

Instuderingsfrågor och övningsuppgifter i vindkraftteknik

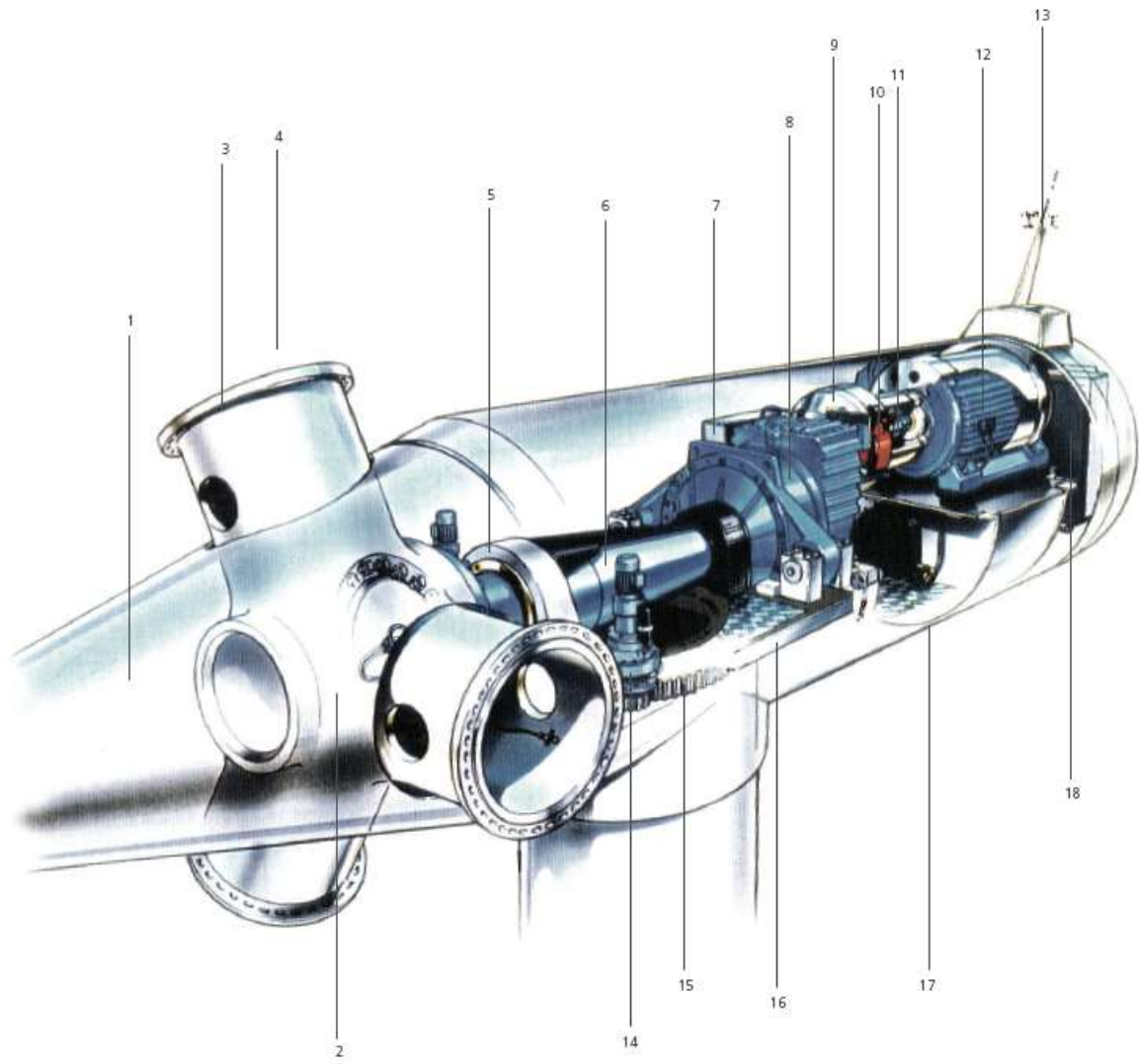
1. Hur mycket vindkraft fanns det i Sverige respektive världen enligt senaste årsstatistik.
2. Hur mycket har installerats och producerats i Sverige hittills i år?
3. Nämn minst tre typer av vindkraftverk, och deras användningsområden, som spelat en stor roll före dagens nätanslutna vindkraftverk.
4. Rita en skiss där du förklarar tornhöjd, navhöjd, totalhöjd, rotordiameter och svept yta. Ungefär vilka mått har ett vindkraftverk med märkeffekten 600 kW?
5. Vad betyder **startvind**, **märkvind**, **stoppvind** och **överlevnadsvind**. Ange rimliga värden på dessa.
6. När det gäller rotorns varvtal använder tillverkarna av vindkraftverk sig av tre olika metoder, vilka? Förklara för- och nackdelar med de olika metoderna.
7. Vad händer med vinden vid en kulle. Rita en skiss och förklara.
8. Vi befinner oss på ett öppet platt landskap där exponenten i vindhastighetens höjdberoende: $\alpha=0,15$. På höjden 10 m blåser det 6 m/s. Beräkna:
 - a. Vindhastigheten på höjden 50 m.
 - b. Vindens effekt per m^2 på 10 m och 50 m höjd.
 - c. Hur många procent ökar vindens effekt per m^2 från 50 m till 70 m höjd?
9. I en skog är träden i snitt 16 m. Nollplansförskjutningen beräknas normalt till 75% av vegetationens höjd. Exponenten i vindhastighetens höjdberoende är i skog 0,3. Hur många procent ökar vindens energi från 50 m till 70 m över marknivån?
10. Hur stor är den ostörda vindens effekt per m^2 när det blåser 8 m/s?
11. År 2008 var elproduktionen med svensk vindkraft 2 TWh. Hur stor måste den årliga tillväxten vara för att det ska bli 30 TWh till 2020?
12. I ett skogklätt område har man med en vindmätare placerad 50 m över marken mätt upp en medelvindhastighet på 5,5 m/s. Beräkna vindhastigheten på 80 m höjd.
13. Hur stor effekt kan maximalt utvinnas när det blåser 8 m/s?
14. Hur stort är massflödet genom en ideal vindturbin med diametern 70 m när det blåser 9 m/s?
15. Vi har en ideal vindturbin med diametern 44 m. Beräkna producerad effekt och vindens kraft på turbinen (vältkraft) vid vindhastigheterna 6 och 9 m/s.
16. Om varvtalet på en turbin är konstant, vad händer med anfallsvinkeln när vindhastigheten ökar? Vilket följande alternativ anser du är rätt? Motivera ditt val, gärna med en skiss!
 - a) anfallsvinkeln ökar
 - b) anfallsvinkeln är oförändrad
 - c) anfallsvinkeln minskar
17. Om vi har ett helt rakt rotorblad med samma pitchvinkel från centrum till bladspets. Hur beror anfallsvinkeln på radien? Vilket av följande alternativ anser du vara rätt? Motivera ditt val, gärna med en skiss!
 - a) anfallsvinkeln ökar med ökad radie
 - b) anfallsvinkeln beror inte av radien
 - c) anfallsvinkeln minskar med ökad radie

18. För att skydda växellåda och generator för överbelastning finns det två metoder som dominerar marknaden. Rita och förklara.
19. Beräkna optimal pitchvinkel och korda, vid bladspets samt 15 m från centrum för en trebladig turbin. Beräkna även optimal axiell och tangentiell induktionsfaktor. Turbinen har en diameter på 42 m och ska konstrueras för löptalet 7. Använd profilen DU-93-W-210. Försumma spetsförluster.
20. En trebladig turbin med en diameter på 7 m ska konstrueras. Egenskaper för bladprofilen DU-93-W-210 som ska användas framgår av bifogade figurer. Beräkna optimal bladutformning vid radierna 2 m och 3 m. Motivera de antaganden som måste göras för att lösa uppgiften.
21. En trebladig turbin med en diameter på 14 m ska konstrueras. Egenskaper för bladprofilen FFA-W3-211 som ska användas framgår av bifogade figurer. Beräkna **optimal bladutformning** 1 m från bladspetsen. Beräkna även **effektcoefficienten** för ringelementet med denna bladutformning vid optimal vindhastighet. Motivera de antaganden som måste göras för att lösa uppgiften.
22. En liten vindturbin med en diameter på 2 m ska konstrueras. Egenskaper för bladprofilen som ska användas framgår av bifogade figurer. Beräkna optimal bladutformning **mitt på** bladen samt **2 dm** från spetsen. Vilket **varvtal** är lämpligt när det blåser 7 m/s? Motivera de antaganden som måste göras för att lösa uppgiften.
23. Beräkna effektcoefficienten för ett ringelement kring radien 15 m, när vindhastigheten är 11 m/s och rotationshastigheten 30 varv/minut. Vid radien 15 m är kordan 1 m och pitchvinkeln $2,6^\circ$. Egenskaper för den använda profilen DU-93-W-210 framgår av figurer nedan. Försumma spetsförluster. Beräkna även totalverkningsgraden för ringelementet om växellådans verkningsgrad är 97% och generatorns 95%. Bladet är dimensionerat för ett lokalt löptal på 5 vid radien 15 m. Vilken vindhastighet motsvarar det och vad blir C_p då?
24. Vi har trebladig turbin med diametern 72 m. Vid radien 32 m har bladen en korda på 1,3 m och pitchvinkeln är $0,5^\circ$. Egenskaper för den använda bladprofilen FFA-W3-211 framgår av bifogade figurer. Vid ett tillfälle är bladspetsarnas hastighet 75 m/s och vindhastigheten 9 m/s och luftens densitet $1,3 \text{ kg/m}^3$. Beräkna **axeleffekten** som ringelementet mellan 31 m och 33 m bidrar med. Ta hänsyn till vakrotation och luftmotstånd.
25. Vad betyder a) **EPF**, b) **geostrofisk vind**, c) **märkvind**, d) **överlevnadsvind**
Ange även rimliga värden på dessa.
26. Medelvinden på en plats är 8 m/s. Frekvensfördelningen är inte känd. Vad kan vindens energiinnehåll per m^2 och år uppskattas till?
27. Fördelningen för vindhastigheten för en plats kan beskrivas med en Weibullfördelning med den karaktäristiska vindhastigheten 8 m/s och formfaktorn 2,2. Beräkna från detta hur många **timmar per år** som vi kan förvänta oss att det blåser mer än 15 m/s.
28. Fördelningen för vindhastigheten för en plats kan beskrivas med en Weibullfördelning med den karaktäristiska vindhastigheten 7 m/s och formfaktorn 1,8. Beräkna från detta medianvindhastigheten för platsen. Medianhastighet är den vindhastighet som det är lika vanligt att vindhastigheten är över som under.

