



**Horisontella eller vertikala vindkraftverk?  
Delrapport**

**20 maj 2024**

**Nilo Javani och Josefin Landgren**

## Innehåll

<b>1 Inledning</b>	<b>2</b>
1.1 Frågeställning . . . . .	2
<b>2 Vindförhållanden, Mälsta gård</b>	<b>2</b>
<b>3 Vindkraftverk</b>	<b>2</b>
3.1 Horisontella vindkraftverk . . . . .	3
3.2 Vertikala vindkraftverk . . . . .	3
3.3 Val av turbin . . . . .	4
<b>4 Liknande projekt</b>	<b>5</b>
<b>5 Metod</b>	<b>5</b>
5.1 Insamling av data och simulering . . . . .	5
<b>6 Resultat</b>	<b>7</b>
<b>7 Diskussion och slutsats</b>	<b>8</b>
<b>A Kod</b>	<b>9</b>

## 1 Inledning

Målet med att implementera vindkraftverk på Mälsta gård är att generera en betydande del av den årliga energiproduktionen för att täcka gårdsbehovet och möjliggöra en självförsörjande drift. För att kvantifiera den förväntade energiproduktionen från vindkraftverken behöver vi utveckla en modell som kan simulera denna produktion.

### 1.1 Frågeställning

Vilken typ av småskalig vindkraft är fördelaktigast att installera vid privat bruk?

## 2 Vindförhållanden, Mälsta gård

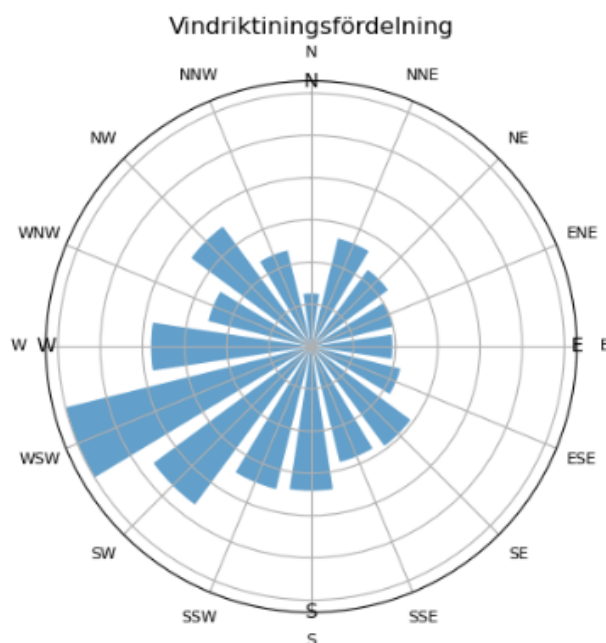


Figur 1 – Flygbild av Mälsta gård

Figur 1 visar att Mälsta gård är helt omgiven av skogspartier. Skog kan bidra till ökad vindturbulens och lägre vindhastigheter i området. I figur 2 presenteras översiktligt hur vindens riktning var fördelad under år 2018.

## 3 Vindkraftverk

Till kategorin småskalig vindkraft räknas generellt turbiner med effekt upp till 100 kW. I Sverige kan dessa byggas utan bygglov då deras höjd inte överstiger 20 meter och rotordiametern är max 3 meter (Eriksson och Glans 2020). Småskaliga vindkraftverk delas in i två huvudgrupper beroende på i



Figur 2 – Fördelning av vindriktning vid Mälsta gård år 2018

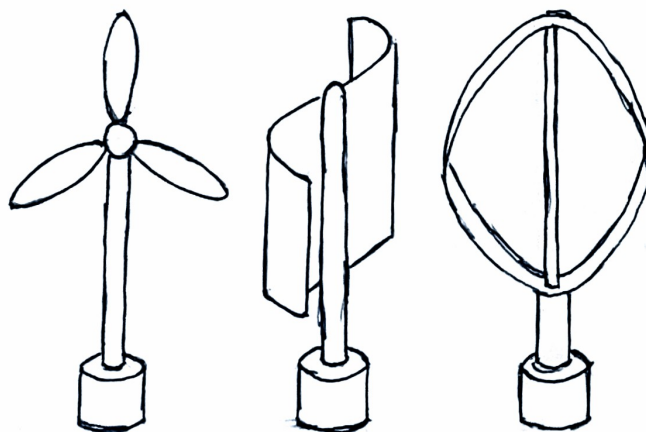
vilket led turbinen roterar; horisontella och vertikala.

