man har et eksempel på en tysk vindmølle med propelldiameter på 100 m som ikke tålte belastningen, og det utviklet seg revner. Og det var etter bare knappe tre ukers drift. Det er dramatisk når så store deler bryter av.

Man konstruerer derfor de fleste moderne, store vindmøller (slik som på figur 6) av polyester som blir forsterket med glassfiber, karbonfiber eller aramid. Treforsterkninger forsøkes også brukt i

⁵ Figur 6 er fra www.windpower.org

voksende grad.

Rotorbladene har også en annen viktig finess. På moderne møller er de nemlig konstruert slik at de kan dreies rundt seg selv, slik at man alltid får mest mulig oppdrift. (Tenk på flymaskiners flapper på vingene som de bruker under take-off eller sving). På figur 7 er denne funksjonaliteten beskrevet som "Pitch-Change Mechanism". Dette er pirkete ingeniørkunst, da bladet bare må rotere inntil en grad om gangen. Det er som regel hydrøyliske systemer som styrer vinkelen. Disse er igjen styrt av en datamaskin som er koblet til vindmåleren (beskrevet senere).



Figur 7 - Innsiden av en vindmølle.⁶

Som det synes på figur % er det ikke bare rotorbladene som kan vrís på. Selve vindmølla er lagget slik at den kan roteres rundt horisontalt. (markert Yaw Drive på figur 7). Dette er da også for å stille mølla til den vinkelen i forhold til vinden som den yter best i, og er også styrt av en datamaskin.

Generatoren

Etter girkassa ender rotasjonen fra propellen opp i generatoren (se figur 8). Dette er den komponenten i vindmølla som produserer elektrisiteten. For å forstå hva som skjer inne i generatoren, må man kjenne til magnetisk induksjon. Dette vil vi vise ved et eksempel der vi genererer strøm i en spole ved hjelp av en stavmagnet.

⁶ Figur 7 er fra boken *Wind Turbine Technology* av David A Spera, 1994 Asme Press

På figur 9 og 10 nedenfor har vi en elektromagnet (lederspole) og en stavmagnet (permanent magnet). Elektromagneten (spolen som er plassert øverst i de to figurene) er fastmontert, mens den permanente magneten kan rotere. De grønne linjene markerer magnetfeltet fra stavmagneten fra magnetens nordpol til sydpol.

Magnetisk fluks Φ er målet på magnetfeltet \vec{B} som går gjennom en tenkt flate. For enkelhets skyld antar vi at magnetfeltet har en konstant absoluttverdi $|\vec{B}|=B_0$. Når vi har en ledersløyfe som det går et tidsavhengig magnetfelt gjennom (fluks), vil det oppstå en elektrisk strøm i kretsen; det blir *indusert* en elektrisk spenning. Matematisk er den magnetiske fluksen gitt ved:

$$\Phi = \int \vec{B} \cdot d\vec{A}$$

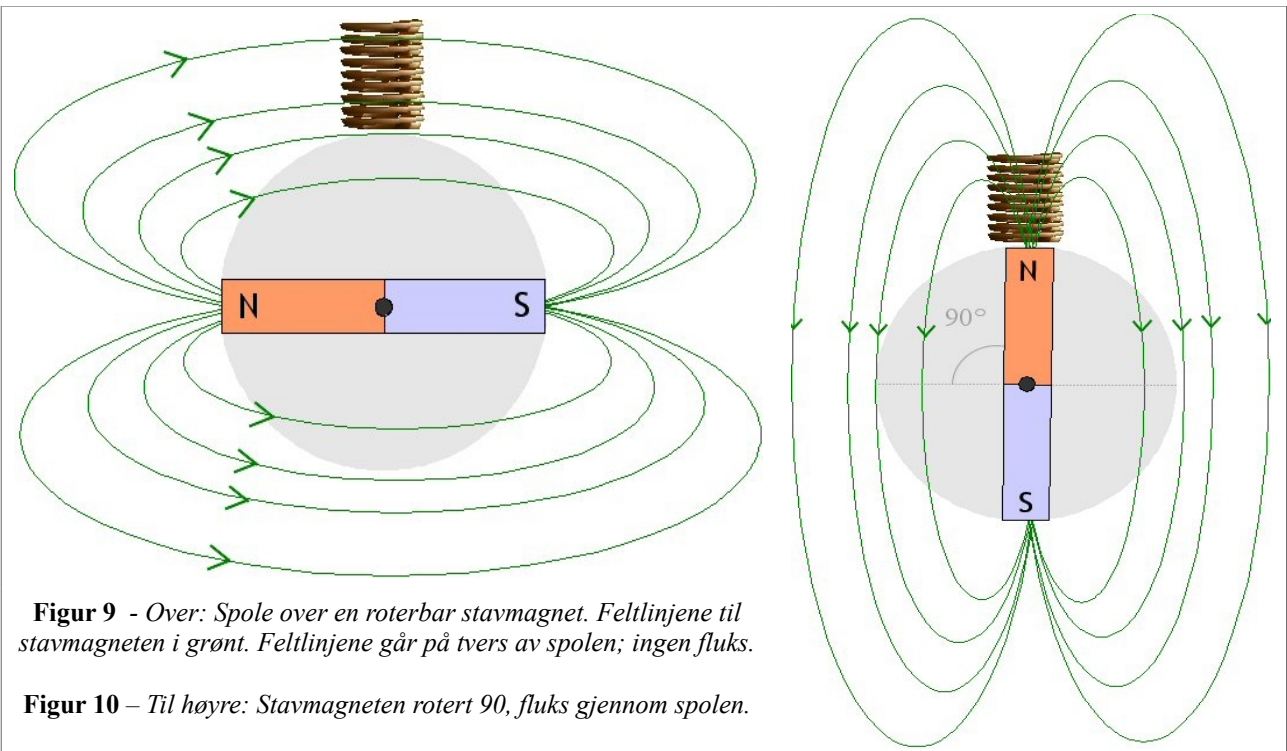
Spolen omslutter gaussflaten som vi skal finne fluksen gjennom. Vi må altså finne arealet av flaten for å kunne integrere magnetfeltet over det. Spolen består av et antall n viklinger/sløyfer med radius r som er forbundet. Altså er det flere flater, hver med areal $\pi \cdot r^2$, oppå hverandre, og vi får arealet $A = n \cdot \pi \cdot r^2$

Vi definerer θ som vinkelen magnetfeltet \vec{B} danner med figurenes horisontalplan. Fluksen gjennom spolen i figur 1 og 2 er da gitt ved

$$\Phi = n \cdot \pi \cdot r^2 \cdot B_0 \cdot \sin \theta$$



Figur 8 - Tverrsnitt av en generator.⁷



Figur 9 - Over: Spole over en roterbar stavmagnet. Feltlinjene til stavmagneten i grønt. Feltlinjene går på tvers av spolen; ingen fluks.

Figur 10 – Til høyre: Stavmagneten rotert 90, fluks gjennom spolen.

⁷ Figur 8 er fra http://de.wikipedia.org/wiki/Elektrischer_Generator

Nå kan vi se på de to situasjonene i figur 9 og figur 10. På figur 9 går magnetfeltet tilnærmet parallellt med flatene i spolen. I denne situasjonen har vi ingen fluks:

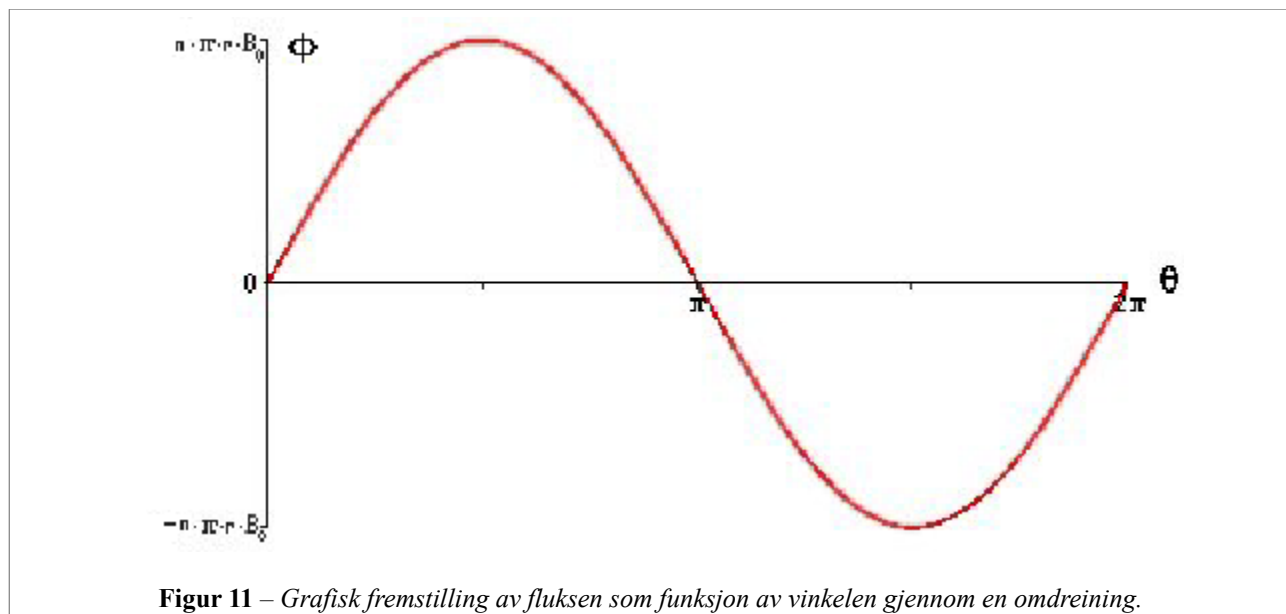
$$\Phi_0 = 0$$

Se nå på figur 2. Vi har nå dreiet stavmagneten 90° med klokka. Vi ser at feltlinjene nå går tilnærmet vinkelrett gjennom flatene våre, og vi har dermed den største fluksen.

Når stavmagneten roterer videre, vil fluksen gjennom spolen synke. Etter 180 graders rotasjon, vil fluksen være tilbake på null. Rotasjonen fortsetter, og vi får motsatt fortegn på verdier for magnetfeltet som går gjennom flaten ettersom vi nå har snudd om stavmagneten (i forhold til på de to figurene) slik at magnetfeltet peker den andre veien. Vinkelen varierer med tiden slik at $\theta(t) = \omega \cdot t$, der ω er vinkelhastigheten til magneten og t er tiden. (vi behandler den her som om den var konstant, men i en vindmølle vil denne også variere med tiden). Vi ser altså at

$$\Phi(t) = n \cdot 2 \cdot r^2 \cdot B_0 \cdot \sin(\omega \cdot t)$$

der B_0 er den konstante størrelsen på magnetfeltet fra den permanente magneten.



Figur 11 – Grafisk fremstilling av fluksen som funksjon av vinkelen gjennom en omdreining.