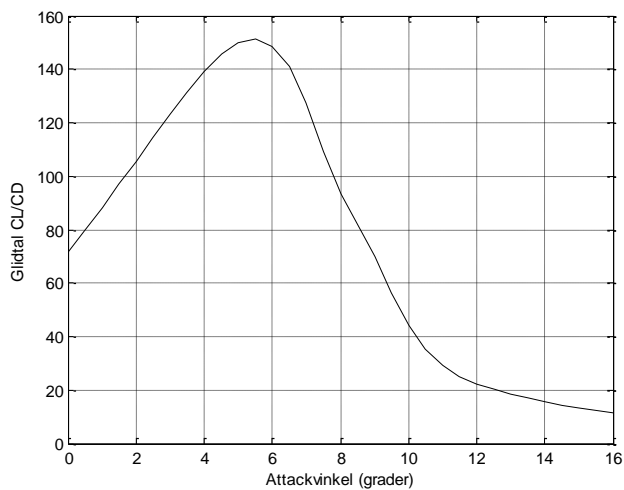
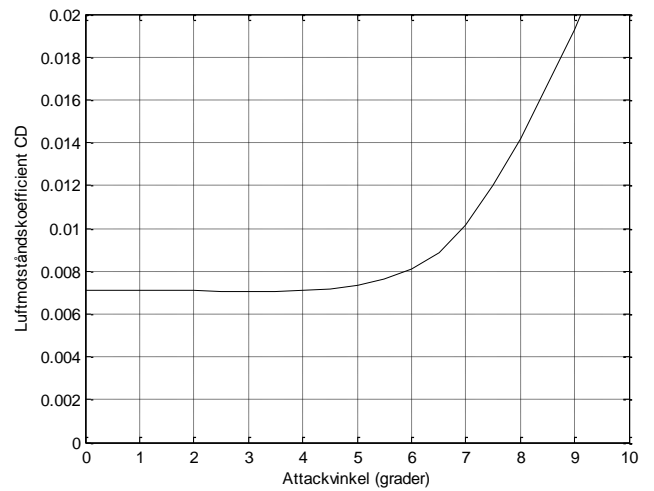
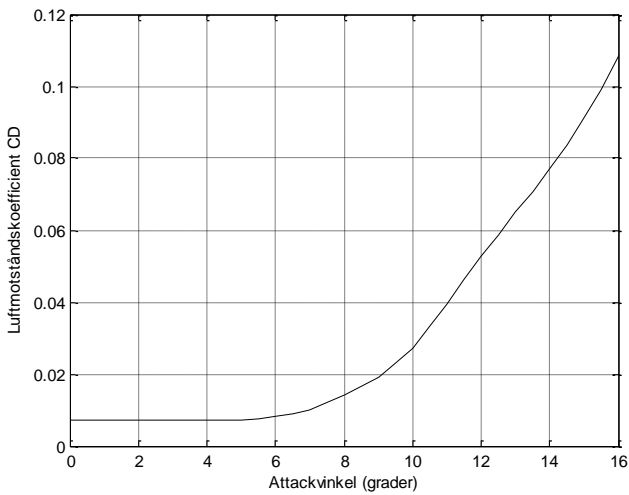
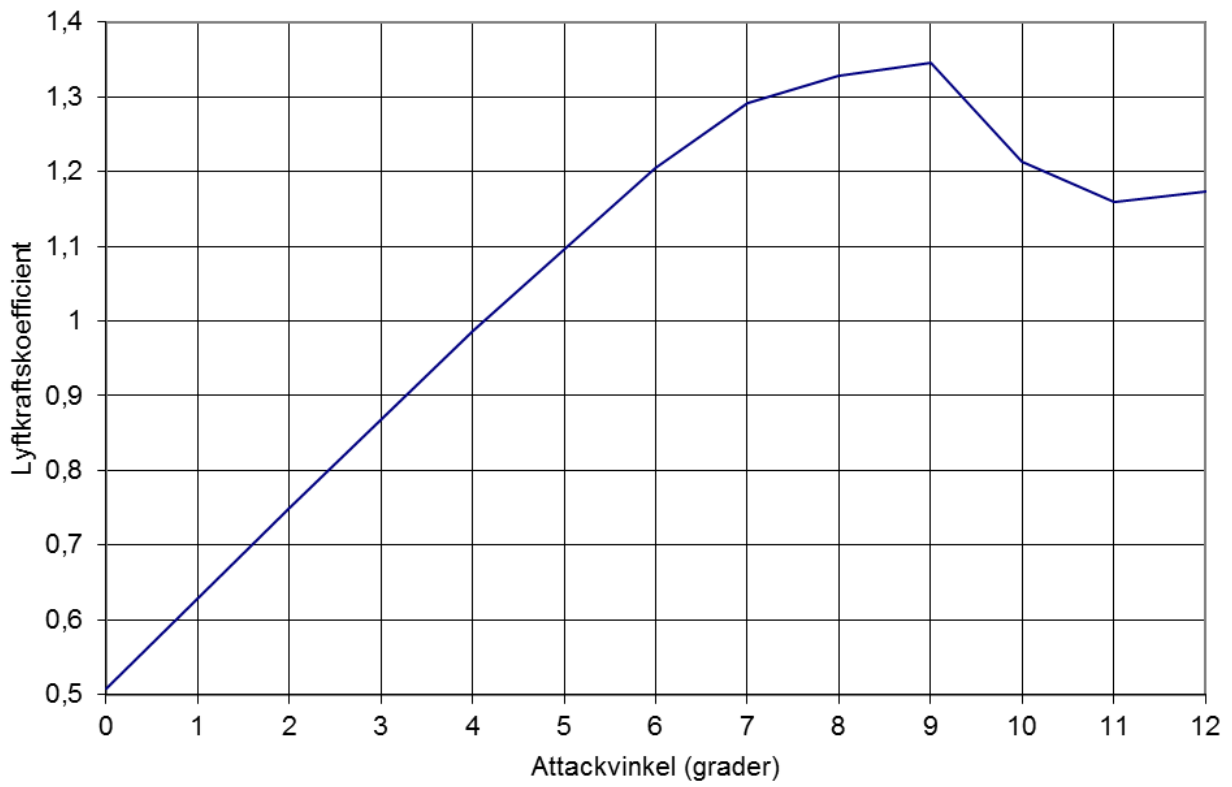
29. I ett skogklätt område har man med en vindmätare placerad i en mobiltelefonmast 30 m över marken mätt upp en medelvindhastighet på 5,4 m/s. Beräkna den **årliga energimängden** som kan utvinnas från en ideal turbin med diametern 40 m och navhöjd 50 m.
Motivera de antaganden som måste göras för att lösa uppgiften.
30. Det finns flera olika sätt att skapa variabelt varvtal. Enercon använder sig av en mångpolig synkrongenerator medan Vestas har en släpringad asynkrongenerator. Rita skisser som visar hur energin överförs från turbin till elnät enligt dessa koncept. Ange även för- och nackdelar med dessa lösningar.
31. Rita en skiss innehållande minst 10 viktiga komponenter för en vanlig konstruktion av ett vindkraftverk.
32. Förklara hur rotorns löptal påverkar effektiviteten.
33. Ljudet från bladen är $L_W=99,2$ dB(A), växellådan 97,4 dB(A) och generatorm 87,2 dB(A). Vad blir det totala ljudemittansen i watt och dB(A)?
34. Vi har ett andelsägt vindkraftverk. Investeringskostnaden är 10,4 Mkr och produktionen beräknas till 2,0 GWh/år vilket delas på 2000 andelar. Driftkostnaden för verket uppskattas till 0,2 Mkr/år + moms. Vad blir andelspriset och vad blir den årliga ”förtjänsten” per andel om värdet för elenergin för andelsägarna är 110 öre/kWh. Räkna med en låneränta på 5% och avskrivningstid på 20 år.
35. Du har alla tillstånd att sätta upp ett vindkraftverk. Du har för avsikt att sätta upp ett 800 kW Enercon-verk, E48. Då hittar du ett begagnat vindkraftverk som är 10 år gammalt, det är en 500 kW Enercon E40 (dvs föregångaren till E48).
E40: beräknas producera 1000 MWh/normalår i 10 år och kostar 900.000 kr.
E48: beräknas producera 1900 MWh/normalår i 20 år och kostar 7.500.000 kr.
För båda alternativen gäller att övriga investeringskostnader (fundament, elkabel, mm) beräknas till 1.600.000 kr och driftskostnaden till 100.000 kr/år.
Räkna med en ränta på 4,5%.
Beräkna specifika produktionskostnaden (öre/kWh) på elenergin från de två alternativen och kommentera resultatet.
36. På en plats är medelvinden 6,4 m/s och formfaktorn 2. Beräkna karaktäristiska vindhastigheten samt hur många timmar per år det blåser mer än 14 m/s.
37. **Förklara** kort följande begrepp samt ange även **rimliga värden** på dem:
a) **fullasttimmar** b) **kapacitetsfaktor** c) **soliditet**
38. Vilka tre huvuduppgifter har styrsystemet i ett vindkraftverk?
39. **Namnge** samt **beskriv funktionen** för de delar i figuren på nästa sida som är nummerade: 5, 6, 8, 12, 13 och 14. Beskriv funktionen med en till tre meningar vardera
40. Företaget du jobbar hos blir erbjuden att lägga ett bud på ett fem år gammalt vindkraftverk. Vindkraftverket beräknas hålla 15 år till och producerar 5500 MWh/år. Drift och underhållskostnaden beräknas vara 14 öre/kWh och vi räknar med att kunna sälja elenergin för 450 kr/MWh och elcertifikaten för 300 kr/certifikat. Det finns en 15 årsgräns på elcertifikatberättigande, så vi har bara 10 år kvar med elcertifikat. Ditt företag tillämpar en kalkylränta på 8%. Beräkna värdet av vindkraftverket genom att beräkna nuvärdet av alla intäkter minus utgifterna.