### 3.1 Horisontella vindkraftverk

Den horisontella turbinen utgår från samma design som för de storskaliga, klassiska kraftverken och visas längst till vänster i figur 3. Turbinen består av aerodynamiskt designade blad, oftast tre men det kan även vara fler, som roterar i horisontellt led. Dessa opererar med en så kallad yaw-mekanism. Yaw- mekanismen gör det möjligt för turbinen att alltid anpassas efter vindens riktning, för att på så sätt kunna utvinna så mycket energi som möjligt. Yaw- mekanismen är viktig då de horisontella verken är beroende av att vindriktningen är vinkelrät mot turbinen (Wang m. fl. 2023).

### 3.2 Vertikala vindkraftverk

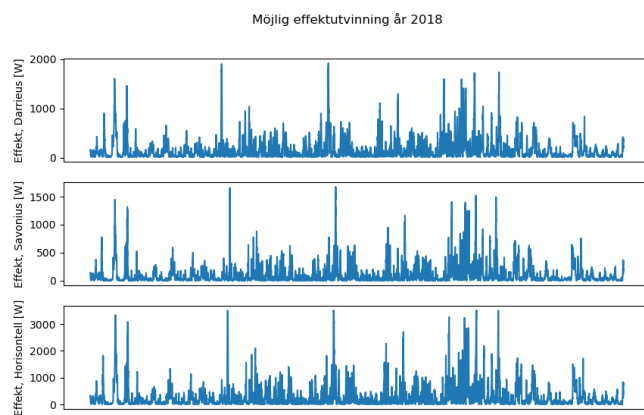
De vertikala turbinerna har ett antal blad som roterar i vertikalt led. Beroende på hur dessa blad är designade delas de vertikala turbinerna in i ytterligare underkategorier, de vanligaste kallas Savonius och Darrieus. De vertikala turbinerna är inte beroende av vilken riktning vinden är i, och är därför mindre känsliga mot turbulens än de horisontella (ibid.).



Figur 3 – Från vänster till höger: förenklad bild av horisontell-, Savonius- och Darrieusturbin.

Figur 3 visar varianter av Darrieus- och Savonius-turbiner. Darrieusturbinen har generellt en högre verkningsgrad än Savonius, men saknar även, till skillnad från Savonius, en självstartmekanism. De vertikala turbinerna har ofta en lägre ljudnivå vid drift. Savonius-turbiner har även i många fall en lägre produktionskostnad då bladen på dessa har en relativt enkel utformning. De vertikala verken kan ofta vara enklare att underhålla än de horisontella, då generatoren på dessa kan placeras under turbinen.

### 3.3 Val av turbin



Figur 4 – Uppskattning av effektutvinning från de olika turbinerna under ett år.

För detta arbete jämfördes den horisontella turbinen Windstar 3000 och den vertikala turbinen Aeolos V-3000 för simuleringarna. I figur 4 presenteras årlig effektutvinning för de tre vanligaste turbinvarianterna, där värde för effektkoefficienterna uppskattades utifrån artikeln *A review on small scale wind turbines* (Tummala m. fl. 2016). Med detta kunde Savonius-turbinen uteslutas då effektproduktionen för denna var betydligt lägre än de övriga, vilket framgår i figur 4.

