



Vindkraft

Beräkningsuppgift (ca 60 min)

Uppgiftsbeskrivning

Om du jämför korten som handlar om elbilar och dieslbilar så framstår elbilar som mer klimatsmarta. Det beror dock på hur elen som elbilarna drivs med tillverkas. Siffrorna på korten i Klimatkoll bygger på utsläpp från svensk elmix som kommer bland annat från vattenkraft, kärnkraft, vindkraft och naturgas (fossilgas).

Den här uppgiften går ut på att undersöka hur vindkraft fungerar och vad som skulle krävas för att ersätta Sveriges kärnkraft med vindkraft.

Betz lag är en grundläggande princip inom vindkraftsteknik enligt vilken den teoretiskt maximala effekt som kan utvinnas i en vindturbin $16/27$ (eller ca 59%) av energin i den luft som passerar genom vindturbinen:

$$P = \frac{16}{27} \cdot \frac{\rho \cdot \pi \cdot r^2 \cdot v^3}{2}$$

P är den maximala effekt [i W] som kan utvinnas av vindkraftverket, ρ [rho; kg/m³] är luftens densitet, r [m] är vindrotorns radie (dvs. rotorbladens längd) och v [m/s] är vindhastigheten på rotorns höjd.

Vindhastigheten, v , varierar på olika höjder över marken. Det värde som anges i väderprognoser avser ofta vindhastigheten på 10 meters höjd, men vindkraftverken är mycket högre än så. Ett ungefärligt värde för vinden på en höjd av h meter över marken ges av förhållandet:

$$v = v(h) = v(10) \cdot \left(\frac{h}{10}\right)^{0,16}$$

där $v(10)$ är vindhastigheten 10 meter över marknivån.

- Använd enhetsanalys för att kontrollera att vänster och höger led av Betz lag har samma enheter.
- Beräkna vindhastigheten på 50 meters höjd med hjälp av formeln ovan. Antag att $v(10) = 15$, vilket innebär att vindhastigheten på 10 meters höjd är 15 m/s.
- Beräkna den maximala teoretiska effekten hos en vindturbin. Hitta de värden som behövs för beräkningen eller gör rimliga antaganden. Du kan välja om du vill beräkna effekten för en liten, medelstor eller stor vindturbin. Se till att uttrycka resultatet i rätt enhet!

- d) Uppskatta hur många vindkraftverk som behövs för att ersätta ett kärnkraftverk. Leta själv reda på de värden som krävs för beräkningen eller gör rimliga antaganden.
- e) Ett typiskt medelstort vindkraftverk genererar cirka 5,1 GWh per år. Hur skiljer sig detta värde från det som du beräknade i c)? Fundera över möjliga orsaker till eventuella skillnader och beräkna hur många vindkraftverk som skulle behövas för att ersätta ett kärnkraftverk om alla vindkraftverk producerade 5,1 GWh per år.
- f) Användningen av kärnkraft har länge varit en kontroversiell fråga. Reflektera själv och försök att besvara följande frågor så utförligt som möjligt: Vilka är för- och nackdelarna med kärnkraft och vindkraft? Varför är det en utmaning att helt ersätta kärnkraft med vindkraft?

Lösningförslag

a) Enhetsanalys av variablerna i Betz lag:

- P står för effekt, som mäts i watt (W).
- ρ står för luftdensitet, som mäts i kilogram per kubikmeter (kg/m^3).
- r står för radie, som mäts i meter (m). Radien är avståndet från centrum av vindkraftverkets rotor till rotorbladets kant.
- v står för vindhastighet, som mäts i meter per sekund (m/s).

Den vänstra sidan av Betz lag har enheten W (Watt). Den högra sidan av Betz lag har enheten J/s (joule per sekund), vilket visas på följande sätt:

$$\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot \text{m}^2 \cdot \left(\frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^3 = \frac{\text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{m}^3}{\text{m}^3 \cdot \text{s}^3} = \frac{\text{kg} \cdot \text{m}^2}{\text{s}^3} = \frac{\text{J}}{\text{s}}$$

Detta följer av att Joule är en s.k. härledd SI-enhet, som också kan uttryckas som: $\text{J} = \text{m}^2 \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2}$. Vänster och höger led har alltså samma enhet, eftersom $W = \text{J}/\text{s}$.

b)
$$v(50) = 15 \cdot \left(\frac{50}{10}\right)^{0,16} \approx 19,4 \text{ m/s}$$

Beräkningen visar att vindhastigheten på 50 meters höjd är drygt 19 m/s när det blåser 15 m/s på 10 meters höjd.

c) Medelstora vindkraftverk för kommersiellt bruk har vanligen rotorblad med en radie på mellan 20 och 60 meter. De mest kraftfulla vindkraftverken som används i större vindkraftsparker kan ha rotorblad med en radie på över 100 meter. Låt oss anta att denna vindturbin har en höjd (h) på 150 meter, en radie (r) på 50 meter och att $v(10)=15 \text{ m/s}$.