Som nevnt induseres det elektrisk spenning i en sløyfe av strømførende materiale, når det er endringer i den magnetiske fluksen gjennom sløyfa. Verdien på induisert spenning er gitt ved den negative deriverte av fluksen:

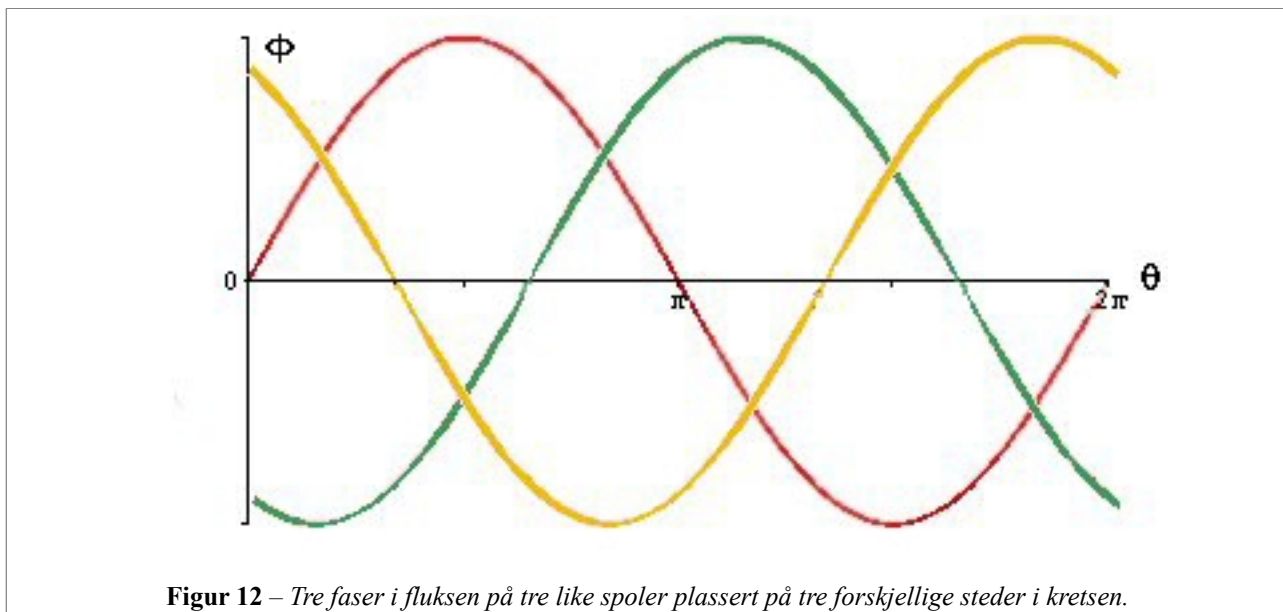
$$\epsilon = -\dot{\Phi}$$

$$\epsilon = -n \cdot \pi \cdot r^2 \cdot B_0 \cdot \omega \cdot \cos(\omega \cdot t)$$

Vi ser da at vi får induisert en sinusformet vekselspenning i spolen, se figur 11.

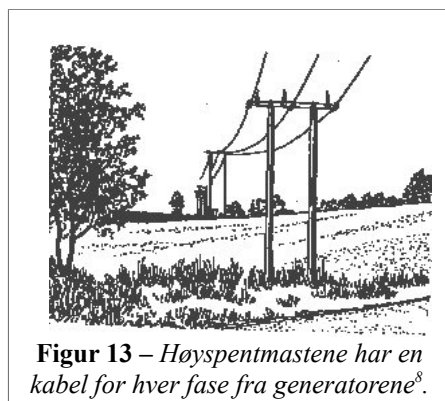
Generatorer i elektrisitetsverk er oftest bygd opp med en roterende magnet i sentrum, med spoler tilknyttet elektrisitetsnettet plassert rundt denne. La oss tenke oss tre like spoler plassert rundt en

roterende stavmagnet. Disse tre spolene vil hver for seg få induisert spenning slik som i eksemplet over. Men de er plassert forskjellig i forhold til magneten. De vil dermed gi samme spenning, men til forskjellig tid. De ligger i hver sin fase, $1/3$ av perioden bak den foregående magneten. Dette blir illustrert i figur 12. (Vi forutsetter at de er symmetrisk plassert rundt den roterende magneten.)



Trefaset synkrongenerator

Det er utbredt med trefasegeneratorer i elektrisitetsverk. Disse generatorene sender ut vekselspenning i tre forskjellige faser. At bruken er omfattende i Norge konstaterer vi lett når vi titter på høyspentmastene. (Figur 13). Disse har tre linjer, en for hver fase.

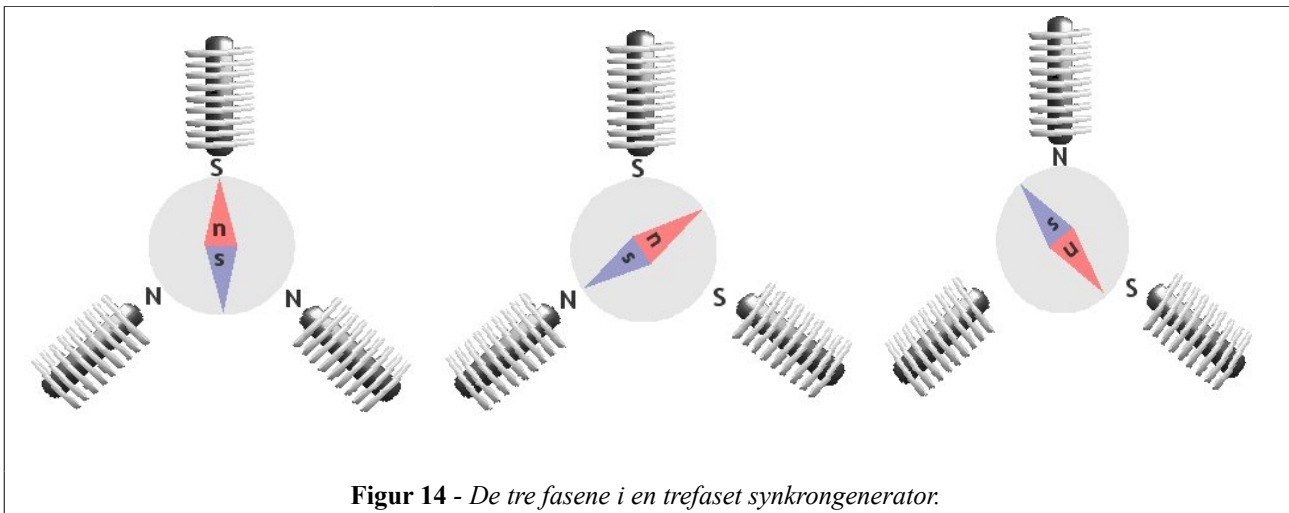


En trefaset generator fungerer ved at man har tre elektromagneter (spoler) plassert i en sirkel slik vist på figur 14. Konstruksjonen med de tre fastmonterte spolene kalles generatorens *stator*; ettersom den holder seg i ro. Magnetten i midten roterer. Den kalles *rotor*, og er (oftest) en permanent magnet.

Når rotoren dreier, svinger magnetfeltet til de tre elektromagnetene i statoren i fase med rotasjonen slik vi beskrev det i forrige avsnitt. Videre vil den induerte spenningen svinge i fase med hver enkelt av dem.

Fluksen for hver av de fastmonterte elektromagnetene når sin maksimale og minimale verdi når rotorens poler peker parallelt med dem. For de to andre magnetene i statoren vil fluksen være halv verdi av maksimalt, og hver for seg være i ferd med å øke og minke (i hver sin retning). Når magneten i rotoren står vinkelrett på en av dem, vil den spolen være magnetisk nøytral, og dermed ikke ha noen induert spenning.

⁸ Figur 13 er fra www.be.no



Figur 14 - De tre fasene i en trefaset synkrongenerator.

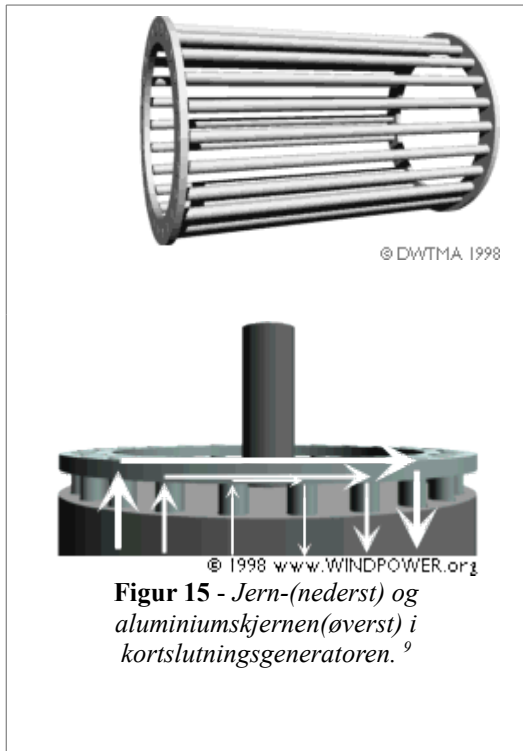
Vekselstrømmen i elektrisitetsnett i Europa har en frekvens på 50 Hz. Med dette som bakgrunn, tar vi utgangspunkt i et tenkt tilfelle der rotoren jobber med konstant 50 runder i sekundet. På figuren har vi tre magneter i statoren, og én i rotoren. Hvis vi dobler antall poler i både statoren og rotoren, vil bare halve rotasjonen være nødvendig for å generere samme frekvens på den induerte spenningen. For å få en frekvens på 50 Hz vil det med seks elektromagneter i statoren og to i rotoren bare nødvendig med 25 runder pr. sekund. Med 12 elektromagneter i statoren og 8 poler i rotoren behøves bare 12,5 roteringer pr. sekund. Generatorer med mange magneter i rotor og stator kalles lavhastighetsgeneratorer.

Høyhastighetsgeneratorene er mindre i volum og mye billigere å konstruere enn lavhastighetsgeneratorene. Dette er hovedargumentene som legges til grunn når man vurderer hvilken type generator som skal benyttes i kraftverket. I de fleste vindturbiner brukes fire eller seks poler (to eller tre magneter) i rotoren.

Rotoren er koblet til propellens rotasjon via en girkasse. Den permanente magneten i rotoren må være meget kraftig når man skal produsere mye elektrisitet. Jo mer kraft man tilfører rotoren, dess mer strøm produseres. Omdreiningshastigheten må holdes konstant, slik at man får en jevn frekvens på vekselstrømmen. Av den grunn er man oftest tvunget til å bruke indirekte tilslutning til elektrisitetsnettet når man velger å bruke synkrongeneratorer i vindmøller.

En annen faktor med synkrongeneratorene er at permanente magneter blir avmagnetiserte med tiden hvis de befinner seg i veldig sterke magnetfelt. Det er sterke magnetfelt i generatorer. Metallene (f.eks. neodymium) som kraftige magneter lages av forekommer også ganske sjeldent i naturen, og prisene på dem er dermed i tillegg veldig høye. I vindmøller med sykrongeneratorer er det av disse grunnene vanlig at man i steden har en elektromagnet i rotoren, og at man forsyner denne med likestrøm via et børstesystem.

Trefaset asynkron kortslutningsgenerator



Figur 15 - Jern-(nederst) og aluminiumskjernen(øverst) i kortslutningsgeneratoren.⁹

I tillegg til småskala vannenergiverk, er det stort sett bare innen utnyttelse av vindenergi at man bruker kortslutningsgeneratorene. Det som gjør at den asynkrone generatoren skiller seg fra den synkrone (den som er beskrevet i de forrige avsnittene) er rotoren.

Rotoren i en asynkron kortslutningsgenerator består av to metallsirklene som bindes sammen av mange stenger av strømledende kobber eller aluminium. Se figur 15. Rotoren består videre av en jernkjerne, og isolerende lag med hull til de strømførende stengene. Den er plassert midt i stator, på samme måte som den permanente magneten i den synkrone generatoren. En vesentlig forskjell fra den synkrone generatoren er også at elektromagnetene i statoren må være tilknyttet en spenningskilde, for at det skal kunne induseres spenning i rotoren slik beskrevet under.

Denne rotoren dreies. (Det er ikke magnetfeltet som driver rotoren rundt, det er vinden). Når rotasjonen foregår svært raskt rundt, dvs. mer enn 50 omdreininger i sekundet, vil magnetfeltet i rotoren rotere raskere enn magnetfeltet i statoren roterer. Da blir det induert spenning i hver av de tversgående aluminiumsstengene som forbinder de to aluminiumssirklene, dette på grunn av magnetfeltene til elektromagnetene i statoren. Siden de to aluminiumssirklene kortslutter stengene, vil det øyeblikkelig gå en strøm i hver av stengene, og rotoren danner slik sine egne magnetiske felt, som roterer med rotoren. Jo kraftigere vi dreier rotoren, jo mer energi blir overført via induksjon i statorspolen og til elektrisitet som ledes ut til elnettet.