Tabell 1 – Parametrar för två olika vindturbiner

Namn	Märkeffekt [W]	Sveparea [m <sup>2</sup> ]	Startvind [m/s]	Stoppvind [m/s]	Kostnad [kr]
Windstar 3000	3000	7,1	2,5	50	67900
Aeolos V-3000	3000	10,1	2,5	52	58173

I tabell 1 visas olika värden givna för ett horisontellt och ett vertikalt vindkraftverk. Datan är given av respektive företag, Windforce (u.å.) för Windstar 3000 och Lotus Energy (2024) för Aeolos- V3000. Den angivna kostnaden inkluderar enbart själva kraftverken, exklusive montering och de komponenter som krävs för att koppla upp det mot elnätet.

## 4 Liknande projekt

Ett projekt liknande detta utfördes vid ett bostadshus i Sverige som ett examensarbete vid Mittuniversitet (Lenner u.å.). De kom i denna undersökning fram till att installation av småskalig vindkraft inte var tillräckligt effektiv för att kunna ses som en ekonomiskt försvarbar lösning då återbetalningstiden blev väldigt lång. Det skulle i sådana fall behövas göras ur ett miljöperspektiv.

## 5 Metod

### 5.1 Insamling av data och simulering

Vindhastigheten är en nyckelvariabel vid modellering av energiproduktionen från vindkraftverk. Genom att analysera historiska vinddata kan en modell skapas för att förutsäga den förväntade energiproduktionen vid olika vindhastigheter under olika tider på året.

New European Wind Atlas (NEWA) är en europeisk vindatlas som tillhandahåller vinddata för EU-länderna, inklusive Sverige. Data från NEWA för vindhastigheter på 10 meters höjd mellan åren 2005 och 2018 kan laddas

ned som CSV-filer och behandlas i simuleringsprogrammet Python.

Med denna historiska vinddata kan ett medelvärde för vindhastigheten per timme under ett dygn skapas, vilket i sin tur används för att utveckla en modell för energiproduktionen från vindkraftverken. Resultaten från modellen ger insikter om antalet vindkraftverk som behövs, möjligheten att lagra överskott av energi, samt behovet av att komplettera systemet med andra energikällor för att uppnå gårdens energimål.

För att få en uppfattning om hur mycket energi vindkraftverket skulle kunna producera under ett år gjordes det en simulering i Python. Producerad effekt kan beräknas enligt följande formel, vilken baseras på Betz's ekvation, 3. (Ragheb 2021)

$$P_{ut} = C_p A \rho v^3 \frac{1}{2} \quad (1)$$

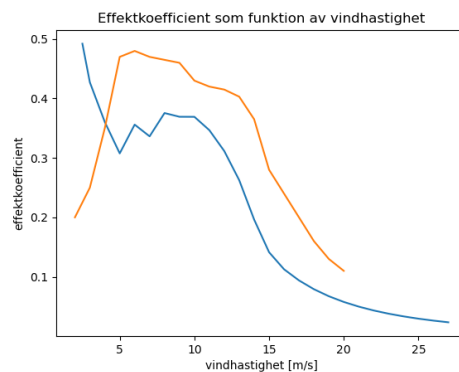
Där  $C_p$  är turbinens effektkoefficient, är luftdensiteten och  $v$  är lyfthastigheten. Effektkoefficienten kan bestämmas enligt följande

$$C_p = \frac{P_{ut}}{P_{in}} \quad (2)$$

$P_{ut}$  är här den faktiska effekt som turbinen producerar, medan  $P_{in}$  bestäms enligt följande

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

På hemsidan för Windstar 3000 finns ett diagram där effektkoefficienten för olika vindhastigheter kan avläsas, vilket visas i figur 5. För Aeolos fanns det diagram över effekter för olika vindhastigheter, vilket kunde användas för att beräkna motsvarande effektkoefficienten med genom att utnyttja ekvation 2 och 3. Detta kunde tillsammans med värden från tabell 1 och genom att utgå från ekvation 1 sättas ihop till en kod för energiproduktion för respektive turbin, se appendix A.