Ev. framtida uppgifter:

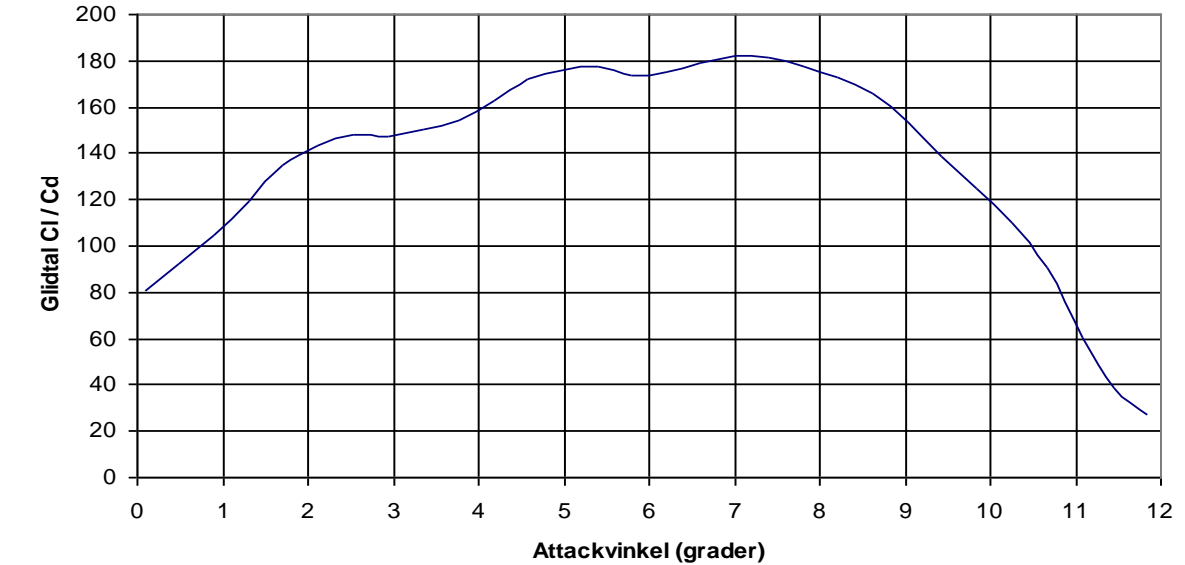
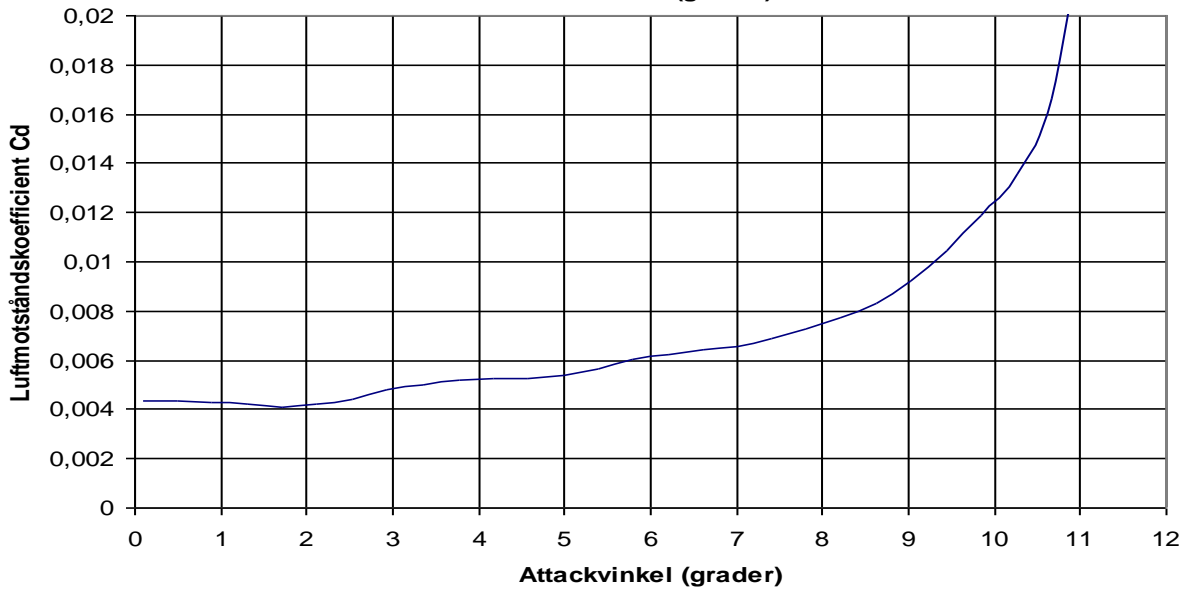
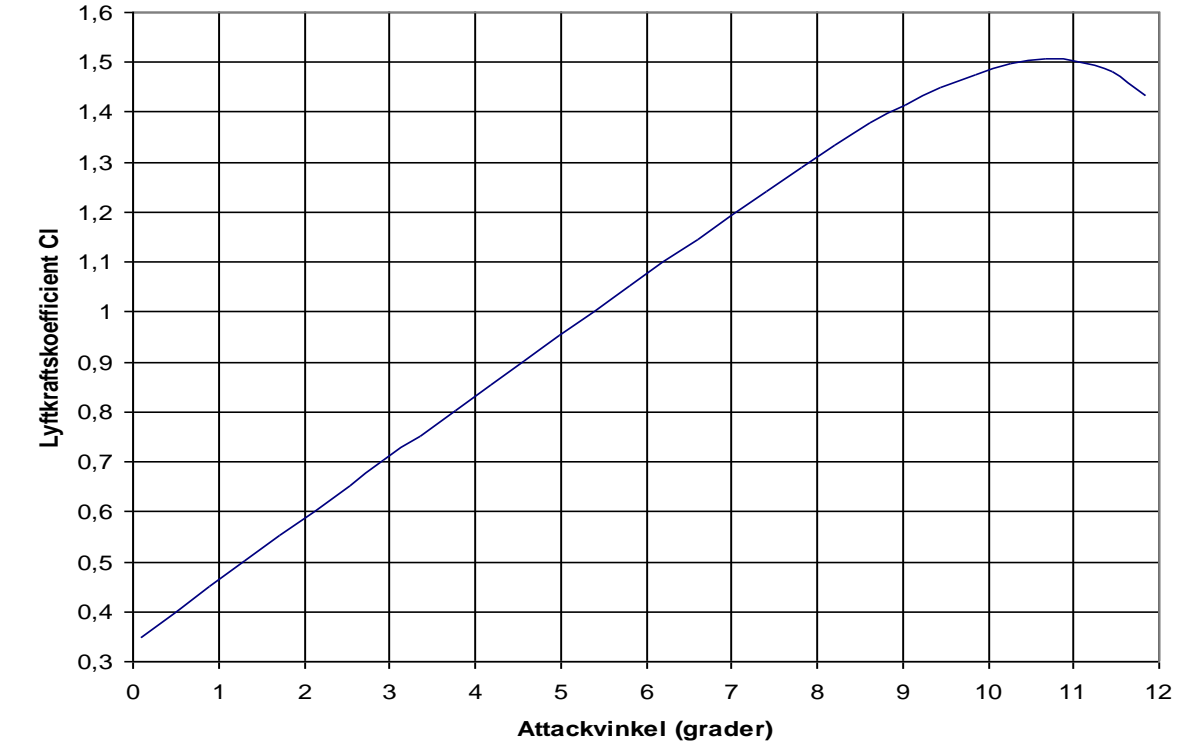
41. Addition av ljudtryck
42. Sikt



Profildata för DU-93-W-210



Profildata för FFA-W3-211



Vinden

Formelblad

Den fria vindens effekt: $P_{kin} = \frac{\rho}{2} Av^3$

Weibullfördelningens frekvensfunktion: $f_{Wei}(v) = \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k}$

Weibull sannolikhetsfunktion: $p_{Wei}(v_1 < v < v_2) = e^{-\left(\frac{v_1}{c}\right)^k} - e^{-\left(\frac{v_2}{c}\right)^k}$

Medelvind vid Weibullfördelning: $\bar{v} = c \cdot \Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right)$

Kubfaktorn: $EPF = \frac{\bar{v}^3}{\left(\frac{v}{c}\right)^3} = \frac{\Gamma(1+3/k)}{[\Gamma(1+1/k)]^3}$ är $6/\pi$ när $k=2$

Gammafunktionen: $\Gamma(0,5) = \sqrt{\pi}$ $\Gamma(1) = \Gamma(2) = 1$ $\Gamma(x+1) = x \cdot \Gamma(x)$ $\Gamma(x) \approx e^{\frac{(x-1)(x-2)}{0,5328+1,2x^{0,6105}}}$