Asynkrone generaterer kan man koble rett opp mot elektrisitetsnettet. Forskjellen mellom rotasjonshastigheten ved maksimal elektrisitetsproduksjon og rotasjonshastigheten ved tomgang er et sted rundt 1 %. Det er på denne prosentforskjellen at asynkrongeneratoren yter. Hvis vi tenker oss at den er forbundet til en strøm med frekvens på 50 Hz, vil generatoren gå på tomgang ved 25 omdreininger i sekundet (vi tenker oss at den er firepolet). $25 \cdot 60 = 1500$ omdreininger i minuttet. Den maksimale ytelsen vil da oppnås ved 1515 omdreininger i minuttet.

Dette glippet fører til at den er mer fleksibel for variasjoner enn den synkrone generatoren, og girkassen blir mindre belastet. En annen egenskap til generatoren er at rotoren selv tilpasser seg antall poler i stator. Dermed kan samme rotoren brukes til mange forskjellige antall poler i stator. Den største fordel er uansett at den kan kobles direkte til elektrisitetsnettet, da den holder stabil frekvens.

Indirekte nettilkobling

Hvis man bruker en synkrongenerator i en vindmølle kan denne i motsetning til den asynkrone ikke

⁹ Figurene hentet fra <http://www.windpower.org/da/tour/wtrb/async.htm>

tilknyttes direkte til strømnettet. Frekvensen kan ikke variere i takt med vindhastighetens variasjon.

Første steg i å få en jevn frekvens på spenningen fra en synkrongenerator er å likerette strømmen. Dette gjøres ved hjelp av effekttransistorer. En effekttransistor er en stor halvlederkontakt som kan slutte og bryter strømmen uten bruk av mekanikk. Deretter kan strømmen omdannes med en inverter til vekselstrøm med en fast frekvens som matcher elektrisitetsnettet.

Det er noen små ulemper ved bruk av denne type nett-tilkobling.

Indirekte nett-tilkobling har selvsagt noen fordeler også. Ved vindstøt (altså kraftige vinder som ikke varer) vil den ekstra energien i vinden lagres som bevegelsesenergi, med hjelp av kompliserte styringssystemer. Dette vil ikke skje med en asynkrongenerator. En annen fordel er at man kan regulere faseforkyvningen til strømmen, slik at den er i samsvar med den på elnettet.

Transformator

Når man snakker om store vindmøller, det vil si vindmøller som produserer 150 kW genererer vindmøllen normalt en 690 V trefaset vekselstrøm. Strømmen føres så i kabler ned tårnet til en transformator som oftest plasseres helt i bunnen, eller i et eget hus ved siden av mølla.

I transformatoren økes gjerne spenningen til et sted mellom 10 000 V og 30 000 V. (avhenger av standarden for det lokale elnettet)

Kjøling

Man har et visst energitap i vindmøllens rotoranlegg som følge av friksjon i kulelagrene, som gjør at deler av rotasjonsenergien som ideelt sett skulle blitt brukt til elektrisitetsproduksjon blir omdannet til termisk energi. I vindmøller er derfor kjølesystemer nødvendig. Det vanligste er luftkjøling. Enkelte vindmøller konstrueres med vannkjøling. Dette gir enkelte tekniske fordeler for generatoren, men til gjengjeld blir det vanskeligere å få varmen ut av tårnet.

Anemometer

For å kunne utnytte vindenergien mest mulig effektivt er det viktig at møllen er stilt slik at vinden treffer mest mulig vinkelrett på propellen. Moderne vindmøller snur seg automatisk ved hjelp av



Figur 16 – Vindhastigheten måles med et anemometer.¹⁰

datautstyr som leser av måleapparater festet på møllen. Den mest vanlige måten å måle vindens hastighet og retning på er fortsatt å bruke et anemometer. Dette er et apparat som har tre kopper plassert slik at de roterer når det blåser, se figur 16. Rotasjonen leses av elektronisk i m/s. Værhanen, som i de fleste tilfeller er plassert sammen med anemometeret, er en flat innretning som stiller seg parallellt med vindretningen, og slik måler av denne. Ved hjelp av målene fra anemometeret avgjør vindmøllerenes computer om det er fornuftig å dreie rotoren mot vindhastigheten og sette rota

¹⁰ Figur klippet fra pakistansk frimerkeutgivelse 23. mars 1961 med tittel "Meteorologisk dag".

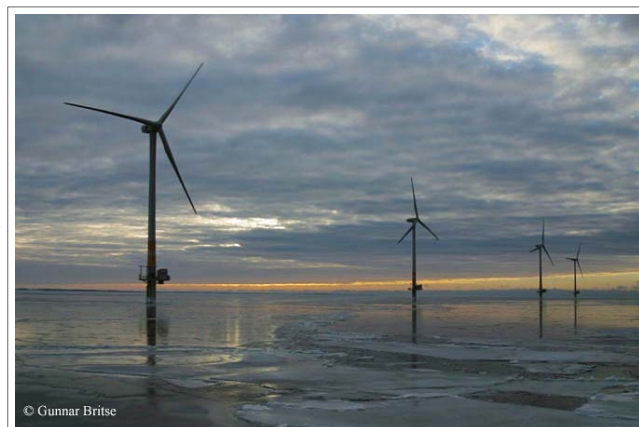
I blant annet arktiske forhold kan det bli problematisk å ha et vanlig anemometer i drift, da det kan fryse fast. En måte å unngå dette på er å koble til utstyr som holder den på en tilstrekkelig høy temperatur til ikke å fryse. En annen mulighet er å benytte et anoetertype som baserer seg på ultralyd eller laser-teknologi. Disse registrerer lysets eller lydets faseforskyvelse ved refleksjon i luftmolekylene. Det finnes også en variant som kalles varmetrådsanometer. Denne opererer ved å måle temperaturforskjellen mellom to varmetråder som er plassert henholdsvis på vindsiden og den siden av mølla som er i le. Grunnen til at det fungerer er at jo kraftigere det blåser, jo mer avkjøles den varmetråden som er mest utsatt for vind.

Lokale vindforhold

Vinden varierer kraftig. Mellom Afrikas østkyst og havnene i India la man til sjøs på bestemte tider av året når vinden blåste riktig retning mellom havnene. I britiske møller ble det snakket om møllere som i ukesvis hadde gått og drevet dank, da de plutselig i høstssesongen fikk masse vind, slik at de måtte jobbe opp mot tre døgn i strekk uten de store pausene.

Vinden om natten er oftest mye roligere enn den om dagen. Den er roligere både i styrke, hvor ofte den skifter retning og i hvor mye turbulens det er i den. Hovedårsaken til dette er at temperaturforskjellen mellom havet og lufta er større om dagen enn natta. At det er mer vind om dagen er ikke et stort hinder for kraftselskapene, ettersom

Som nevnt i den historiske biten så går vinden knirkefritt gjennom landskapet når det ikke er stort å finne av friksjon. Det beste landskapet er da å finne langs havoverflaten. Vann regnes som det best egnede landskapet for vindmøller (fig 17), selv om det er en del friksjon forbundet med dannelsen av bølger. Men så snart bølgene er dannet, beveger de seg i samme retning som vinden, og vil slik være skape mindre ujevnheter for vinden.



Figur 17 - Optimal effekt der friksjonen er lav. Bilde fra et britisk offshore vindmølleanlegg.¹¹

Lanskaper med mye trær eller bebyggelse har mye ujevnheter. Slike områder som har mye turbulens er de minst attraktive når man skal bygge vindkraftverk. For det første vil man kunne utnytte mest mulig av energien i vinden når man er lengst vekk fra ujevnheter. For det andre vil turbulens fra f.eks. klipper føre til større belastning på kraftstasjonen, slik at man kan regne med å ende opp med kortere levetid

Objekt som står i veien for vinden demper ofte vinden i et område med fem ganger større objektets dimensjon, og det i hver retning. Når man kommer opp i høyder rundt en kilometer over bakken, finner man vind som er helt upåvirket av forhold på bakkenivå. Jo høyere opp fra bakken vindmøllas propell er montert, jo mer effektivt vil de altså virke. Det er viktig å huske på at i de fleste tilfeller snakker man om at det er høyden over bakken som gjelder, og ikke over laveste punkt i nærheten. Det vil i mange tilfeller være naturlig å tro at å plassere en mølle på toppen av en skrent

¹¹ Figur 17 er fra <http://www.fmf.net/archives/000099.html>

vil føre til økt effekt, ettersom vinden må over kanten, men det motsatte vil i stor grad kunne være tilfellet, da skrenter og lignende ofte fører til turbulens i lang avstand før vinden når skrenten. Dessuten fører turbulens ved bakker og skrenter til mer slitasje enn en mer stabil vind på en åpen slette. Enkelte mykt formede åser kan likevel være å foretrekke til plassering av vindmøller.

Vindens effekt

Det er hastigheten til vinden som har mest å si for hvor mye energi vi kan hente ut fra vinden med en vindturbin.

Vi tenker oss nå et eksempel med et massivt objekt, f.eks. en bil, som er i fart. Fra Newtons 2. lov har vi at dersom objektets hastighet fordobles, så kreves det $2^2 = 4$ ganger mer energi å stanse objektet. Vi kan tenke oss vinden som en lang rekke objekter som beveger seg (det letteste er da å se vinden for seg som mange skiver som beveger seg etter hverandre).¹²

Når vindhastigheten dobles vil hver av skivene behøve fire ganger mer energi for å stanses. I tillegg vil det gå dobbelt så mange slike skiver gjennom propellen. Det som skjer når vi henter energi fra vind med en propell er jo at propellen bremser vinden ved å overføre dens bevegelsesenergi til seg selv. Vi ser dermed at hvis vindens hastighet dobles, vil energien som kan hentes ut med en propell bli $2^2 \cdot 2 = 8$ ganger høyere enn sin opprinnelige verdi.

Energien i et legeme er proporsjonal med legemets masse. Bevegelsesenergien i vinden avhenger altså av luftens massetetthet. ($1,225 \text{ kg/m}^3$ ved vanlig atmosfærisk tryk og 15 grader celsius.)

Den totale effekten av vind som passerer gjennom tversnittet av en sirkelformet flate (som en propell) er

$$P = 1/2 \cdot \rho \cdot v^3 \cdot A = 1/2 \cdot \rho \cdot v^3 \cdot \pi \cdot r^2$$

P er den totale effekten gjennom flaten [W]

ρ er massetettheten til lufta [kg/m^3]

A er arealet som rotorbladene sveiper over på en omdreining [m^2]

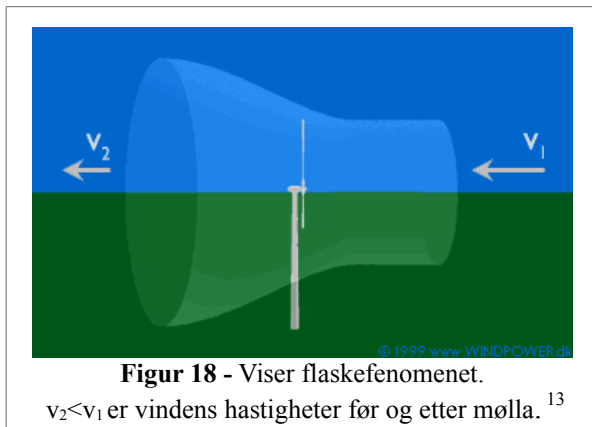
r er rotorbladenes lengde [m]

Energien som kan hentes ut avhenger også av A, og dermed med faktor r^2 . Dobling av rotorbladets lengde vil altså gi en firedobling av energien.