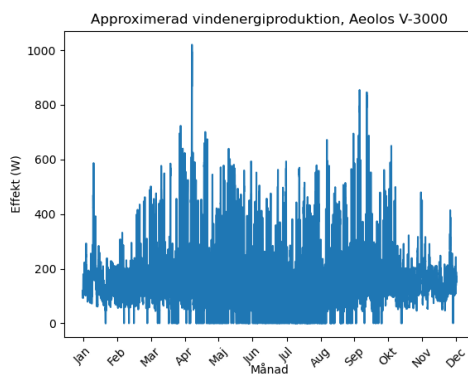
Figur 5 – Effektkoefficient som funktion av olika vindhastigheter för vindkraftverket Windstar 3000, orange linje, och Aeolos-V3000, blå linje.

För att modellera energiproduktionen från vindkraftverk krävs en djupgående förståelse för de parametrar som påverkar produktionen, samt en omfattande datainsamling.

En av de mest avgörande faktorerna för energiproduktionen är vindhastigheten. Optimalt sätt, för maximal energiproduktion, bör vindhastigheten ligga runt 12 m/s. Dessutom påverkar höjden på vindkraftverken produktionen; ju högre upp i atmosfären ett vindkraftverk befinner sig, desto mindre påverkas det av markens friktion och hinder, vilket resulterar i högre vindhastigheter.

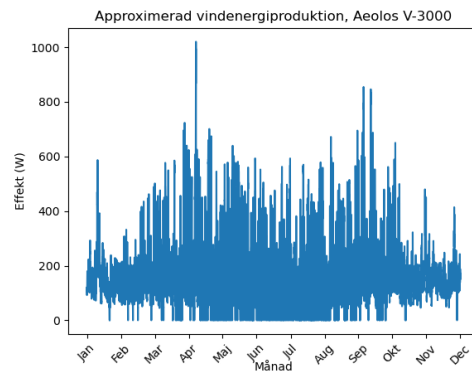
## 6 Resultat

I figur 6 presenteras den effekt som Aeolos-V3000 skulle kunnat utvinna för den använda vinddata, och figur 7 effekt för Windstar 3000 under samma tidsperiod. Den totala energiproduktionen för Windstar under året kunde beräknas till 1158 kWh, och för Aeolos till 1398 kWh.



Figur 6 – Uppskattning av effektutvinning från Aeolos-V3000 under ett år.





Figur 7 – Uppskattning av effektutvinning från Windstar 3000 under ett år.

## 7 Diskussion och slutsats

Den slutsats som kan dras är att de låga vindhastigheterna vid Mälsta gård gör att vindkraftverkets effektutvinning blir väldigt låg. Detta i sin tur leder till en lång återbetalningstid av kraftverket om man ser ur ett ekonomiskt perspektiv. Om man däremot främst är intresserad av möjligheten att gå off-grid är vindkraft ett mindre säsongsberoende alternativ, och därför ett lovande komplement till ett förnybart system. I detta fall är den vertikala turbinen den variant som vid Mälsta gårds förhållanden har högst effektutvinning.

## Referenser

- Eriksson, J. och J. Glans (2020). *Småskalig vindkraft : En förstudie åt Air-Son Engineering AB*. Hämtad 2024-04-18. URL: <https://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:hh:di-va-42114>.
- Lotus Energy, Technology (2024). *Konversation om produktionsdata för Aeolos V-3000 [e-post]*. Personlig kommunikation 19 april 2024.
- Ragheb, M. (2021). *Wind energy conversion theory, Betz's equation*. Hämtad 2024-05-10. URL: <http://ragheb.co/NPRE%20475%20Wind%20Power%20Systems/Wind%20Energy%20Conversion%20Theory%20Betz%20Equation.pdf>.
- Tummala, Anusha m. fl. (2016). "A review on small scale wind turbines". I: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 56, s. 1351–1371. DOI: 10.1016/j.rser.2015.12.027. URL: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.027>.
- Wang, Hao m. fl. (2023). "Small wind turbines and their potential for internet of things applications". I: *iScience* 26.9, s. 107674. DOI: 10.1016/j.isci.2023.107674. URL: <https://doi.org/10.1016/j.isci.2023.107674>.
- Windforce (u.å.). *Windstar 3000*. Hämtad 2024-04-18. URL: <https://www.windforce.se/vindkraft-windstar3000.php>.