Den fria vindens medeleffekt: $\overline{P_{kin}} = \frac{\rho}{2} A \cdot \bar{v}^3 = \frac{\rho}{2} A \cdot \left(\bar{v}\right)^3 \cdot EPF$

Höjdberoende, exponentiell modell: $\frac{v}{v_0} = \left(\frac{h}{h_0}\right)^\alpha$

Höjdberoende, logaritmisk modell: $\frac{v}{v_0} = \frac{\ln(h/z_0)}{\ln(h_0/z_0)}$

Terrain Description	z_0 (mm)
Very smooth, ice or mud	0.01
Calm open sea	0.20
Blown sea	0.50
Snow surface	3.00
Lawn grass	8.00
Rough pasture	10.00
Fallow field	30.00
Crops	50.00
Few trees	100.00
Many trees, hedges, few buildings	250.00
Forest and woodlands	500.00
Suburbs	1500.00
Centers of cities with tall buildings	3000.00

Allmänt

Rotorns vinkelhastighet: $\Omega = \frac{2\pi n}{60}$ [rad/s] om n [rpm]

Axeffekt: $P = \Omega M = P_{kin} C_P$

Eleffekt: $P_{el} = P_{kin} \cdot C_e$

Totalverkningsgrad: $C_e = C_P \cdot \eta_{växel} \cdot \eta_{generator}$

Axiell induktionsfaktor: $a = 1 - \frac{v_{turbin}}{v}$ där v_{turbin} vindhastigheten genom turbinen

$$a = \frac{1}{1 + \frac{8\pi r \sin \varphi}{Bc(C_L/\tan \varphi + C_D)}} \approx \frac{1}{1 + \frac{8\pi r \sin \varphi \tan \varphi}{BcC_L}}$$

Tangentiella induktionsfaktorn: $a' = \frac{\omega}{2\Omega}$ där ω är luftens rotationshastighet

$$a' = \frac{a(C_L \tan \varphi - C_D)}{\lambda_r(C_L + C_D \tan \varphi)} \approx \frac{a}{\lambda_r} \left(\tan \varphi - \frac{C_D}{C_L} \right) \approx \frac{a \cdot \tan \varphi}{\lambda_r}$$

Löptalet: $\lambda = \frac{\Omega R}{v} = \frac{v_{spets}}{v}$ där R rotorns radie

Lokalt löptal: $\lambda_r = \frac{\Omega r}{v} = \lambda \frac{r}{R}$ vid avståndet r från turbinaxeln

Relativa vindens hastighet: $v_{rel} = \frac{v(1-a)}{\sin \varphi}$

Relativa vindens riktning: $\varphi = \arctan \frac{1-a}{(1+a')\lambda_r}$

$\varphi = \alpha + \beta$ vid attackvinkeln α och pitchvinkeln β

Optimal design för friktionsfri turbin med hänsyn till vakrotation

$$\varphi_{opt} = \frac{2}{3} \arctan \frac{1}{\lambda_r} \quad c_{opt} = \frac{8\pi r}{BC_L} (1 - \cos \varphi_{opt})$$

Analys av turbin

$$C_{L,BEM} = \frac{8\pi r \sin \varphi (1 - \lambda_r \tan \varphi)}{Bc(\lambda_r + \tan \varphi)}$$

BEM

$$M1: dF = 4a(1-a)\rho v^2 \pi r dr$$

$$M2: dM = 4a'(1-a)\rho v \Omega \pi r^3 dr$$

$$B1: dF = \frac{\rho}{2} v_{rel}^2 (C_L \cos \varphi + C_D \sin \varphi) Bc dr \approx \frac{\rho}{2} v_{rel}^2 C_L \cos \varphi Bc dr$$

$$B2: dM = \frac{\rho}{2} v_{rel}^2 (C_L \sin \varphi - C_D \cos \varphi) Bc r dr$$

Ideal turbin

$$\text{Effektkoefficient:} \quad C_P = \frac{P}{P_{kin}} = 4a(1-a)^2$$

$$\text{Maximal effektkoefficient:} \quad C_{P,max} = \frac{16}{27} \approx 0,5926 \quad \text{när } a = 1/3$$

$$\text{Massflöde genom turbin:} \quad \dot{m} = \rho A v_{turbin} = \rho A v (1-a)$$

$$\text{Vältkraft:} \quad F = \frac{\rho}{2} A v^2 4a(1-a)$$

$$\text{Effekt:} \quad P = \frac{\rho}{2} A v^3 4a(1-a)^2 = P_{kin} C_P$$

Ljud

$$\text{Ljudeffekt:} \quad P_{akustisk} = 10^{\frac{L_w}{10}-12} W \quad P_{summa} = P_1 + P_2$$

$$\text{Ljudtryck:} \quad p = 2 \cdot 10^{\frac{L_p}{20}-5} Pa \quad p_{summa} = \sqrt{p_1^2 + p_2^2}$$

Ekonomi

$$\text{Payofftid: } T = \frac{K_i}{I_{\dot{a}} - D_{\dot{a}}} \quad \text{där } K_i = \text{investering, } I_{\dot{a}} = \text{årligt intäkt, } D_{\dot{a}} = \text{årlig driftskostnad}$$

$$\text{Årlig vinst:} \quad V_{\dot{a}} = I_{\dot{a}} - K_{\dot{a}} - D_{\dot{a}}$$

$$\text{Kapitalkostnad:} \quad K_{\dot{a}} = a \cdot K_i$$

$$\text{Annuitetsfaktor:} \quad a = \frac{r}{1 - (1+r)^{-n}} \quad r = \text{årlig ränta, } n = \text{avskrivningstid}$$

$$\text{Specifik produktionskostnad:} \quad \frac{K_{\dot{a}} + D_{\dot{a}}}{W_{el,\dot{a}}} \quad \text{där } W_{el,\dot{a}} \text{ är den årliga elproduktionen}$$

$$\text{Nuvärdet av enstaka intäkt/utgift:} \quad N = (1+r)^{-x} \cdot K_x$$

$$\text{Nuvärdet av upprepad intäkt/utgift:} \quad N = f_k \cdot K$$

$$\text{Kapitaliseringsfaktor:} \quad f_k = \frac{1 - (1+r)^{-n}}{r}$$

Svarsförslag och lösningsförslag

1. Se www.ieawind.org www.gwet.net F1 sid 2, 3
2. Se senaste månadsrapport under Driftuppföljning på www.vindenergi.org
3. Väderkvarn, vindpump, batteriladdare för beskrivning se (F1 sid 5-7)
4. Tornhöjd=längden på tornet (49m).
Navhöjd=navests höjd över marken (någon/några meter mer än tornhöjden) (50 m).
Totalhöjd=bladspetsens högsta höjd (navhöjd+D/2) (70 m).
Rotordiameter=D= den svepta ytans diameter (44m). Svepta yta= $\pi D^2/2$ (1500 m²)
5. Startvind – den lägsta vindhastighet som verket levererar effekt. (3 m/s)
Märkvind – den lägsta vindhastighet då verket producerar sin märkeffekt. (12-15 m/s)
Stoppvind – vindstyrka då verket stoppas av säkerhetsskäl. (25 m/s)
Överlevnadsvind – den vindstyrka som verket ska tåla utan att blåsa sönder. (55 m/s)
6. Ett fast varvtal – enkel konstruktion, inte så effektiv
Två fasta varvtal – ganska enkel konstruktion, dubbellindad generatorer ger bättre generatorverkningsgrad, två varvtal utnyttjar vinden bättre
Variabelt varvtal – utnyttjar vinden optimalt, krångligare konstruktion, kräver kraftelektronik (F1 sid 12)
7. Vinden ökar på krönet av en mjuk kulle, (F1 sid 17)
8. a) 7,6 m/s b) 135 W/m² 278 W/m² c) 16 %
9. 46 % Beräkning: $((70-12)/(50-12))^{(3*0,3)}=1,46$
10. 320 W/m² Antag $\rho=1,25 \text{ kg/m}^3$ ger $1,25/2*8^3=320 \text{ W/m}^2$
11. 26% årlig tillväxt. Beräkning: 12 års ökning, dvs $2x^{12}=30$ ger $x=(30/2)^{(1/12)}=1,26$
12. Här måste vi göra flera antaganden: Skogens höjd kan vara 16 m, vilket innebär att nollplansförskjutningen blir 12 m (75% av höjden) Luftens densitet brukar man använda 1,25 kg/m³ i vindkraftsammanhang. Medelvindhastigheten på 80 m höjd kan uppskattas med hjälp av sambandet: $\frac{v}{v_r} = \frac{\ln(h/z_0)}{\ln(h_r/z_0)}$
Från tabellen kan vi avläsa råhetslängden för skog till $z_0=0,5 \text{ m}$, vilket ger:
$$\bar{v}_{80} = 5,5 \cdot \frac{\ln\left(\frac{80-12}{0,5}\right)}{\ln\left(\frac{50-12}{0,5}\right)} \approx 6,2 \text{ m/s}$$

Alternativt $\bar{v}_{80} = \bar{v}_{50} \left(\frac{h_{80}}{h_{50}}\right)^\alpha = 5,5 \cdot \left(\frac{80-12}{50-12}\right)^{0,3} \approx 6,5 \text{ m/s}$
13. 190 W/m² Antag $\rho=1,25 \text{ kg/m}^3$, $C_p=16/27$ ger $1,25/2*8^3*(16/27)=190 \text{ W/m}^2$
14. 29 ton/s Antag $a=1/3$, $\rho=1,25 \text{ kg/m}^3$ ger $1,25*\pi 70^2/4*9(1-1/3)=28863 \text{ kg/s}$
15. 6 m/s ger P=122 kW, F=30 kN. 9 m/s ger P=410 kW, F=68 kN, (ideal dvs $a=1/3$)
16. a
17. c

18. Pitchreglering – bladen vrids så de släpper förbi vinden

Stallreglering – vid ökad vindhastighet ökar attackvinkel. När attackvinkeln kommer över ett visst värde bildas turbulens på vingprofilens baksida (överstegring=stall) vilket leder till att profilens lyftkraft minskar samtidigt som luftmotståndet ökar, vilket leder till att vridmomentet minskar (eller hålls konstant) vid ökande vindhastighet. (F1 sid 12, F2 sid 9)

19. Design av turbinblad för 42 m turbin

I figur ser vi att det bästa glidtalet (C_L/C_D maximal) är vid $\alpha=5,5^\circ$. Lyftkraftskoefficienten avläses till

$$C_L = 1,15 \text{ och luftmotståndskoefficienten till } C_D = \frac{C_L}{150} \approx 0,0077$$

Vid bladspetsen.