Det er derimot mange måter å optimalisere og spesialisere møllene til lokale forhold; større rotorblader betyr ikke nødvendigvis økning i den elektriske kraftproduksjonen. F.eks. vil man i områder med lav gjennomsnittlig vindhastighet kunne maksimere strømproduksjonen ved å bruke en mindre generator til en gitt lengde på propellbladene, eller lengre blader til en annen gitt generator. Dette fordi en liten generator vil kunne medføre økt *driftstid* (dvs. timer generatoren

¹² www.windpower.org/da/tour/

er i drift pr. år) mens en større vil kunne yte mer når det blåser som verst.



Figur 18 - Viser flaskefenomenet.

$v_2 < v_1$ er vindens hastigheter før og etter mølla.¹³

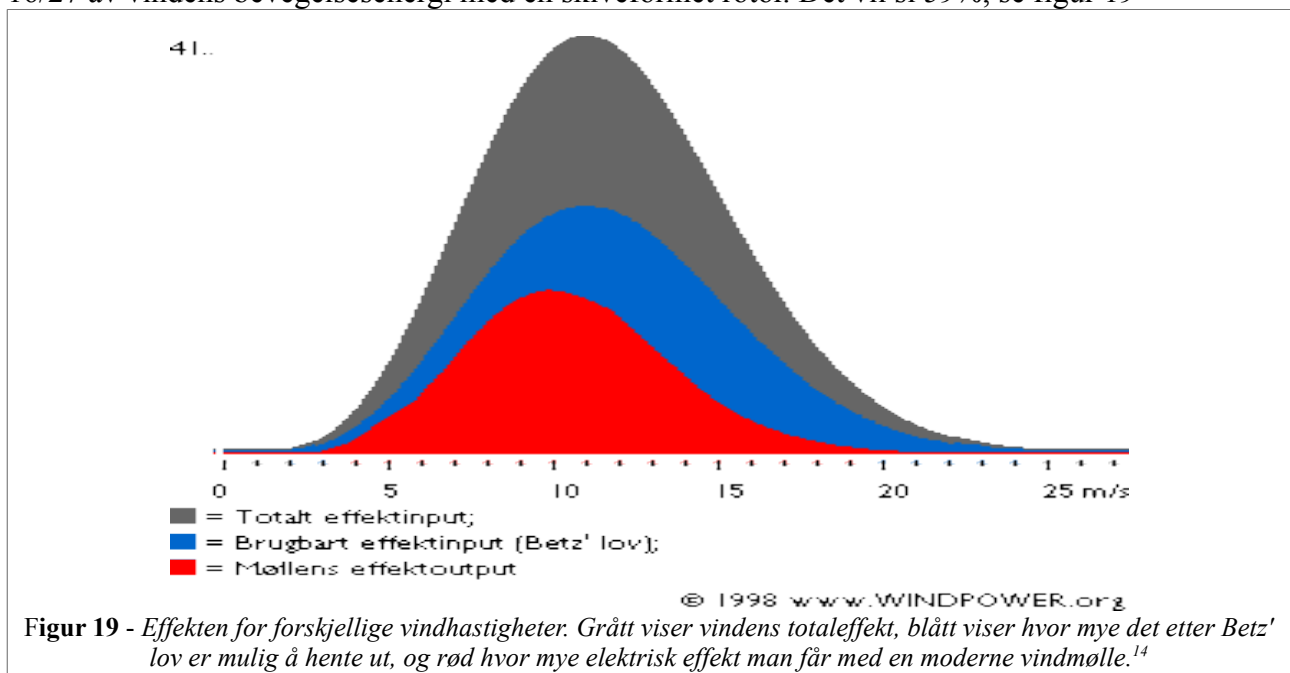
Ettersom vindmøllen henter sin energi ved å bremse vinden, må vindhastigheten være lavere på baksiden av møllen. Videre må mengden luft som går gjennom propellen være den samme både før og etter mølla. Hvis vi tenker på vinden som passerer gjennom arealet som propellen feier over som et vindrør, ser vi dermed at luften som har passert gjennom møllen må utfylle et større areal enn før. Dette er kjent som flaskefenomenet. En typisk avbøyning er illustrert i figur 18.

Betz' lov

En av de mest grunnleggende lover i aerodynamikken er Betz' lov. Den bygger på flaskehalsen som ble beskrevet i forrige avsnitt. Vi tenker oss den ideelle vindmølla. Møllas oppgave er å omdanne vindens kinetiske energi (bevegelsesenergi) om til rotasjonsenergi. I det ideelle tilfellet omdannes all energien vinden bærer på om til rotasjonsenergi. Hva skjer da?

Vel, energien omdannes til rotasjon ved at rotoren bremser vinden. Vinden mister sin bevegelsesenergi. Altså kan den ikke ha noen hastighet. Den vil stoppe opp. Men hvis vinden stopper opp, vil kan den ikke bevege seg bort fra mølla, og mølla vil igjen ikke kunne utnytte bevegelsesenergien fra vinden som "passerer" gjennom, ettersom den vinden som passerer gjennom står stille.

Loven som ble formulert av Albert Betz i 1919 sier at det ikke lar seg gjøre å omdanne mer enn 16/27 av vindens bevegelsesenergi med en skiveformet rotor. Det vil si 59%, se figur 19



Figur 19 - Effekten for forskjellige vindhastigheter. Grått viser vindens totaleffekt, blått viser hvor mye det etter Betz' lov er mulig å hente ut, og rød hvor mye elektrisk effekt man får med en moderne vindmølle.¹⁴

¹³ Figur 18 er fra www.windpower.org

Vindmøllekraftverk opererer stort sett med vinder fra 3 m/s til 25 m/s. De stoppes automatisk ved hastigheter over og under dette, for å unngå å volde seg selv og omgivelsene skader. Som man kan se av grafen i figur 19 så er det ingen store ulemper ved dette, ettersom man ikke kan hente ut den store effekten ved disse vindhastighetene.

Vindmølleparker

Også selve vindmølla lager turbulens. Når man konstruerer store vindmølleparker der det dermed ikke vanlig å plassere møller i kjølvannet alt for nært opptil en annen mølle. Det vanlige er å ha om lag tre ganger rotordiameteren til vindmøllene som avstand vindmølletårnene imellom. I den dominerende vindretningen har man gjerne inntil ni ganger rotordiameter som avstand mellom møllene. Som følge av avbøyningen vi ser illustrert i figur 1 over, er det også vanlig å ikke plassere en mølle rett bak en annen. Selv om man tar disse forhåndsreglene, må man regne med at andre rad med vindmøller i en vindmøllepark vil være 5% mindre effektiv enn den ytterste.

Norske tilstander

Potensialet for vindkraft i Norge.

Norge har stadig økende kraftbehov. Det er ønskelig å dekke dette uten å øke utslippene av CO₂.

De økonomiske kostnadene for utbygging av vindkraft har sunket kraftig de siste 20 årene. I alle ledd fra design til produksjon har man hatt forbedringer; mer effektiv fabrikasjon av vindturbiner, økt effektivitet i vindturbinens ytelse, redusert materialforbruk, forbedret design, økt vindhastighet, høyere tårn og større rotor, bedre beregningsverktøy for plassering, lavere kostnader for installasjon og nettilkobling.

Det forventes at kostnadene skal synke ytterligere. Danske eksperter regner med at man i 2020 har et kostnadsnivå som er 50 % av nivået i 1995.

Tall fra 1992/94 antyder et potensial for vindkraft i Norge på 32-73 TWh/år, og en kraftpris på 35-65 øre/kWh, mens tall fra 2005 er oppjustert og antyder et potensial på 250 TWh/år og 27-40 øre/kWh.

Nesten 70 % av dette potensialet ligger i Finnmark. I landet for øvrig er det Troms og Sør-Trøndelag som markerer seg som aktuelle. Noen av årsakene til at Finnmark utgjør en så stor andel er gode vindforhold kombinert med store åpne landområder. Derimot er det lavt eget forbruk, så en utstrakt utbygging her er betinget av at andre landsdeler importerer kraft fra Finnmark. Men det eksisterende kraftnettet i Finnmark har ikke kapasitet for den overføringsmengde vi her snakker om. Det konkluderes med at kun en brøkdel av potensialet er realiserbart å bygge ut. Statnett på sin side

14 *Figur 19 er fra www.windpower.org/da/tour/wres/powdensi.htm*

vurderer fortløpende hvorvidt det er samfunnsøkonomisk å anbefale utbygginger av nettet. Så langt holder de igjen hva angår økt kapasitet fra Finnmark og sørover, og anbefaler heller utbygging av vind- og gasskraft i Midt-Norge. Kraftnettet i Midt-Norge har kapasitet til eksport videre sørover, samt at det er kraftunderskudd i landsdelen, noe som gir grunnlag for økt utbygging her.

Eksisterende vindkraft, og planer for vindkraft i Norge.

Tall fra NVE, september 2005 gir at det i dag er eksisterende 274 MW installert effekt. Videre er det gitt konsesjon for ytterligere 845 MW installert effekt fordelt på totalt 22 vindparker. (Se tabell 1 og 2). Det er levert konsesjonssøknad på 1766 MW fordelt på 20 parker, og forhåndsmelding på 47 parker. (Av de forhåndsmeldte inngår Havsul-prosjektet som spesifikt nevnes senere.)

Nr	NAVN	TILTAKSHAVER	MW
1	FJELDSKÅR	AGDER ENERGI PRODUKSJON AS	4
2	HARØY	SANDØY VINDKRAFT A/S	4
3	HAVØYGAVLEN	ARCTIC WIND AS	40
4	HITRA (ELDSFJELLET)	STATKRAFT ENERGI AS	55
5	HUNDHAMMERFJELLET-1	NORD-TRØNDELAG ELEKTRISITETSVERK	2
6	HUNDHAMMERFJELLET-2	NORD-TRØNDELAG ELEKTRISITETSVERK	3
7	MEHUKEN I	KVALHEIM KRAFT AS	4
8	SANDHAUGEN	NORSK MILJØKRAFT TROMSØ AS	9
9	SMØLA	STATKRAFT ENERGI AS	150
10	UTSIRA VIND- OG HYDROGENANLEGG	HYDRO ENERGI	1
11	VIKNA HUSFJELLET	NORD-TRØNDELAG ELEKTRISITETSVERK	2
			274