Först beräknas vindhastigheterna på 150 meters höjd:

$$v(150) = 15 \cdot \left(\frac{150}{10}\right)^{0,16} \approx 23,1 \text{ m/s}$$

Därefter beräknas den teoretiskt maximala effekten med hjälp av Betz lag. Luftens densitet är cirka $1,2 \text{ kg/m}^3$.

$$P = \frac{16}{27} \cdot \frac{1,2 \cdot \pi \cdot 50^2 \cdot 23,1^3}{2} \approx 34,4 \text{ MW}$$

d) Energiproduktionen från ett kärnkraftverk beror på flera faktorer, bland annat reaktortyp, kapacitet, drifttid och verkningsgrad. Här antar vi att ett kärnkraftverk producerar 7 TWh per år (motsvarande 7000 GWh per år), vilket är ett typiskt värde för ett större kärnkraftverk.

Den teoretiskt maximala elproduktionen (E) för ett vindkraftverk under ett år beräknas genom att multiplicera den teoretiskt maximala effekten (P) med tiden (t) i timmar per år:

$$E = P \cdot t = 34,4 \text{ MW} \cdot 24 \text{ timmar/dag} \cdot 365 \text{ dagar/år} \approx 301 \text{ GWh/år}$$

Därefter beräknas det antal vindkraftverk som krävs för att ersätta ett kärnkraftverk:

$$\text{Antal vindkraftverk} = \frac{7\,000 \text{ GWh/år}}{301 \text{ GWh/år}} \approx 23$$

Beräkningen visar att det behövs 23 vindkraftverk för att ersätta ett kärnkraftverk som producerar 7 TWh per år.

e) Det beräknade värdet (301 GWh/år) är betydligt större än medelvärdet för en riktig vindturbin (5,1 GWh/år). Detta beror dels på att vinden inte alltid blåser med den hastighet som krävs för att nå maximal verkningsgrad, dels på att vi har försummat alla friktionsförluster.

Antalet vindkraftverk som behövs för att ersätta ett kärnkraftverk om alla vindkraftverk producerar 5,1 GWh per år beräknas på följande sätt:

$$\text{Antal vindkraftverk} = \frac{7\,000 \text{ GWh/year}}{5,1 \text{ GWh/year}} \approx 1372$$

f) Kärnkraft och vindkraft har var och en sina för- och nackdelar. Vindkraft ger ren energi, men produktionen varierar beroende på vindförhållandena, vilket innebär utmaningar för en jämn energiförsörjning. Omedelbar användning eller lagring är avgörande för att matcha efterfrågan och undvika omvandlingsförluster. Kärnkraft är i många avseenden miljövänlig men dyr att bygga och medför problem med säkerhet och avfallshantering.

Att helt ersätta kärnkraft med vindkraft är en utmaning. Vindkraftens variabilitet kräver kompletterande energikällor, som vattenkraft, för att skapa stabilitet. Vindkraftens inneboende oförutsägbarhet komplicerar hanteringen av elnätet. Kärnkraft ger en stabil och kontinuerlig energiförsörjning. Övergången kräver uppgraderingar av infrastrukturen och investeringar i energilagringsteknik.

Förväntade lärandemål

Eleverna får förståelse för vindkraftsteknik, tillämpar enhetsanalys för att analysera fysiska samband såsom Betz lag, omvandlar enheter och beräknar vindhastighetsvariationer med höjd. Dessa resultat är avsedda att fördjupa deras förståelse för vindkraft och dess praktiska

fysikaliska tillämpningar. Tanken med den sista frågan är att ge eleverna en öppen uppgift där de kan argumentera utifrån sina beräkningar och andra relevanta fakta.

För att göra uppgiften enklare kan du som lärare välja att förse eleverna med alla värden de behöver för beräkningarna.

Koppling till ämnes-/kursplan

Fysik 1, gymnasiet

Koppling till centralt innehåll (Skolverket, 2019)

- Ställningstaganden i samhällsfrågor utifrån fysikaliska förklaringsmodeller, till exempel frågor om hållbar utveckling.
- Utvärdering av resultat och slutsatser genom analys av [...] felkällor.

Koppling till kunskapskraven (Skolverket, 2019)

- Eleven diskuterar frågor som rör fysikens betydelse för individ och samhälle.
- Vidare tolkar eleven sina resultat, utvärderar sina metoder och motiverar sina slutsatser.
- Eleven [...] analyserar och löser problem.
- Eleven värderar också modellens giltighet och begränsningar.