## A Kod

```
1 import pandas as pd
2 import numpy as np
3 import matplotlib.pyplot as plt
4
5
6 #Data fr Aeolos V3000
7 aeolos_A = 3.6*2.8 #m^2
8 #Givna effektvrden fr olika vindhastigheter:
9 aeolos_wind = {2.5: 50, 3: 75, 4: 150, 5: 250, 6: 500, 7: 750, 8: 1250,
10                9: 1750, 10: 2400, 11: 3000, 12: 3500, 13: 3750, 14: 3750,
11                14: 3500, 15: 3100, 16: 3000, 17: 3000, 18: 3000, 19: 3000,
12                20: 3000, 21: 3000, 22: 3000, 23: 3000, 24: 3000, 25: 3000,
13                26: 3000, 27: 3000} #m/s: W
14
15 #Funktion fr berkning av effektkoefficienter
16 def efficiency(wind, area):
17     max_P = [0.5 * 1.29 * area * i**3 for i in wind.keys()]
18     C_p = [i/x for i, x in zip(wind.values(), max_P)]
19     C_p = dict(zip(wind.keys(), C_p))
20     return C_p
21 #Effektkoefficient, Aeolos V3000
22 aeolos_C = efficiency(aeolos_wind, aeolos_A)
```

```
23 aeol os_start = 2.5 # m/s
24 aeol os_stop = 52 # m/s
25
26
27 #Data, Windstar 3000:
28 #Givna effektkoefficienter fr olika vindhastigheter:
29 wind_C = dict({2:0.2, 3:0.25, 4:0.35, 5:0.47, 6:0.48, 7:0.47,
30               8:0.465,
31               9:0.46, 10:0.43, 11:0.42, 12:0.415, 13:0.403,
32               14:0.365, 15:0.28, 16:0.24, 17:0.2, 18:0.16,
33               19:0.13, 20:0.11}) #m/s: C
34
35 area = 1.5**2*np.pi #m^2
36 star_start = 2.5 # m/s
37 star_stop = 50 # m/s
38
39 #Plottar graf ver effektkoefficient fr respektive turbin.
40 plt.subplots()
41 plt.plot(aeol os_C.keys(), aeol os_C.values())
42 plt.xlabel('vindhastighet [m/s]')
43 plt.ylabel('effektkoefficient')
44 plt.title('Effektkoefficient som funktion av vindhastighet')
45 plt.plot(wind_C.keys(), wind_C.values())
46 plt.xlabel('vindhastighet [m/s]')
47 plt.ylabel('effektkoefficient')
48 plt.title('Effektkoefficient som funktion av vindhastighet')
49 plt.savefig('coeff.png')
50 plt.show()
51
52 #Data fr Mlsta grd
53 h = 28 # Knivstas m. h + 10 m fr snurra
54 R = 287.05 #Gaskonstant fr torr luft (J/(kgK))
55
56 #Funktion fr berkning av energiproduktion
57 def energyproduction(wind_date, temp_date, start, stop, area, wind_C
58                     , max):
59     windavg_data = pd.read_excel("average_wind_speeds (1).xlsx")
60     wind_data = pd.read_excel("WindData10below.xlsx")
61     wind_dict = dict(zip(windavg_data['Month-Day-Time'],
62                         windavg_data['Average Wind Speed (m/s)']))
63     wind_temp = dict(zip(wind_data['Date'],
64                        wind_data['Temperature at 2m [K]']))
65
66     #Lufttryck
67     idx_ = list(wind_temp.keys()).index(temp_date)
68     wind_temps = list(wind_temp.values())[idx_:]
69     P = [101325 * np.exp(-9.81 * 0.0289644 * h / (8.31432 * temp))
70          for temp in wind_temps]
```

```
69 #Luftdensitet
70 ro = [pressure / (R * temp) for pressure, temp in zip(P,
    wind_temps)]
71 indx = list(wind_dict.keys()).index(wind_date)
72 wind_speeds = list(wind_dict.values())[indx:]
73
74 #Vindhastigheter inom stopp & startgrnser
75 acc_wind = []
76 for speed in wind_speeds:
77     if start <= speed <= stop:
78         acc_wind.append(speed)
79     else:
80         acc_wind.append(0)
81
82 #Effekt fr olika vindhastigheter
83 kWh = [min(max, 0.5*0.5 * ro_val * area * wind_C.get(round(speed
    ), 0) * speed ** 3)
    for speed, ro_val in zip(acc_wind, ro)]
84
85 P = [min(max, 0.5 * ro_val * area * wind_C.get(round(speed), 0)
    * speed ** 3)
    for speed, ro_val in zip(acc_wind, ro)]
86
87
88 #Motsvarande tider
89 dates = list(wind_dict.keys())[indx:]
90 dates = [date for date, speed in zip(dates, wind_speeds)]
91
92 #Lexikon
93 power_date = dict(zip(dates, P))
94 energy_date = dict(zip(dates, kWh))
95
96 return power_date, energy_date
97
98
99 #Effekt frn Windstar 3000
100 starP, starE = energyproduction('1-1-00:00', '2018-1-1-00:00',
101     star_start, star_stop, area, wind_C,
102     3500)
103
104 #Effekt frn Aeolos V3000
105 verticalP, verticalE = energyproduction('1-1-00:00', '2018-1-1-00:00',
106     ' ',
107     aeolos_start, aeolos_stop,
108     aeolos_A, aeolos_C, 3800)
109
110 #Konvertera lexikon till excelblad
111 star_df = pd.DataFrame(list(starE.items()), columns=['Date', 'Power
    Output (Wh)'])
112 vertical_df = pd.DataFrame(list(verticalE.items()), columns=['Date',
    'Power Output (Wh)'])
```

```
110
111 with pd.ExcelWriter('energy_production.xlsx') as writer:
112     star_df.to_excel(writer, sheet_name='Windstar_3000', index=False
113         )
114     vertical_df.to_excel(writer, sheet_name='Aeolos_V-3000', index=
115         False)
116
117 #Total energiproduktion
118 power_output = sum(list(starE.values()))/1000 #kWh
119 print(f'Total rlig energiproduktion fr Windstar r: {power_output}
120     kWh. ')
121
122 H_power_output = sum(list(verticalE.values()))/1000 #kWh
123 print(f'Total rlig energiproduktion fr Aeolos r: {H_power_output}
124     kWh. ')
125
126 #Plot av Windstar 3000
127 plt.figure(2)
128
129 plt.plot(list(starP.keys()), list(starP.values()), '-')
130 plt.xlabel('Mnad', labelpad=-4)
131 plt.ylabel('Effekt (W)')
132 plt.title('Approximerad vindenergi produktion, Windstar 3000')
133 num_ticks = 12
134 x_ticks = np.linspace(0, len(list(starP.keys())), num_ticks, dtype=
135     int)
136 custom_labels = ['Jan', 'Feb', 'Mar', 'Apr', 'Maj', 'Jun',
137     'Jul', 'Aug', 'Sep', 'Okt', 'Nov', 'Dec']
138 # Set the x-axis ticks with custom labels and rotate them
139 plt.xticks(x_ticks, custom_labels, rotation=45)
140 plt.show()
141
142 #Plot av Aeolos
143 plt.figure(3)
144
145 plt.plot(list(verticalP.keys()), list(verticalP.values()), '-')
146 plt.xlabel('Mnad', labelpad=-4)
147 plt.ylabel('Effekt (W)')
148 plt.title('Approximerad vindenergi produktion, Aeolos V-3000')
149 num_ticks = 12
150 x_ticks = np.linspace(0, len(list(verticalP.keys())), num_ticks,
151     dtype=int)
152 custom_labels = ['Jan', 'Feb', 'Mar', 'Apr', 'Maj', 'Jun',
153     'Jul', 'Aug', 'Sep', 'Okt', 'Nov', 'Dec']
154 # Set the x-axis ticks with custom labels and rotate them
155 plt.xticks(x_ticks, custom_labels, rotation=45)
156 plt.show()
```