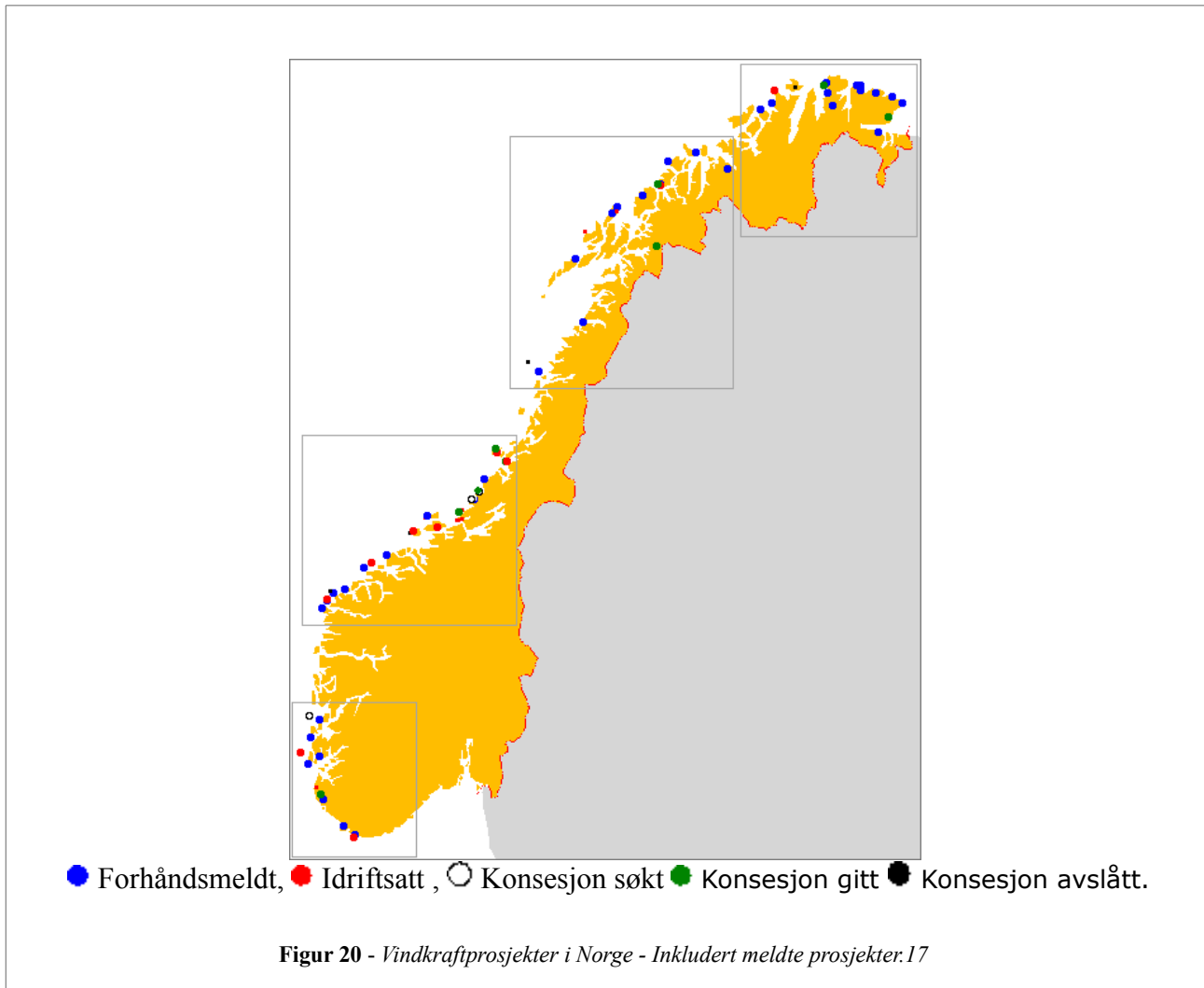
Tabell 1 - Idriftsatte anlegg, kilde NVE. ¹⁵

Nr	NAVN	TILTAKSHAVER	MW
12	BESSAKERFJELLET	TRØNDERENERGI KRAFT AS	51
13	HARBAKSFJELLET	NORSK HYDRO ASA	90
14	HUNDHAMMERFJELLET-3	NORD-TRØNDELAG ELEKTRISITETSVERK	45
15	HØG-JÆREN	JÆREN ENERGI AS	80
16	KJØLLEFJORD PÅ GARTEFJELLET	STATKRAFT DEVELOPMENT AS	40
17	KVITFJELL	NORSK MILJØKRAFT TROMSØ AS	200
18	NYGÅRDSFJELLET	NORDKRAFT VIND A/S	7
19	SKALLHALSEN	STATKRAFT ENERGI AS	65
20	VALSNESET	TRØNDERENERGI KRAFT AS	12
21	VALSNESET TESTSTASJON	VIVA AS	6
22	YTRE VIKNA	NORD-TRØNDELAG ELEKTRISITETSVERK FKF	249
			845

Tabell 2 - Konsesjon gitt, men ikke satt i drift. ¹⁶

15 http://www.nve.no/modules/module_111/netbasNVE.asp?script=8

16 http://www.nve.no/modules/module_111/netbasNVE.asp?script=8



På Norgeskartet (figur20) ser vi at det er en rekke forhånds meldte prosjekter i Finnmark. Dette skyldes de allerede nevnte forhold, samt at man har 25 % investeringsstøtte som medfører en stor interesse for å få sendt inn forhånds meldinger, og utarbeide konsesjonssøknader. Mange av prosjektene her vil nok bli skrinlagt.

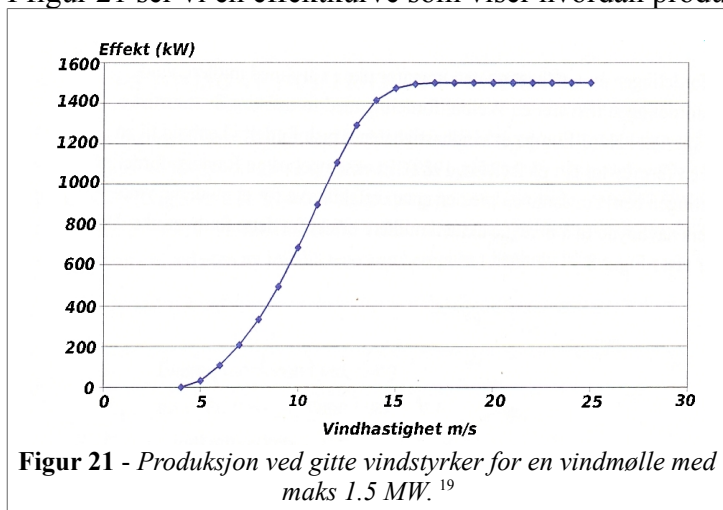
Noen flere nøkkeltall er tatt med i tabell 3

Anlegg	Status	Installert effekt [MW]	Andre nøkkeltall.	Årlig produksjon [Gwh]	Husstander som får dekt forbruk.
Smøla 1	20 møller i drift	40		120	6000
Smøla 2	48 møller i drift	110		330	16500
Hitra	24 møller i drift	55	450 mill. kr. Investert.	150	7500
Hammerfest	Konsesjonssøknad sendt.	110	ca. 1 mrd. kr.	320	16000
Kjøllefjord Finnmark	Har konsesjon, ikke utbygd.	40	ca. 320 mill. kr.	155	7750
Skallhalsen Vadsø	Konsesjon delvis innvilget	40-65	320-500 mill. kr.	ca. 200	ca. 10000
Selbjørn Austevoll	Konsesjonssøknad sendt.	40	ca. 320 mill. kr.	155	7750
Fræna	Konsesjonssøknad sendt.	95	500-700 mill. kr.	155-240	Opptil 12000
Havøygavlen	16 møller i drift.	40	2,5 MW pr. mølle	118	5900
Utsira	2 møller i drift.	1,2	0,6 MW pr. mølle	3,4	170
Båtsfjord	Konsesjon søkt 70-330 møller.	50-1000	0,8-3,5 MW pr. mølle	160-3200	Maksimalt 160000
Bugøynes	Forhåndsmeldt 150 - 300 møller	50-100	1,5-3,5 MW pr. mølle	160-275	Maksimalt 13500
Snøfjord	Forhåndsmeldt 70-150 møller	50-300	0,8-3,5 MW pr. mølle	160-960	48000
Harbaksfjellet	Konsesjon gitt. 33 møller.	90	2-3 MW pr. mølle	235	11750

Tabell 3 - Nøkkeltall, vindkraftprosjekter fra Hydro og Statkraft. Installert effekt er angitt for noen av prosjektene.¹⁸

Hva er forskjellen på installert effekt årlig produksjon? Den oppgitte effekten på en vindmøllepark er gitt i MW, og angir maksimal mulig produksjon pr time på de installerte møllene. Et år består av 8760 timer, mens det er kalkulert at «brukstid» på et vindkraftanlegg er 3000 timer. Med brukstid menes en stipulert tid med full effekt. I virkeligheten har man ikke 3000 timer med full effekt, og 5700 timer avslått, men jevnt over variert effekt. Møllene slås derimot automatisk av ved vindstyrke over 25 m/s og under 5 m/s.

I figur 21 ser vi en effektkurve som viser hvordan produsert elektrisitet varierer ved vindhastigheten



Figur 21 - Produksjon ved gitte vindstyrker for en vindmølle med maks 1.5 MW.¹⁹

på en mølle med maks produksjon på 1.5 MW. Tilsvarende kurver vil man få for andre møller. Da med utflating på den gitte møllens maksimum, og omtrentlig lik av krumning fra 0 til maks.

1 MW installert effekt vil dermed tilsvare 3000 MWh = 3GWh årsproduksjon. Brukstid på 3000 timer utgjør et landssnitt. For enkelte vindkraftprosjekter kan det brukes en annen faktor.

18 www.statkraft.no Derunder konsesjonssøknader for vindkraftanlegg. Pdf filer,

Tallene for Smøla 1, 2 og Hitra er i helhet hentet fra Statkrafts nettsider. Tall for de øvrige prosjektene er kun delvis oppgitt, (de fleste steder kun oppgitt installert effekt), og de øvrige tall er beregnet, ved bruk av faktorer basert på tallene for Smøla 1, 2 og Hitra.

Hva gjelder antall møller på de ennå ikke utbygde anlegg kan dette variere. Konesjonssøknadene baserer seg i utgangspunktet på total installert effekt, ikke antall møller. Flere av disse anleggene kan få møller på inntil 5 MW, mens de største på Smøla er på 2.3 MW. Lokale forhold kan medføre at det velges å installere mindre møller enn hva som er teknisk tilgjengelig. Andre relevante tall kan være at de fleste vindkraftanlegg vil medføre utbygging 5-10 km ny vei inne i området, og 5-20 km kraftledning, og anleggsvirksomheten før parken er klar til drift er fra ett til tre år. Anlegget på Smøla båndlegger totalt 18 km² Tilsvarende areal vil bli båndlagt ved utbygging andre steder.

Konesjonene gis for 25 år. Hva angår lønnsomhet må vindparkene tilfredsstillende lønnsom inntjening med planlagt avvikling når konsesjonsperioden utløper.

Offshore vindturbiner

Offshore vindturbiner er ny og spennende teknologi som åpner mange muligheter. Kostnadene er høyere enn ved montering på land, i hovedsak knyttet til økte kostnader ved montering, fundamentering, frakt, vedlikehold m.m. Men på sikt vil det likevel kunne være lønnsomt på grunn av bedre vindressurser, lavere turbulens, og større muligheter for storskala turbiner.

Firmaet Havgul AS har utviklet planer for verdens største offshore vindparker (fire områder) på Mørkekysten utenfor Molde/Ålesund/Hustavika. Dette er et meget spennende prosjekt.

For Havsul-prosjektet viser foreløpige målinger en middel-vindstyrke gjennom hele året på over 8 m/s. Vanndybdene i området er fra 4 til 30 meter, og egnet for utbygging. Ved å flytte turbinene til sjøs reduseres eller utelukkes mange av miljøhensynene man må ta ved utbygging til lands, det være seg visuell forurensning, «blitz-effekt» for naboer, båndlagt utmark, m.m. Andre hensyn må derimot tas, blant annet til fiskeri og skipsfart. Sjøfugler vil også utgjøre en faktor som må tas hensyn til.

Havsul-prosjektet er blitt sagt å være fullt ut realiserbart. Av viktige faktorer nevnes at Møre og Midt-Norge for øvrig har kraftunderskudd i dag. (Det er netto import av kraft fra andre landsdeler.) Videre er det godt utbygd kraftnett for transport i distriktet. Videre vil Ormen Lange prosjektet medføre ytterligere kraftbehov, samt oppjustering av kraftnettet. Man må koble seg på det oppjusterte kraftnettet med en sjøkabel. Men en grov helhetsvurdering gjør at dette prosjektet virker fornuftig. Man kan eventuelt også argumentere med at en slik stor offshorepark vil plassere Norge langt fram som vindkraftnasjon og bli en viktig aktør i forskning og videreutvikling. Danmark har flere offshoreparker som er i drift. Den eldste (Vindeby) sto på plass allerede i 1991, den største hittil var ferdig i 2002. Det er vedtatt ytterligere utbygginger som skal føre til totalt 13,5 TWh/år produsert av havparker alene, innen 2030. Også vindkraftnasjonen Tyskland er i gang med dette.