Vi har löptalet givet till 7, så infallande vindens vinkel väljs enligt:

$$\varphi_{spets} = \frac{2}{3} \arctan \frac{1}{\lambda} = \frac{2}{3} \arctan \frac{1}{7} \approx 5,42^\circ$$

Det innebär att pitchvinkeln vid bladspetsen blir:

$$\beta_{spets} = \varphi_{spets} - \alpha = 5,4 - 5,5 \approx -0,1^\circ$$

Bladbredden (kordan) beräknas enligt:

$$c_{spets} = \frac{8\pi R}{BC_L} (1 - \cos \varphi_{spets}) = \frac{8\pi 21}{3 \cdot 1,15} (1 - \cos 5,42) \approx 0,68 \text{ m}$$

Axiella induktionsfaktorn kan då beräknas enligt:

$$a_{spets} = \frac{1}{1 + \frac{8\pi \sin \varphi_{spets}}{Bc_{spets}(C_L/\tan \varphi_{spets} + C_D)}} \approx \frac{1}{1 + \frac{8\pi 21 \sin 5,42}{3 \cdot 0,68 \cdot (1,15/\tan 5,42 + 0,0077)}} \approx 0,3317$$

Då får den vi den tangentiella induktionsfaktorn enligt:

$$a'_{spets} = \frac{a_{spets}(C_L \tan \varphi_{spets} - C_D)}{\lambda(C_L + C_D \tan \varphi_{spets})} \approx 0,00418$$

Vid radien 15 m gäller:

Det lokala löptalet vid radien 15 m beräknas enligt:

$$\lambda_{15} = \lambda \frac{r}{R} = \lambda \frac{r}{D/2} = 7 \frac{15}{42/2} = 5$$

Infallande vindens vinkel väljs enligt:

$$\varphi_{15} = \frac{2}{3} \arctan \frac{1}{\lambda_r} = \frac{2}{3} \arctan \frac{1}{5} \approx 7,54^\circ$$

Pitchvinkeln blir då: $\beta_{15} = \varphi_{15} - \alpha = 7,54 - 5,5 \approx 2,0^\circ$

$$\text{Kordan: } c_{15} = \frac{8\pi r}{BC_L} (1 - \cos \varphi_{15}) = \frac{8\pi 15}{3 \cdot 1,15} (1 - \cos 7,54) \approx 0,945 \text{ m}$$

$$a_{15} = \frac{1}{1 + \frac{8\pi \sin \varphi_{15}}{Bc_{15}(C_L/\tan \varphi_{15} + C_D)}} \approx 0,3326 \quad a'_{15} = \frac{a_{15}(C_L \tan \varphi_{15} - C_D)}{\lambda_r(C_L + C_D \tan \varphi_{15})} \approx 0,00835$$

20. Design av 7 m turbin

I figur ser vi att det bästa glidtalet (C_L/C_D maximal) är vid $\alpha=5,5^\circ$. Lyftkraftskoefficienten avläses till

$$C_L = 1,15 \text{ och luftmotståndskoefficienten till } C_D = \frac{C_L}{150} \approx 0,0077$$

Vi väljer att designa turbinen för ett löptal på $\lambda = 7$ därför att det är normalt för trebladiga turbiner.

Vid radien 2 m.

Det lokala löptalet kan beräknas från:

$$\lambda_2 = \lambda \frac{r}{R} = \lambda \frac{r}{D/2} = 7 \frac{2}{7/2} = 4$$

Infallande vindens vinkel väljs enligt:

$$\varphi_2 = \frac{2}{3} \arctan \frac{1}{\lambda_2} = \frac{2}{3} \arctan \frac{1}{4} \approx 9,36^\circ$$

Det innebär att pitchvinkeln vid radien 2 m blir:

$$\beta_2 = \varphi_2 - \alpha = 9,36 - 5,5 \approx 3,9^\circ$$

Bladbredden (kordan) beräknas enligt:

$$c_{spets} = \frac{8\pi r}{BC_L} (1 - \cos \varphi_2) = \frac{8\pi 2}{3 \cdot 1,15} (1 - \cos 9,36) \approx 0,19 \text{ m}$$

Vid radien 3 m gäller:

Det lokala löptalet vid radien 3 m beräknas enligt:

$$\lambda_3 = \lambda \frac{r}{R} = \lambda \frac{r}{D/2} = 7 \frac{3}{7/2} = 6$$

Infallande vindens vinkel väljs enligt:

$$\varphi_3 = \frac{2}{3} \arctan \frac{1}{\lambda_3} = \frac{2}{3} \arctan \frac{1}{6} \approx 6,31^\circ$$

Pitchvinkeln blir då: $\beta_3 = \varphi_3 - \alpha = 6,31 - 5,5 \approx 0,8^\circ$

$$\text{Kordan: } c_3 = \frac{8\pi r}{BC_L} (1 - \cos \varphi_3) = \frac{8\pi 3}{3 \cdot 1,15} (1 - \cos 6,31) \approx 0,13 \text{ m}$$

21. Design av 14 m turbin

Givet: $D = 14 \text{ m}$ $B = 3$

Vi väljer att designa turbinen för ett löptal på $\lambda = 7$ därför att det är normalt för trebladiga turbiner. Vi ska beräkna profildata en meter från bladspetsen, dvs

$$R = \frac{D}{2} = \frac{14}{2} = 7 \text{ m} \text{ och en meter från bladspetsen ger } r = R - 1 = 7 - 1 = 6 \text{ m}$$

Vi får då ett lokalt löptal enligt:

$$\lambda_6 = \lambda \frac{r}{R} = 7 \frac{6}{7} = 6$$

Infallande vindens vinkel väljs enligt:

$$\varphi = \frac{2}{3} \arctan \frac{1}{\lambda_6} = \frac{2}{3} \arctan \frac{1}{6} \approx 6,31^\circ$$

I bifogad figur ser det ut som att det bästa glidtalet är vid $\alpha = 7^\circ$. Lyftkraftskoefficienten avläses till $C_L = 1,20$ och luftmotståndskoefficienten till $C_D \approx 0,0066$

Pitchvinkeln blir då: $\beta = \varphi - \alpha = 6,31 - 7 \approx -0,7^\circ$

Bladbredden beräknas enligt:

$$c = \frac{8\pi r}{BC_L} (1 - \cos \varphi) = \frac{8\pi 6}{3 \cdot 1,20} (1 - \cos 6,31) \approx 0,254 \text{ m}$$

Effekt-koefficienten för ringelementet kan beräknas enligt:

$$C_{P,6} = \frac{P_{axel}}{P_{kin}} = \frac{\Omega \cdot dM}{\frac{\rho}{2} v^3 \cdot dA} = \frac{\Omega \cdot \frac{\rho}{2} v_{rel}^2 (C_L \sin \varphi - C_D \cos \varphi) B c r dr}{\frac{\rho}{2} v^3 \cdot 2\pi r dr} = \frac{\Omega \cdot v_{rel}^2 (C_L \sin \varphi - C_D \cos \varphi) B c}{v^3 \cdot 2\pi}$$

$\lambda = \frac{\Omega R}{v}$ ger $\Omega = \frac{v\lambda}{R}$ sedan har vi även $v_{rel} = \frac{v(1-a)}{\sin \varphi}$ med dessa insatta i sambandet ovan får vi:

$$C_{P,6} = \frac{\frac{v\lambda}{R} \cdot \left(\frac{v(1-a)}{\sin \varphi} \right)^2 (C_L \sin \varphi - C_D \cos \varphi) B c}{v^3 \cdot 2\pi} = \frac{\frac{\lambda}{R} \cdot \left(\frac{(1-a)}{\sin \varphi} \right)^2 (C_L \sin \varphi - C_D \cos \varphi) B c}{2\pi}$$

Axiella induktionsfaktorn kan beräknas enligt:

$$a = \frac{1}{1 + \frac{8\pi r \sin \varphi}{Bc(C_L / \tan \varphi + C_D)}} \approx \frac{1}{1 + \frac{8\pi 6 \sin 6,31}{3 \cdot 0,254 \cdot (1,20 / \tan 6,31 + 0,0066)}} \approx 0,3330$$

Så nu har vi allt vi behöver för att beräkna effekt-koefficienten:

$$C_{P,6} = \frac{\frac{7}{7} \cdot \left(\frac{(1-0,3330)}{\sin 6,31} \right)^2 (1,20 \sin 6,31 - 0,0066 \cos 6,31) \cdot 3 \cdot 0,254}{2\pi} \approx 0,560$$

Svar: Bladen ska ha en koorda på 25 cm och vinklade -0.7 grader i förhållande till rotationsplanet. Den beräknade effekt-koefficienten för ringelementet är 56 %.