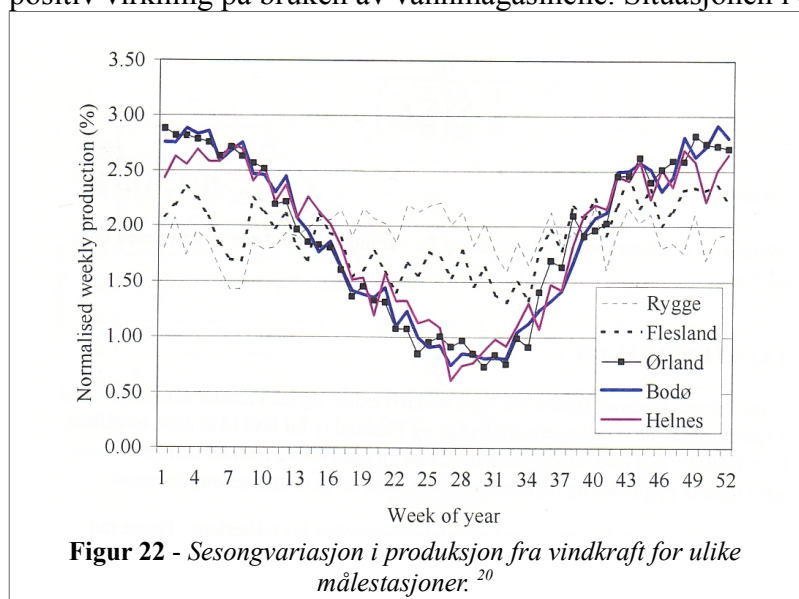
19 *Figur 21 er fra Teknisk rapport. Integrasjon av vindkraft.*

Bunnforholdene i Norge er derimot vanskeligere enn i Danmark (jevnt over dypere). Det er i dag tilgjengelig teknologi for å realisere Havsulprosjektet, men en storstilt utbygging av ytterligere offshore vindparker i Norge forutsetter ny teknologi.

Integrasjon av vindkraft i eksisterende nett

Plasseringen av vindparkene vil påvirke effektflyten i kraftnettet. Små vindkraftparker (<10 MW) kan integreres direkte i distribusjonsnettet og kan ha en positiv virkning på effektflyten, redusere kraftunderskudd og være plassert nærmere sluttbruker. Noe som også reduserer effektap i transportnettet. Større vindkraftparker må tilknyttes regional og sentralnett.

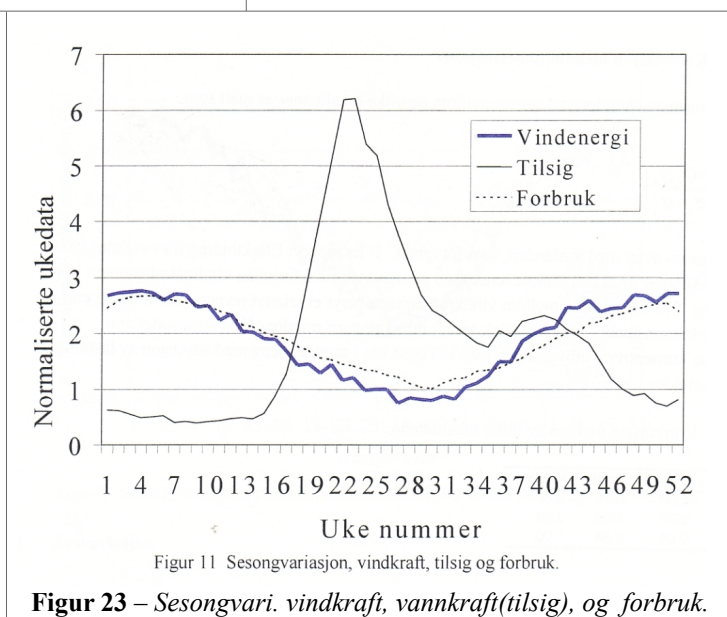
Sesongvariasjonen i vindkraften viser seg å samstemme meget bra med forbruket av elektrisitet. (Mest produksjon om vinteren, når det er mest forbruk). Integrering av vindkraft kan derfor ha en positiv virkning på bruken av vannmagasinene. Situasjonen i dag er at man i løpet av vinteren får



tomme vannmagasin ved vannkraftverkene. Dette er fordi man ikke har tilsig av nytt vann, og nedbøren kommer i form av snø, samtidig som man tapper mye vann for å øke kraftproduksjonen. Vindforholdene er derimot best om vinteren. Dette ser vi i figur 22, som baserer seg på faktiske målinger ved utvalgte målestasjoner. Mens figur 23 viser en gjennomsnittlig sesongvariasjon sett i forhold til sesongvariasjon i forbruk, og vannkraft produksjon.

Tilsiget til vannmagasinene kan variere så mye som 30 % fra år til år. Tilsvarende variasjon for vindkraft er 20 %. Man har ikke påvist noen sammenheng mellom variasjoner i vindstyrke og tørkeperioder.

Det norske kraftsystemet er 99 % basert på vannkraft. Variasjoner av tilsig både geografisk og sesongmessig gjør at det er lønnsomt å samkjøre de ulike verkene. Dette har tidligere skjedd lokalt, regionalt og senere nasjonalt, koordinert av forskjellige organisasjoner. I dag er dette underlagt det felles nordiske



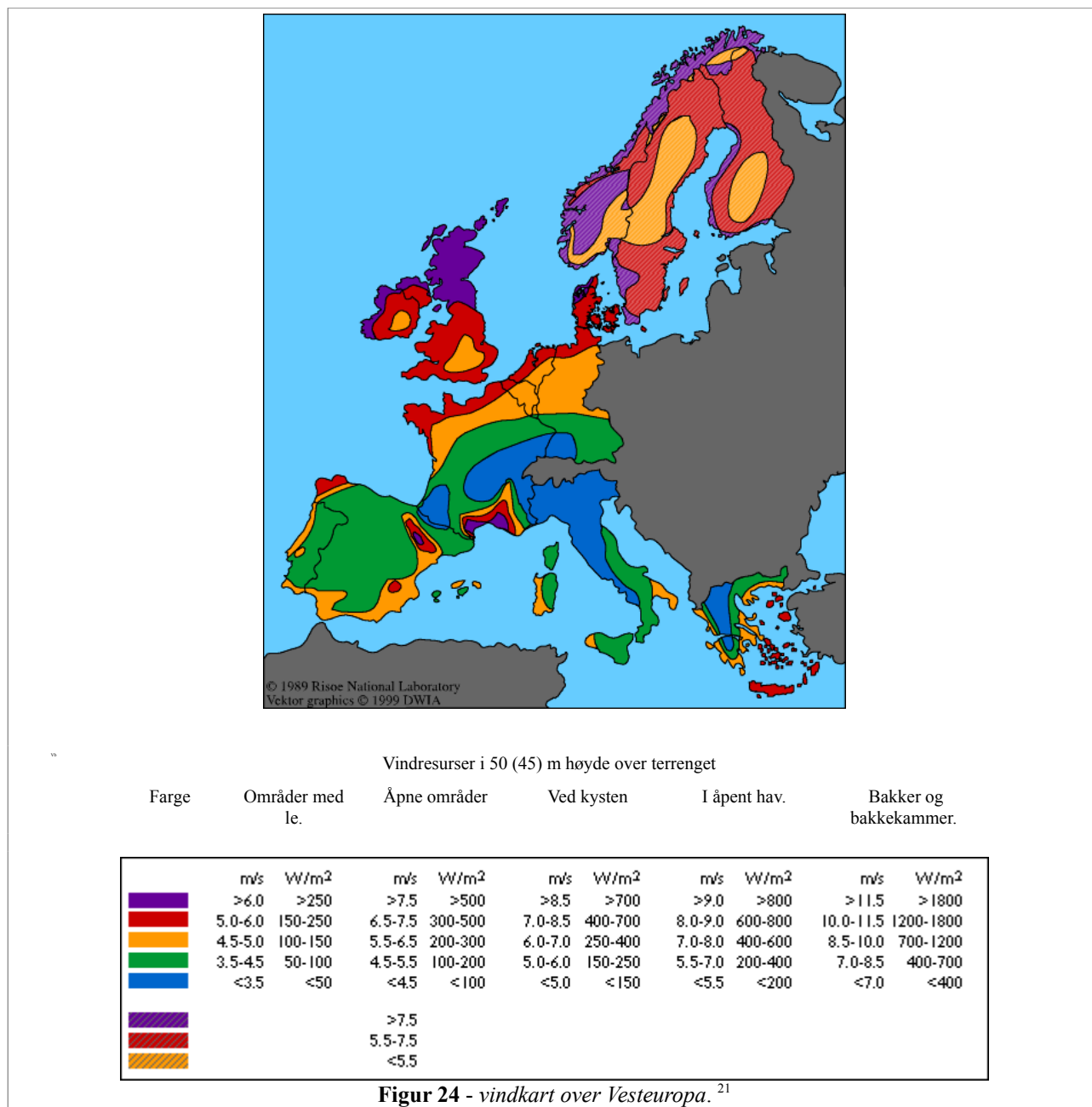
kraftmarkedet Nordpool. Også utbygginger, både eksisterende og framtidig, inngår i det nordiske

²⁰ Teknisk rapport. Integrasjon av vindkraft

kraftmarkedet.

De nordiske landene har omfattende planer for utbygging av vindkraft. Danmark på sin side har igangsatt handlingsplan for utfasing av fossil energiproduksjon, hvor en vesentlig del erstattes med vindkraft. Målsettingen er 10 % vindkraft innen 2005 (oppnådd allerede i 2001), og 50 % innen 2030. Danmark har i dag en total elproduksjon på ca 35 TWh.

Tilsvarende tall for resten av Norden er: Sverige, 4 TWh vindkraft innen 2010, Norge 3 TWh vindkraft innen 2010, og Finland 1 TWh.



Figur 24 viser hvordan vindressursene varierer i Vesteuropa. Som vi ser ligger Norge svært godt an. Den eneste forklaringen på at Norge ikke allerede har blitt en stor vindkraftnasjon er at vi også har vært velsignet fra naturens side med stort potensiale for vannkraft og rike olje og gass resurser. Men

²¹ Figur 24 hentet fra www.windpower.org

nye behov krever nye løsninger. Danmark er et foregangsland. På tross av dårligere vindforhold enn Norge har de satset stort, og hele 20% av elektrisiteten produseres ved bruk av vindkraft. Norge har mer komplisert landskap som vil gi dyrere utbygginger enn i Danmark. Men vi vil også ha større effektivitet. (Den oppgitte driftstiden på møller i Danmark og Tyskland er 2600 timer. Mot nevnte 3000 i Norge.)

Teknologien finnes, og vil stadig videreutvikles. Kostnadene er synkende. De vedtatte 3 TWh innen 2010 er absolutt oppnåelige, og i bransjen håpes det at dette målet oppgraderes.

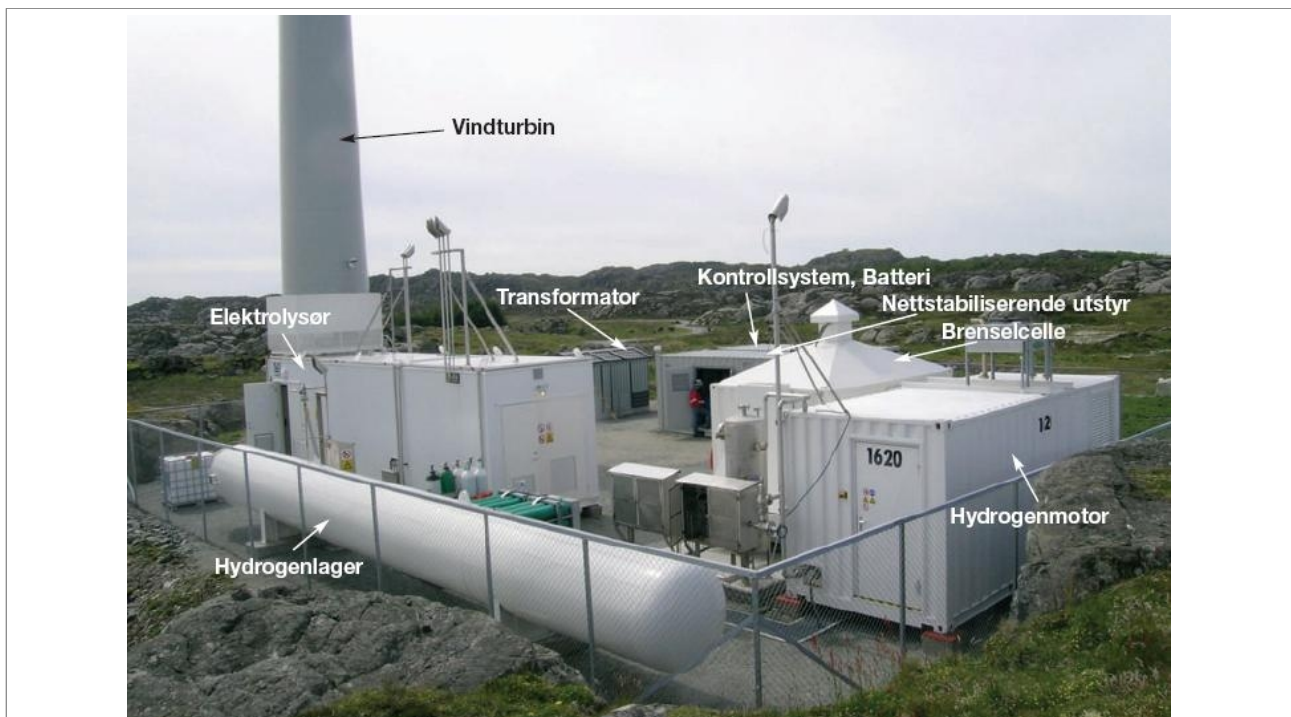
Selv om vindkraft er antatt/simulert å ha en produksjonsfordeling gjennom året som samstemmer bra med forbruksfordelingen vil det være nødvendig med energilagring i perioder med overproduksjon. Det finnes en rekke typer batterier som vil være egnet til dette formålet. Man kan si at batteriet tilsvarer vannmagasinene i vannkraft-sammenheng. Helt sammenlignbart er det likevel ikke, da man ved vannmagasin lagrer energien i form av vann med høy potensiell energi, i et lager før produksjon av elektrisk energi, mens man med vindkraft og batterier lagrer elektrisk ladning (man kan ikke «lagre» vinden).

Vindkraft og energilagring:

En annen måte å utføre energilagring er ved å bruke den elektriske strømmen til hydrogenproduksjon, i form av elektrolyse.

Hydro åpnet sommeren 2004 et forsøksanlegg på Utsira. Se figur 25. Anlegget består av 2 vindturbiner, hver med tårn på 46 m. Rotorblad med 40 m i diameter, og maksimal ytelse på 600 kW. Den ene møllen produserer kun for det åpne markedet, mens den andre produserer for et lukket «forsøksnett». Dette har 10 husstander, som primært forsynes med hele sitt kraftbehov fra dette anlegget. (De var kun tilknyttet det ordinære kraftnettet i tilfelle stans på forsøksanlegget.) Overskuddskraften kjøres inn i en elektrolyse. Her produseres det hydrogen og oksygen ved å spalte vannmolekyler. Elektrisk strøm (dvs. overskuddsstrøm fra vindmøllen) føres igjennom vann iblandet lut (elektrolytt, for å gi vannet lederegenskaper), fra en anode til en katode. Hydrogenet lagres så i en trykktank. Ved dårlige vindforhold eller økt kraftbehov kan hydrogenet brukes til å produsere elektrisk kraft ved bruk av brenselcelle. Forsøksanlegget har eget utstyr for dette, brenselcelle og hydrogenmotor som genererer strøm.

Under gode vindforhold produserer vindturbinen nok til å forsyne både husholdningene, og en elektrolyse. Når det blåser for mye eller for lite og møllene står stille, brukes lagret hydrogen til å produsere strøm. Når det blåser litt, men ikke tilstrekkelig til å forsyne husholdningene, får vindturbinene støtte til kraftproduksjon fra brenselcelle og hydrogenmotor. Anlegget har utstyr til å sikre stabil kraftproduksjon.



Figur 25 - Bilde av forsøksanlegget på Utsira.²²

Hydro har signalisert at de ønsker å stenge dette forsøksanlegget i løpet av første halvdel av 2006. Erfaringene har imidlertid vist at et slik småskala anlegg er nok til å gjøre små øysamfunn selvforsynte med elektrisk kraft. Det er mange fordeler med dette. Ikke minst vil man ved utbygging av slike anlegg sikre stabil strømforsyning i områder med lite utbygd infrastruktur. Små kystkommuner kan gjøres helt uavhengige av det ordinære kraftmarkedet. Tanken er at det i enkelte tilfeller vil være billigere å bygge ett småskala anlegg som forsyner kommunen framfor å bygge ut det nasjonale hovedkraftnettet.

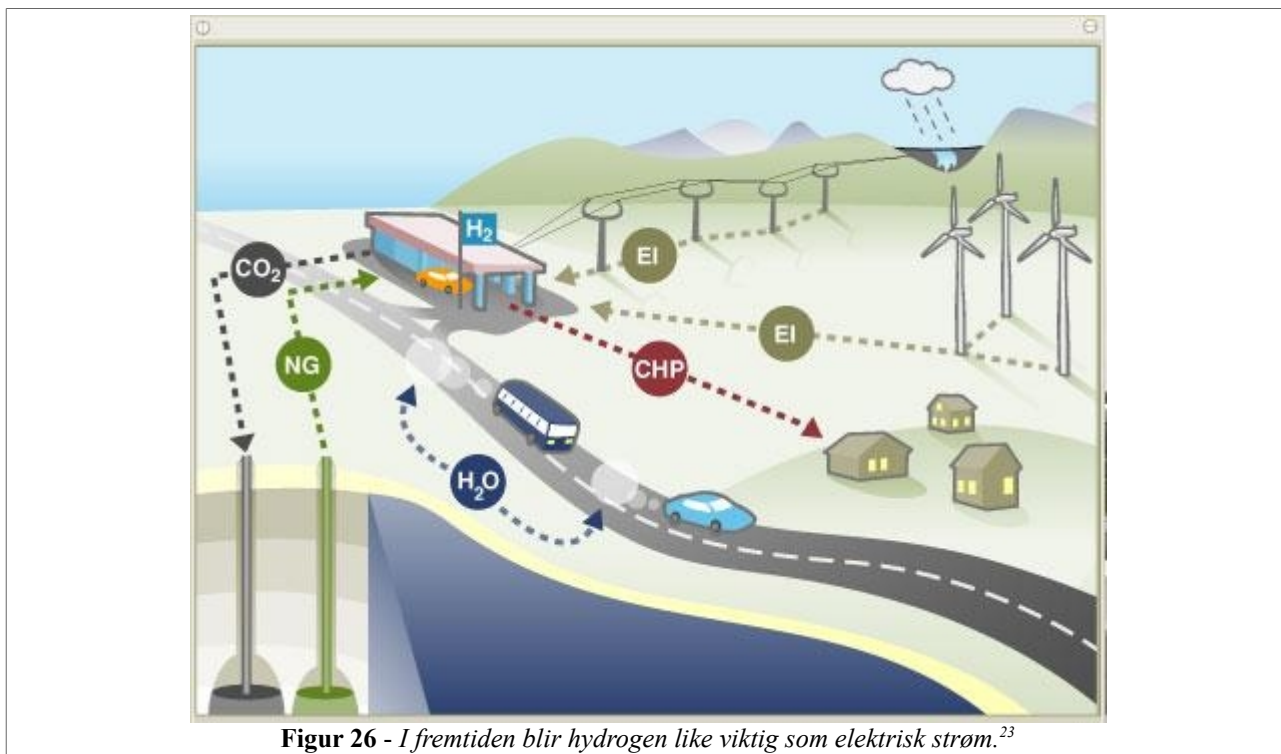
Det er et stort energitap ved overgangen fra elektrisitet med elektroner som energibærere, via hydrogen, (samt nytt til) bruk av hydrogen i produksjon av elektrisitet. Dette er derfor ikke en særlig egnet metode (med dagens teknologi) for energilagring ved store vindparker. Derimot går man mot et samfunn hvor hydrogen som energibærere vil bli brukt istedenfor fossilt brennstoff i biler, busser, båter osv. Man kan tenke seg at det anlegges små elektrolyseanlegg rundt omkring ved de forskjellige vindkraftverkene, og hvor hydrogenet her blir transportert til lokale

«bensin»stasjoner ol. Hydrogen kan også lages ved nedbryting av hydrokarboner (olje, naturgass, kull). Men når man etter hvert får hydrogen-drevne kjøretøy og maskiner som allemannseie, nettopp for å spare forbruket av fossilt brennstoff, vil det være lite nyskapende og et skritt i feil retning om ikke hovedandelen av den økte hydrogenproduksjonen kommer av elektrolyse. Vindkraft er bare en av mange måter å lage strøm til elektrolysen. Men kombinert med nettopp denne form for energilagring åpner det seg mange muligheter for framtidig satsing på vindkraft.

Som allerede kommentert er det gode vindforhold i Finnmark, mens hovedkraftnettet for eksport av kraft fra Finnmark og sørover er dårlig utbygd. Her vil nok veldig mange prosjekter bli skrinlagt, nettopp på grunn av manglende kraftnett. Men man kan eventuelt filosofere over hvorvidt Finnmark

²² Figur 25 fra www.hydro.com/library/attachments/our_activities/new_energy/wind/50851_Utsira_N.pdf

er et egnet sted for storskala hydrogenproduksjon tilknyttet vindkraft, når vi i overskuelig framtid får et samfunn hvor hydrogen utgjør den viktigste kraftbærer.



Figur 26 - I fremtiden blir hydrogen like viktig som elektrisk strøm.²³

Konkluderende

Gjennom alle tider har mennesket gjort seg nytte av kreftene i vinden. I Norge går linjen tilbake til seilskutetiden og handel, og videre til vikingene og deres skip. At vinden er kraftigst til havs er noe som med ny teknologi kan komme vindkraft utbyggingen til gode, da det gjør mulig bygging av havparker med store møller som gir høy produksjon.

Men vindmøller er et nytt fenomen i norsk historie. Røttene går til andre himmelstrøk og langt tilbake i tid. Perserne utviklet sine vertikalakslede vindmøller til maling av mais rundt år 950 e.Kr. Til Europa kom møllene senere, og da muligens som følge av at korsfarerne hadde møtt den persiske teknikken. Kina tok også erfaring fra Persia, men utviklet denne videre.

Energi kan ikke oppstå eller forsvinne, men kun omdannes fra en form til en annen. Vindmøllens oppgave er å omforme bevegelsesenergien i vinden til en rotasjonsenergi i vindmøllens rotorsystem. (Her brukes ordet rotor om alt som roterer som direkte følge av vinden.) I elektriske omdannes rotasjonsenergien videre til elektrisk energi.

Det dannes et lufttrykk under rotorbladet som presser bladet oppover, dette skaper rotasjonsbevegelsen. Tuppen på rotorbladet vil ha en høyere hastighet i forhold til vinden rundt tuppen, sammenlignet med et punkt lengre inne. Dette gir at de to punktene har forskjellig resultantkraft. Rotorbladene er dreid for å sikre at retningen av resultantkraften er lik over hele bladet.