22. Design av 2 m turbin

Givet: $D=2$ m

Vi väljer 3 blad för att det är vanligast (hade kunnat välja 2 också, vilket skulle underlätta tillverkningen av rotorn)

Vi väljer profilen FFA-W3-211 eftersom vi har bra diagram med profildata för den profilen.

Vi väljer att designa turbinen för ett löptal på $\lambda = 7$ därför att det är normalt för trebladiga turbiner.

I profildata ser det ut som att det bästa glidtalet är vid $\alpha=7,1^\circ$, så vi väljer den attackvinkeln.

Lyftkraftskoefficienten avläses till $C_L = 1,20$

Vi ska beräkna profildata mitt på bladet samt 2 dm från bladspetsen, dvs

$$R = \frac{D}{2} = \frac{2}{2} = 1 \text{ m} \text{ och } 2 \text{ dm från bladspetsen ger } r_1 = R - 0,2 = 1 - 0,2 = 0,8 \text{ m}$$

$$\text{Och mitt på bladet har vi } r_2 = \frac{R}{2} = \frac{1}{2} = 0,5 \text{ m}$$

Vi får då lokala löptal enligt:

$$\lambda_1 = \lambda \frac{r_1}{R} = 7 \frac{0,8}{1} = 5,6 \text{ och}$$

$$\lambda_2 = \lambda \frac{r_2}{R} = 7 \frac{0,5}{1} = 3,5$$

Infallande vindens vinkel väljs enligt:

$$\varphi_1 = \frac{2}{3} \arctan \frac{1}{\lambda_1} = \frac{2}{3} \arctan \frac{1}{5,6} \approx 6,75^\circ \text{ och}$$

$$\varphi_2 = \frac{2}{3} \arctan \frac{1}{\lambda_2} = \frac{2}{3} \arctan \frac{1}{3,5} \approx 10,63^\circ$$

Pitchvinklarna blir då:

$$\beta_1 = \varphi_1 - \alpha = 6,75 - 7,1 \approx -0,35^\circ \text{ och}$$

$$\beta_2 = \varphi_2 - \alpha = 10,63 - 7,1 \approx 3,53^\circ$$

Bladbredden beräknas enligt:

$$c_1 = \frac{8\pi r_1}{BC_L} (1 - \cos \varphi_1) = \frac{8\pi 0,8}{3 \cdot 1,20} (1 - \cos 6,75) \approx 0,0387 \text{ m och}$$

$$c_2 = \frac{8\pi r_2}{BC_L} (1 - \cos \varphi_2) = \frac{8\pi 0,5}{3 \cdot 1,20} (1 - \cos 10,63) \approx 0,0599 \text{ m}$$

Optimalt varvtal när det blåser 7 m/s kan beräknas med hjälp av följande samband:

$$\lambda = \frac{\Omega R}{v} \text{ och } \Omega = \frac{2\pi n}{60} \text{ vilket ger}$$

$$\Omega = \frac{\lambda v}{R} = \frac{2\pi n}{60} \text{ ger } n = \frac{60 \lambda v}{2\pi R} = \frac{60 \cdot 7 \cdot 7}{2\pi \cdot 1} \approx 468 \text{ rpm}$$

Svar: Mitt på bladen ska vi ha en koord på 6 cm och pitchvinkel $3,5^\circ$, 2 dm från bladspetsen ska koordan och pitchvinkeln vara 4 cm respektive $-0,4^\circ$.

Optimalt varvtal vid vindhastigheten 7 m/s är 470 rpm.

23. Analys av ett ringelement vid radien 15 m

Rotationshastigheten för turbinen är: $\Omega = 2\pi \frac{30}{60} \approx 3,14$

Lokala löptalet vid radien 15 m: $\lambda_{15} = \frac{r\Omega}{v} = \frac{15 \cdot 3,14}{11} \approx 4,28$

Nästa steg är att bestämma bladens attackvinkel, vilket inte kan beräknas direkt då bladprofilens prestanda enligt diagram i hög grad påverkar vindhastigheten genom turbinen.

Om vi antar en attackvinkel på 8° så ska infallande vindens riktning $\varphi = 8 + 2,6 = 10,6^\circ$ i förhållande till rotorplanet. Vi beräkna vilken lyftkraftskoefficient, C_L , bladprofilen ska ha för att det ska vara uppfyllt med hjälp av:

$$C_{L,\alpha=8^\circ} = \frac{8\pi r \sin \varphi (1 - \lambda_r \tan \varphi)}{Bc(\lambda_r + \tan \varphi)} = \frac{8\pi 15 \sin 10,6 (1 - 4,28 \tan 10,6)}{3 \cdot 1 \cdot (4,28 + \tan 10,6)} \approx 1,03$$

Vi prickar in 1,03 vid 8° i bladprofilens lyftkraftsdiagram och ser att vi har antagit en för hög vinkel då lyftkraftskoefficienten för den aktuella profilen är högre vid den vinkeln. Vid $\alpha = 6^\circ$ får vi $C_L = 1,50$ och 7° ger $C_L = 1,30$

Skärningspunkten är vid $\alpha = 7,0^\circ$, $\varphi = \alpha + \beta = 7 + 2,6 = 9,6^\circ$ och $C_L = 1,30$. Luftmotståndskoefficienten kan vi avläsa i nästa diagram vid $\alpha = 7,0^\circ$ till $C_D = 0,010$

Den axiella induktionsfaktorn beräknas enligt:

$$a = \frac{1}{1 + \frac{8\pi r \sin \varphi}{Bc(C_L / \tan \varphi + C_D)}} = \frac{1}{1 + \frac{8 \cdot \pi \cdot 15 \cdot \sin 9,6}{3 \cdot 1 \cdot (1,30 / \tan 9,6 + 0,010)}} = 0,2686$$

Vridmomentet från ringelementet kan beräknas med B2 till

$$dM = \frac{\rho}{2} v_{rel}^2 (C_L \sin \varphi - C_D \cos \varphi) Bc r dr$$

$$dM = \frac{1,25}{2} \left(\frac{v(1-a)}{\sin \varphi} \right)^2 (1,30 \sin \varphi - 0,010 \cos \varphi) \cdot 3 \cdot 1 \cdot 15 \cdot dr$$

$$dM = \frac{1,25}{2} \left(\frac{11 \cdot (1 - 0,2686)}{\sin 9,6} \right)^2 (1,30 \sin 9,6 - 0,010 \cos 9,6) \cdot 3 \cdot 1 \cdot 15 \cdot dr \approx 13546 \cdot dr \text{ Nm}$$

Effekten från ringelementet fås av: $dP = \Omega \cdot dM = 42,56 \cdot dr \text{ kW}$

Fria vindens energi för motsvarande yta är:

$$P_{kin} = \frac{\rho}{2} A v^3 = \frac{1,25}{2} \cdot (2\pi \cdot 15 \cdot dr) \cdot 11^3 \approx 78,40 \cdot dr \text{ kW}$$

Effekt-koefficienten för ringelementet blir då: $C_p = \frac{dP}{P_{kin}} \approx \frac{42,56 \cdot dr}{78,40 \cdot dr} \approx 0,543$

Totalverkningsgraden för ringelementet blir: $C_e = C_p \cdot \eta_{växel} \cdot \eta_{gene} \approx 0,543 \cdot 0,97 \cdot 0,95 \approx 0,50$

Beräkningar för dimensionerad vindhastighet (när lokala löptalet är 5)

Lokala löptalet 5, motsvarar $v_5 = \frac{\Omega r}{\lambda_r} \approx \frac{3,14 \cdot 15}{5} \approx 9,42 \text{ m/s}$

Om dimensioneringen är korrekt gjord ska den infallande vindriktningen vara optimal, dvs:

$$\varphi_{opt} = \frac{2}{3} \arctan \frac{1}{\lambda_r} = \frac{2}{3} \arctan \frac{1}{5} \approx 7,54^\circ$$

Från nedanstående samband kan vi räkna ut vilken lyftkraftskoefficient som valts vid dimensioneringen

$$c_{opt} = \frac{8\pi r}{BC_L} (1 - \cos \varphi_{opt}) \quad (\text{detta samband bör vara använt vid dimensioneringen})$$

$$C_L = \frac{8\pi r}{Bc_{opt}} (1 - \cos \varphi_{opt}) = \frac{8\pi 15}{3 \cdot 1} (1 - \cos 7,54) \approx 1,087$$

Från diagram ser vi då att luftmotståndskoefficienten då är $C_D = 0,0073$ (vid attackvinkel $4,9^\circ$)

Den axiella induktionsfaktorn kan beräknas enligt:

$$a = \frac{1}{1 + \frac{8\pi r \sin \varphi}{Bc(C_L / \tan \varphi + C_D)}} \approx \frac{1}{1 + \frac{8\pi 15 \sin 7,54}{3 \cdot 1 \cdot (1,087 / \tan 7,54 + 0,0073)}} \approx 0,3326$$

$$C_{P,5} = \frac{dP_5}{P_{kin,5}} = \frac{\Omega \cdot dM_5}{P_{kin,5}} = \frac{\Omega \cdot \frac{\rho}{2} \left(\frac{v(1-a)}{\sin \varphi} \right)^2 (C_L \sin \varphi - C_D \cos \varphi) Bc r dr}{\frac{\rho}{2} Av^3}$$

$$C_{P,5} = \frac{\pi \cdot \frac{\rho}{2} \left(\frac{9,42(1-0,3326)}{\sin 7,54} \right)^2 (1,087 \sin 7,54 - 0,0063 \cos 7,54) 3 \cdot 1 \cdot r \cdot dr}{\frac{\rho}{2} (2\pi \cdot r \cdot dr) \cdot 9,42^3} \approx 0,562$$

24. Analys av ett ringelement vid radien 32 m

$$\text{Givna data: } D = 72 \text{ m} \Leftrightarrow R = \frac{D}{2} = 36 \text{ m}$$

$$B = 3 \quad r = 32 \text{ m} \quad c_{32} = 1,3 \text{ m} \quad \beta_{32} = 0,5^\circ \quad v = 9 \text{ m/s} \quad v_{spets} = R\Omega = 75 \text{ m/s}$$

För att hitta bladprofilens arbetspunkt i det bifogade lyftkraftsdiagrammet kan vi rita in

$$C_{L,BEM} = \frac{8\pi r \sin \varphi (1 - \lambda_r \tan \varphi)}{Bc(\lambda_r + \tan \varphi)}$$

i diagrammet, där $\varphi = \alpha + \beta$

Turbinens löptal vid det givna tillfället kan beräknas enligt:

$$\lambda = \frac{v_{spets}}{v} = \frac{75}{9} \approx 8,33$$

Det lokala löptalet vid radien 32 m blir då:

$$\lambda_{32} = \lambda \frac{r}{R} = \frac{75}{9} \cdot \frac{32}{36} \approx 7,41$$

För att få en första gissning kan beräkna vilket φ som vi skulle välja om vi skulle designa turbinen.

$$\varphi_{opt} = \frac{2}{3} \arctan \frac{1}{\lambda_r} \approx \frac{2}{3} \arctan \frac{1}{7,41} \approx 5,1^\circ \quad \text{virket motsvarar en attackvinkel } 4,6^\circ$$

Relativa vindens riktning i vårt fall är antagligen mindre, eftersom ett löptal på 8,33 är högre än vad vi förväntar oss att turbinen är designad för.

$$C_{L,BEM} = \frac{8\pi r \sin \varphi (1 - \lambda_r \tan \varphi)}{Bc(\lambda_r + \tan \varphi)} = \frac{8\pi 32 \sin \varphi (1 - 7,41 \tan \varphi)}{3 \cdot 1,3 \cdot (7,41 + \tan \varphi)}$$

Beräknar detta för några attackvinklar och ritar in i diagrammet.

Attackvinkel α	φ	CL_{BEM}
4	4,5	0,90
4,5	5	0,84
5	5,5	0,75

Vi kan avläsa en skärningspunkt vid $\alpha = 4,3^\circ$ och $C_L = 0,87$, vilket ger $\varphi = \alpha + \beta = 4,3 + 0,5 = 4,8^\circ$

Ur det andra diagrammet kan vi avläsa $C_D = 0,005$

Axeffekten från ringelementet kan beräknas enligt: $dP = \Omega \cdot dM$

$$\text{Där vinkelhastigheten kan fås från: } v_{spets} = R\Omega \quad \Omega = \frac{v_{spets}}{R} = \frac{75}{36} \approx 2,083 \text{ rad/s}$$

Och ringelementets vridmoment från:

$$dM = \frac{\rho}{2} v_{rel}^2 (C_L \sin \varphi - C_D \cos \varphi) B c r dr$$

$$\text{Där } v_{rel} = \frac{v(1-a)}{\sin \varphi}$$

där den axiella induktionsfaktorn kan beräknas enligt:

$$a = \frac{1}{1 + \frac{8\pi \sin \varphi}{Bc(C_L / \tan \varphi + C_D)}} \approx \frac{1}{1 + \frac{8\pi 32 \sin 4,8}{3 \cdot 1,3 \cdot (0,87 / \tan 4,8 + 0,005)}} \approx 0,375$$

Med ovanstående samband insatta får vi ringelementets axeffekt enligt:

$$dP = \frac{v_{spets}}{R} \cdot \frac{\rho}{2} \left(\frac{v(1-a)}{\sin \varphi} \right)^2 (C_L \sin \varphi - C_D \cos \varphi) B c r dr$$

$$dP = \frac{75}{36} \cdot \frac{1,3}{2} \cdot \left(\frac{9(1-0,375)}{\sin 4,8} \right)^2 \cdot (0,87 \sin 4,8 - 0,005 \cos 4,8) \cdot 3 \cdot 1,3 \cdot 32 \cdot 2 \approx 104 \text{ kW}$$

Svar: ringelementets axeffekt beräknas till 104 kW

25. Vad betyder a) **EPF**, b) **geostrofisk vind**, c) **märkvind**, d) **överlevnadsvind**

a) EPF = Energy Pattern Factor, eller kubfaktorn. Beskriver förhållandet mellan medelvärdet av kuberna av vindhastigheten i förhållande till kuberna av medelvindhastigheten.

$$EPF = \frac{\overline{v^3}}{(\bar{v})^3} \quad \text{är } 6/\pi \text{ vid Weibullfördelningen med formfaktorn } k=2$$

b) På hög höjd påverkas inte vindhastigheten av markfriktionen. Den vind som inte bromsas av markfriktionen kallas geostrofisk vind. Ett normalt medelvärde är 8-12 m/s.

c) Märkvind – den lägsta vindhastighet då verket producerar sin märkeffekt. (12-15 m/s)

d) Överlevnadsvind – den vindstyrka som verket ska tåla utan att blåsa sönder. (55 m/s)

26. 5,3 MWh (antag weibullfördelning med formfaktorn k=2, vilket ger kubfaktorn EPF=1,9)

27. Antal timmar/år över 15 m/s?

Vi kan använda oss av Weibullfördelningens sannolikhetsfunktion för att beräkna hur stor del av tiden det blåser mindre än 15 m/s – och resten av tiden blåser det över 15/s.

Givna data $c=8$ m/s, $k=2,2$

$$P_{Wei}(v_1 < v < v_2) = e^{-\left(\frac{v_1}{c}\right)^k} - e^{-\left(\frac{v_2}{c}\right)^k}$$

$$P_{Wei}(0 < v < 15) = e^{-\left(\frac{0}{8}\right)^{2,2}} - e^{-\left(\frac{15}{8}\right)^{2,2}} = 1 - e^{-\left(\frac{15}{8}\right)^{2,2}} \approx 0,98144$$

Det innebär att det antal timmar det blåser mer än 15 m/s kan beräknas enligt:

$$t = 8760 \cdot (1 - 0,98144) \approx 163 \text{ h}$$

Svar: Det blåser mer än 15 m/s i 160 h/år

28. Medianhastighet?

Vi kan använda oss av Weibullfördelningens sannolikhetsfunktion:

$$P_{Wei}(v_1 < v < v_2) = e^{-\left(\frac{v_1}{c}\right)^k} - e^{-\left(\frac{v_2}{c}\right)^k}$$

Sannolikheten att det blåser mellan 0 m/s och medianhastigheten ska vara 0,5, dvs:

$$0,5 = P_{Wei}(0 < v < v_{median}) = e^{-\left(\frac{0}{c}\right)^k} - e^{-\left(\frac{v_{median}}{c}\right)^k}$$

$$0,5 = 1 - e^{-\left(\frac{v_{median}}{c}\right)^k} \quad \text{ger} \quad e^{-\left(\frac{v_{median}}{c}\right)^k} = 0,5 \quad \text{ger} \quad -\left(\frac{v_{median}}{c}\right)^k = \ln 0,5 \quad \text{ger}$$

$$\frac{v_{median}}{c} = (-\ln 0,5)^{1/k} \quad \text{ger} \quad v_{median} = c(-\ln 0,5)^{1/k} = 7(-\ln 0,5)^{1/1,8} \approx 5,7 \text{ m/s}$$

Svar: medianvindhastigheten för platsen är 5,7 m/s

29. Årlig energimängd

Här måste vi göra flera antaganden: Skogens höjd kan vara 16 m, vilket innebär att nollplansförskjutningen blir 12 m (75% av höjden) Luftens densitet brukar man använda 1,25 kg/m³ i vindkraftsammanhang. Kubfaktorn antas till 1,91 (analytiskt värde $6/\pi$), vilket vi har vid en Weibullfördelning med formfaktorn $k=2$.

Medelvindhastigheten på 50 m höjd kan uppskattas med hjälp av sambandet:

$$\frac{v}{v_r} = \frac{\ln(h/z_0)}{\ln(h_r/z_0)}$$

Från tabellen kan vi avläsa rähetslängden för skog till $z_0=0,5$ m

$$\bar{v}_{50} = 5,4 \cdot \frac{\ln\left(\frac{50-12}{0,5}\right)}{\ln\left(\frac{30-12}{0,5}\right)} \approx 6,53 \text{ m/s}$$

Den fria vindens medeleffekt per areaenhet på 50 m höjd kan då beräknas enligt:

$$\frac{\bar{P}_{kin}}{A} = \frac{\rho}{2} \cdot (\bar{v}_{50})^3 \cdot EPF \approx \frac{1,25}{2} \cdot 6,53^3 \cdot 1,91 \approx 332 \text{ W/m}^2$$

Den maximalt utvinnbara energin per år begränsas av rotorns svepta yta, Betz gräns och årets timmar

$$\text{enligt: } E = \frac{\bar{P}_{kin}}{A} \cdot A \cdot C_{P_{max}} \cdot 8760 \text{ h/år} \approx 332 \cdot (\pi \cdot 20^2) \cdot \frac{16}{27} \cdot 8760 \approx 2164 \text{ MWh/år}$$

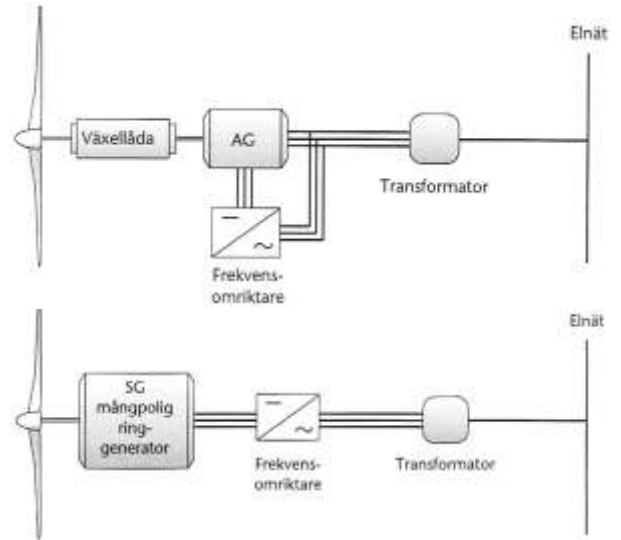
Svar: Vi kan maximalt utvinna 2,2 GWh/år med en ideal turbin på 50 m höjd

30. Enercon, mångpolig synkrongenerator:

- + Ingen växellåda
- tung generator
- stor växelriktare

Vestas, släpningad asynkrongenerator.