De gamle rotorbladene var lagd av metall og var svært tunge. I moderne møller brukes det

²³ Figur 26 er fra http://statkraft.no/pub/annen_miljovanlig/hydrogen/kort_forklart/index.asp

polyester, glassfiber og karbonfiber. Moderne møller har også en rekke teknikk som styres automatisk av datasystemer, og som gjør at møllen alltid er innstilt optimalt til vindforholdene.

Strømmen lages i en generator.

Dette er som regel en trefaset vekselstrømsgenerator. Denne fungerer ved at tre elektromagneter (lederspoler) er fastmontert, med innbyrdes like vinkler (utgjør hjørnene i en likesidet trekant med vinkler hver på 60°) og en permanent magnet som roterer i midten, (sentrum av trekanten). Når den permanente magneten roterer vil dette føre til endringer i magnetfeltet gjennom lederspølene, og dermed indusere elektrisk spenning i disse. Spenningen vil være en sinusformet vekselspenning, med tre faser. Hver av dem $1/3$ fase bak den forrige.

De fastmonterte spolene kalles *stator* siden de er statiske. Den roterende permanente magneten kalles *rotor*. Hver av fasene har maksimum og minimum når Rotorens poler er parallell med spolen(e).

Den elektriske strømmen beholdes i 3 faser gjennom hele høyspentnettet. Man kan lett se at en en høyspent mast bærer tre kraftige ledere. Disse fører strømmen i de tre fasene.

Nettet i Europa har en frekvens på 50 Hz. Dette vil tilsvare at rotoren dreier 50 runder pr sekund. Man kan derimot redusere antallet omdreininger ved å øke antallet poler. Både på stator og rotor. Har man f.eks. 12 elektromagneter som stator, og en rotor med 8 poler vil man bare trenge 12.5 omdreininger pr. sekund. Generatorer med mange magneter i stator og rotor kalles lavhastighetsgeneratorer. Høyhastighetsgeneratorer er derimot mindre i volum og billigere å bygge. I de fleste vindturbiner bruke 4-6 poler på rotoren.

Rotoren er koblet til propellens rotasjon via en girkasse. Girkassen har til hensikt å hjelpe til med stabil høy frekvens. Permanente magneter blir fort avmagnetisert når de befinner seg i magnetfelt. (Spolene som det induseres strøm i vil på sin side også omdanne seg med magnetfelt.). Derfor er det vanlig å istedenfor bruke en elektromagnet som rotor, og hvor denne forsynes med likestrøm via et børste system.

Den overstående metoden kalles for synkrongenerator, og er nødvendig bakgrunnskunnskap. Det er denne teknikken som brukes i de fleste vannkraftverk. Derimot er det en annen teknisk løsning som er mer vanlig brukt i vindmøller. Denne kalles asynkron kortslutningsgenerator. Her består rotoren av to ringer som er bundet sammen av mange stenger av kobber eller aluminium. Videre en kjerne av jern. I denne typen generator er statorene tilknyttet en spenningskilde, og dette induserer spenning i rotoren.

Det er her vinden som driver rotoren rundt, (ikke magnetfeltet). Når frekvensen er høy (omlag 50HZ) roterer magnetfeltet i rotoren fortere enn magnetfeltet i statoren. Det induseres strøm i stengene. Sirklene kortslutter stengene og det går strøm i stengene. Rotoren danner så sitt eget magnetfelt. Denne generatoren holder stabil frekvens og kan kobles direkte til elektrisitetsnettet.

Generatorer avgir mye varme. Den vanligste kjølemetoden i vindmøller er luftkjøling. Vannkjølingssystemer finnes.

Nyere teknologi gjør det mulig å bygge vindmøller til havs. Dette anses som en kjempefordel da friksjonen vinden møter her er minimal, og det er følgelig et stort potensiale og hente ut med vindmøller. På land bremses vinden av mange andre objekter i tillegg til vindmøllene. Dette skaper også uønsket turbulens.

Når vindmøllen roterer bremser den luften, det er vindens reduksjon i bevegelsesenergi som får møllebladene til å rotere. Energien i vinden er proporsjonal med vindhastigheten i tredje potens. Effekten som som kan tas ut av en vindmølle avhenger videre av arealet som rotorbladene sveiper over. Effekten er gitt ved $P = \frac{1}{2} \dots$ *lim inn* Dobling av lengden på rotorbladene vil altså gi en firedobling av energien. Lokale forhold kan likevel føre til at det er ønskelig med små møller framfor store.

Nedbremsingen fører til at vinden bak møllen dekker et større areal enn den dekket før den traff møllebladene, dette gir avbøyning av vindretningen.. Betz lov sier at det er maksimalt mulig å omdanne 59% av vindens energi.

Vindmøllene lager også selv turbulens, og dette sammen med avbøyningen påvirker hvordan man bør plassere vindmøllene i en vindmøllepark i forhold til hverandre. Det er vanlig med inntil 9 ganger rotordiameter mellom møllene, og man monterer normalt ikke en mølle bak en annen.

Store møller leverer normalt en 690V trefaset vekselstrøm. I transformator transformeres den opp til høyspent på 10 000 – 30 000 V.

Kostnadene på utbygging av vindkraftparker har sunket kraftig. Det er ventet at den fortsetter å synke. Rapporter av nyere dato antyder et vindkraftpotensiale på 250 TWh til en pris på 27-40 øre/kWh. Omlag 70% av potensialet ligger i Finnmark. Dårlig utbygd kraftnett og kraftoverskudd i regionen gjør at mesteparten av dette ikke er realiserbart. I Midt Norge har man gode vindforhold, kraftunderskudd og godt utbygd nett. Her vil det være lønnsomt å bygge ut vindkraft.

Det er i dag bygd ut 274 MW installert effekt, innvilget konsesjon på 845 MW, og levert konsesjonsøknad på 1766 MW samt mange forhåndsmeldte prosjekter.



Figur 27 – Simulert bilde av planlagte Kjøllefjord vindpark.²⁴

Installert effekt svarer til maksimal produksjon pr. time. Det opereres med en driftstid på 3000 timer på vindkraftanlegg i Norge. Stipulert årlig produksjon blir dermed 3GWh pr. 1MW installert effekt.

Utbygging av vindkraftanlegg medfører båndlegging av relativt store arealer av utmark. Det trengs også veier som må tåle lange og tunge kjøretøy, og strekking av flere km. Kraftledning.

Danmark og Tyskland satser nå stort på havparker. Bunnforholdene

i Norge gjør dette vanskeligere å realisere her. Eneste planlagte havpark så langt er Havsul prosjektet på Mørekysten. Dette er likevel realiserbart, da allerede påstartede utbyggingen av Ormen Lange feltet medfører utbygging av kraftnettet, det er gode vindforhold, og kraftunderskudd i regionen.

Små vindparker kan integreres direkte i distribusjonsnettet nærme sluttbruker. Store parker må kobles på region og sentralnettet. Vindkraftens sesongvariasjon følger i stor grad forbruket. Dette er en positiv effekt i et land hvor 99% av strømmen lages med vannkraft. Vannkraften er på sin side i motfase med forbruket. (Størst produksjon når det er minst forbruk.) I Norge er det vedtatt

24 Figur 27 er fra http://statkraft.no/pub/vindkraft/prosjekter_og_soknader/kjoellefjord/index.asp

utbygging av vindkraft tilsvarende 3 TWh innen 2010. Dette målet vil bli nådd, og potensialet er mye høyere selv uten store utbygginger av kraftnettet.

I vindkraft lagrer man elektrisk ladning i batterier ved overproduksjon. Man kan bruke energien til å produsere hydrogen ved elektrolyse. Da er det hydrogenet som er energibæreren. Hydrogenet kan senere brukes til strømproduksjon ved bruk av brenselcelle. Denne teknologien kan åpne for at små øysamfunn kan bli selvforsynt av elektrisk kraft uten store utbygginger av kraftnettet. Hvilket videre kan bety at endel av det «ikke realiserbare» potensialet i Finnmark likevel kan realiseres. Det er lettere å lagre hydrogen på en tank, enn å lagre elektrisk ladning i et batteri. Tanken har konstant kapasitet, (volum), mens batteriets evne til å lagre elektrisk ladning blir svekket over tid. Derimot er det store effekttap på først lage hydrogen, for så videre å lage strøm ved bruk av hydrogen igjen.

I stor skala tenkes denne teknologien brukt ved anlegg hvor produksjonen av hydrogen er selve hovedformålet. Dette kan være ønskelig etterhvert som vi går mot et samfunn hvor hydrogen vil brukes som drivstoff i biler, busser og andre større maskiner. Dette kan kanskje åpne for utbygginger i Finnmark.

En totalvurdering ut i fra de forhold vi har kartlagt, og oppsummering av konklusjoner i rapporter fra Sintef, NVE, m.f. vi har lest gjør at vi mener Norge har et reelt potensial for å bli en stor vindkraftnasjon.

Kildehenvisninger

Forsideillustrasjon

Bilde av en mølle i Vikna vindmøllepark
www.safeinherit.net/nord_trondelag.htm

Figurer

Kilder til figurer er gitt fortløpende i fotnoter. Figurer hvor ikke kilde er oppgitt er eget produkt.

Historikk

Bøker og publikasjoner

Power from wind: A history of windmill technology
1994 Cambridge University Press
Richard L. Hills
Kap. 1 og 2

Nettressurser

Danske Vindmølleindustrien
<http://www.windpower.org/da/tour/>

Teknisk

Bøker og publikasjoner

Wind Turbine Technology
1994 Asme Press
David A. Spera
Kapittel 1,2,3 og 5

Nettressurser

Danske Vindmølleindustrien
<http://www.windpower.org/da/tour/>

Wikipedia.org
http://no.wikipedia.org/wiki/Elektrisk_motor
http://de.wikipedia.org/wiki/Elektrischer_Generator

Tidligere års prosjektoppgaver
[http://web.phys.ntnu.no/~stovneng/FY1303NY/prosjekt/van
nkraft.pdf](http://web.phys.ntnu.no/~stovneng/FY1303NY/prosjekt/van
nkraft.pdf)

Norske tilstander

Bøker og publikasjoner

Teknisk rapport. Integrasjon av vindkraft i det norske kraftsystemet.
2001 Sintef Energiforskning.
K.O.Vogstad, M.M. Belsnes m.f.
Side 9, 10-11, 14-15, 23-24, 27.

Nettressurser

Havsulprosjektene,
Eksisterende offshoreparker, Danmark:
<http://www.havsul.no/Web?id=207.2.3.214.214>
Om forholdene og områdene:
<http://www.havsul.no/Web?id=207.2.3.210.210>
Forhåndsmeldingen til prosjektet:
<http://www.havsul.no/Web?id=207.2.3.211.211>

Norsk Vassdrags og energidirektorat.
Rapport 17-05
<http://www.nve.no/FileArchive/337/Rapp%2017-2005.pdf>
Idriftsatte og planlagte anlegg
[http://www.nve.no/modules/module_111/netbasNVE.asp?sc
ript=8](http://www.nve.no/modules/module_111/netbasNVE.asp?sc
ript=8)

Norsk Hydro.
www.hydro.no Derunder konsesjonsøknader for
vindkraftannlegg. Pdf filer.

Statkraft.
www.statkraft.no Derunder konsesjonsøknader for
vindkraftannlegg. Pdf filer.

Offentlige meldinger

Danmark, Energi og miljøministeriet, 1996. Sverige,
Svenska Energimyndigheter, 1999. Norge,
Stortingsmelding 29, 1999. Og Finland, Finenergy, 2000.
Gjengitt i: *Teknisk rapport. Integrasjon av vindkraft i det
norske kraftsystemet.*

Personer

Samtale med, Post. Doc. Magnus Korpås. Institutt for
kraftteknikk. NTNU / Sintef.