- + mindre generator (pga högt varvtal samt att både rotor och stator levererar effekt)
- + liten växelriktare
- växellådan



31. Fundament, torn, maskinhus, turbin, huvudaxel, huvudlager, växellåda, broms, generator, transformator, vindriktningsgivare, vindhastighetsgivare, styrsystem, girmotorer. Se F1 sidan 10-11.

32. Vid låga löptal begränsas effektuttaget på grund av vakrotation, luften som lämnar turbinen har rotationsenergi. Vid högre löptal ökar varvtalet medan vridmomentet minskar ($P=\Omega Q$). Det minskade vridmomentet ger lägre rotationsenergi hos luften – effektiviteten ökar. Vid onödigt stora löptal minskar effektiviteten på grund av att luftmotståndet spelar en större roll (F3 sid 3, 9)

33. De akustiska effekterna summeras:

$$P_{total} = P_{blad} + P_{växel} + P_{gen} = 10^{\frac{99,2}{10}-12} + 10^{\frac{97,4}{10}-12} + 10^{\frac{87,4}{10}-12}$$

$$P_{total} \approx 0,0083 + 0,0055 + 0,0005 = 0,0143 \text{ W}$$

För att beräkna totalen i dB(A):

$$P_{total} = 10^{\frac{L_w}{10}-12} \text{ ger } L_w = 10(12 + \log P_{total}) \approx 101,5 \text{ dB(A)}$$

34. Andelsägt vindkraftverk

$$\text{Andelspriset blir } \frac{\text{Investering}}{\text{Antal andelar}} = \frac{10400000}{2000} = 5200 \text{ kr/andel (ej momspliktigt)}$$

$$\text{Annuitetsfaktorn: } a = \frac{r}{1 - (1 + r)^{-n}} = \frac{0,05}{1 - 1,05^{-20}} \approx 0,08 = 8\%$$

$$\text{Årlig kapitalkostnad: } K_{\dot{a}} = a \cdot K_i \approx 0,08 \cdot 5200 = 416 \text{ kr/andel / år}$$

$$\text{Driftskostnad inklusive moms: } \frac{\text{Driftskostnad}}{\text{Antal andelar}} \cdot 1,25 = \frac{200000}{2000} \cdot 1,25 \approx 125 \text{ kr/andel / år}$$

$$\text{Intäkter: } 1000 \text{ kWh/år} \cdot 1,10 \text{ kr/kWh} = 1100 \text{ kr/andel / år}$$

$$\text{Årlig vinst: } V_{\dot{a}} = I_{\dot{a}} - K_{\dot{a}} - D_{\dot{a}} = 1100 - 416 - 125 = 559 \text{ kr/andel / år}$$

35. Nytt eller begagnat?

Begagnat:

$$\text{Investeringskostnad: } K_{iE40} = 900\,000 + 1\,600\,000 = 2\,500\,000 \text{ kr}$$

$$\text{Annuitetsfaktor: } a_{10} = \frac{r}{1 - (1+r)^{-n}} = \frac{0,045}{1 - 1,045^{-10}} \approx 0,1264$$

$$\text{Årlig kapitalkostnad: } K_{\dot{a}E40} = a_{10} K_{iE40} \approx 0,1264 \cdot 2\,500\,000 \approx 315\,947 \text{ kr/år}$$

$$\text{Specifik produktionskostnad: } \frac{K_{\dot{a}E40} + D_{\dot{a}}}{W_{E40}} = \frac{315\,947 + 100\,000}{1\,000\,000} \approx 0,416 \text{ kr/kWh}$$

Nytt verk:

$$\text{Investeringskostnad: } K_{iE48} = 7\,500\,000 + 1\,600\,000 = 9\,100\,000 \text{ kr}$$

$$\text{Annuitetsfaktor: } a_{20} = \frac{r}{1 - (1+r)^{-n}} = \frac{0,045}{1 - 1,045^{-20}} \approx 0,07688$$

$$\text{Årlig kapitalkostnad: } K_{\dot{a}E48} = a_{20} K_{iE48} \approx 0,07688 \cdot 9\,100\,000 \approx 699\,573 \text{ kr/år}$$

$$\text{Specifik produktionskostnad: } \frac{K_{\dot{a}E48} + D_{\dot{a}}}{W_{E48}} = \frac{699\,573 + 100\,000}{1\,900\,000} \approx 0,421 \text{ kr/kWh}$$

Svar: Elenergin från nya verket kostar 42,1 öre/kWh medan det begagnade verkets energi kostar 41,6 öre/kWh att producera. Trots att det nya verket är mycket dyrare blir ändå elenergin i stort sett lika dyr, det beror på att både årlig produktion och kvarvarande livslängd är högre för det nya verket.

36. På en plats är medelvinden 6,4 m/s och formfaktorn 2. Beräkna karaktäristiska vindhastigheten samt hur många timmar per år det blåser mer än 14 m/s.

Lösningsförslag:

Vindhastigheten antas vara Weibullfördelad. För att kunna använda weibullfördelningen måste vi bestämma dess karaktäristiska vindhastighet, c . Det kan vi få via:

$$\bar{v} = c \cdot \Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right) \quad \text{tillsammans med gammafunktionens egenskaper}$$

$$\Gamma(0,5) = \sqrt{\pi} \quad \text{och} \quad \Gamma(m+1) = m\Gamma(m) \quad \text{kan vi beräkna } c \text{ enligt:}$$

$$c = \frac{\bar{v}}{\Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right)} = \frac{6,4}{\Gamma\left(1 + \frac{1}{2}\right)} = \frac{6,4}{\Gamma(1,5)} = \frac{6,4}{0,5 \cdot \Gamma(0,5)} = \frac{6,4}{0,5 \cdot \sqrt{\pi}} \approx 7,22 \text{ m/s}$$

Vi kan beräkna antalet timmar per år det blåser mer än 14 m/s med hjälp av

$$n = 8760 \cdot p_{Wei}(14 < v < \infty) = 8760 \cdot e^{-\left(\frac{14}{c}\right)^k} - 8760 \cdot e^{-\left(\frac{\infty}{c}\right)^k} = 8760 \cdot e^{-\left(\frac{14}{7,22}\right)^2} \approx 204 \text{ h/år}$$

Svar: Karaktäristiska vindhastigheten på platsen är 7,2 m/s och det blåser mer än 14 m/s i cirka 200 h/år.

37. Glosor

- a) **Fullastimmar:** Årsproduktion delat med märkeffekt. Normalt ca 2000 h
- b) **Kapacitetsfaktor:** Verkets medeleffekt i förhållande till märkeffekt. Normalt ca 25%
- c) **Soliditet:** Bladens andel av totala svepta ytan. Ca 3%

38. Styrsystemets funktioner:

Styrning: In/urkoppling, girning mm

Driftövervakning: Stoppar och slår larm vid varmgång, igensnöad vindmätare, mm

Driftuppföljning: Samlar in data som skickas till ägare och tillverkare.

39. Vindkraftverkets delar

5: **Huvudlager.** Håller huvudaxeln på plats.

6: **Huvudaxel.** Överför mekanisk energi till växellådan.

8: **Växellåda.** Ökar varvtalet från huvudaxelns låga varvantal till ett varvantal lämpligt för generatoren.

12: **Generator.** Omvandlar mekanisk energi till elektrisk.

13: **Vindmätare.** Mäter vindhastighet och vindriktning.

14: **Girmotor.** Har till uppgift att vrida maskinhuset mot vinden.

40. Nuvärdet av vindkraftverket

Lösningförslag:

För drift och underhåll samt elförsäljning beräknar vi kapitaliseringsfaktorn för 15 år och 8% enligt

$$f_{k,15} = \frac{1 - (1 + r)^{-n}}{r} = \frac{1 - 1,08^{-15}}{0,08} \approx 8,56$$

Så nuvärdet av elförsäljningen samt drift och underhållskostnaden beräknas till:

$$I_N \approx 8,56 \cdot 450 \cdot 5500 \approx 21,2 \text{ Mkr}$$

$$D_N \approx 8,56 \cdot 140 \cdot 5500 \approx 6,6 \text{ Mkr}$$

Nuvärdet av elcertifikaten beräknas med en kapitaliseringsfaktor för 10 år och 8% enligt:

$$f_{k,10} = \frac{1 - (1 + r)^{-n}}{r} = \frac{1 - 1,08^{-10}}{0,08} \approx 6,71$$

Så nuvärdet av elcertifikaten blir:

$$C_N \approx 6,71 \cdot 300 \cdot 5500 \approx 11,1 \text{ Mkr}$$

Nuvärdet av vindkraftverket kan då uppskattas enligt:

$$V_N = I_N + C_N - D_N \approx 21,2 + 11,1 - 6,6 = 25,7 \text{ Mkr}$$

Svar: Med de givna förutsättningarna blir nuvärdet av vindkraftverket 26 Mkr.