

## Inlämningsuppgift 3: Hållbara energi- och transportsystem – Grupp 3

### Vindkraft

**INTRODUKTION:** Världen står inför enorma utmaningar när det gäller klimatförändringarna och energisäkerhet till följd av ökande efterfrågan och sinande oljereserver. I den här uppgiften ska ni fördjupa er i en koldioxidneutral energikälla genom att göra beräkningar och diskutera kring olika aspekter. De tekniker som respektive smågrupp kommer att fördjupa sig i för den här uppgiften är vindturbiner, solceller, bioenergi och kärnkraft.

Uppgiften syftar till att bidra till följande lärandemål för kursen:

- Att kunna beskriva vilka klimatneutrala energitillförselsystem som står till buds idag för att lösa framtidens energiefterfrågan och klimatmål och redogöra för storleksordningarna på dess potentialer
- Att kunna argumentera för de viktigaste för- och nackdelarna med olika klimatneutrala tekniker och deras kritiska begränsningar.
- Att kunna beskriva hur kostnaden för energi påverkas av valet av energikälla.

**LITTERATUR:** Läs kurslitteraturen som hör ihop med er teknik extra noggrant och leta även gärna efter egen information. Var dock noga med att ange källor för den information ni använder.

**OMFATTNING:** Tidsmässigt motsvarar denna inlämningsuppgift en arbetsinsats på cirka 20 timmar/person (0,75 hp).

**INLÄMNING:** Inlämning av svarsrapport ska ske via kurshemsidans funktion för inlämningsuppgifter senast tisdag 2017-05-02 kl 20:00 (dvs, några timmar efter fördjupningstillfället för denna inlämningsuppgift).

**BEDÖMNINGSGRUNDER FÖR GODKÄNT & POÄNGSÄTTNING:** För att bli godkänd på denna inlämningsuppgift krävs att man besvarat samtliga delfrågor och att man får minst 10 poäng (av maximalt 20) på uppgiften. Poängsättning görs utifrån följande kriterier:

- *Fullständighet och genomförande enligt instruktion* – är hela frågan korrekt besvarad? Är relevanta uppgifter inkluderade?
- *Beräkningar*, är beräkningarna korrekta och noggrant redovisade? Används rätt enheter? Redogörs det för vilka antaganden som gjorts?
- *Resonemang, argumentation och redogörelse* – är de argument som används relevanta, av vikt, och adekvata? Är resonemanget transparent och lätt att följa? Är språket klart och texten begriplig? Finns rena missuppfattningar eller felaktiga påståenden?
- *Förankring i och förhållningssätt till källor* – används ett kritiskt och självständigt förhållningssätt till den förmedlade informationen? Görs relevanta hänvisningar till litteratur och/eller föreläsningar? Visar studenten att den tillgodogjort sig innehållet i kursen?

## Bakgrund

Den installerade effekten av vindkraft i världen ökar stadigt från år till år. I Danmark motsvarar vindkraft mer än en tredjedel av den totala elkonsumtionen. Den största producenten i absoluta tal är Kina, där man numera får mer el från vind än från kärnkraft. För 20 år sedan var det få som anade hur mycket vindkraften skulle komma att växa.

Som representanter för vindkraftsindustrin har ni blivit kontaktade av presidenten för ett litet europeiskt land som överväger att ställa om sitt energisystem från kol och olja till fossilfri energi. Presidenten är ganska väl insatt i de olika teknologierna så det handlar om att ge en balanserad bild av för- och nackdelar och vässa argumenten. Inte minst kommer presidenten att vara intresserad av kostnaderna för er teknologi (jämfört med priset för fossil energi), hur stor yta som behövs för att tillgodose landets energibehov, samt vilken kritik medborgare i landet kan tänkas rikta mot er teknologi. Ni kommer också att behöva sätta er in i era konkurrenters teknologier (bioenergi, solenergi och kärnkraft) för att kunna ifrågasätta felaktiga påståenden och peka på risker.

Under ett möte med presidenten (fördjupningstillfället) kommer ni ges möjlighet att presentera argumenten för er teknologi i cirka 10 minuter, därefter har presidenten och representanterna för de andra teknologierna möjlighet att ställa frågor i 5 minuter. Efter att alla industrier har presenterat fortsätter mötet med en frågestund och därefter fattar presidenten beslut kring vilken teknologi (eller vilken mix av teknologier) han/hon kommer att investera i.

### 1. Effekt och kapacitetsfaktor

Ett vindkraftverks maxeffekt kan beräknas med formeln

$$P_{el} = \eta \cdot \rho \cdot V^3 \cdot \pi r^2 / 2$$

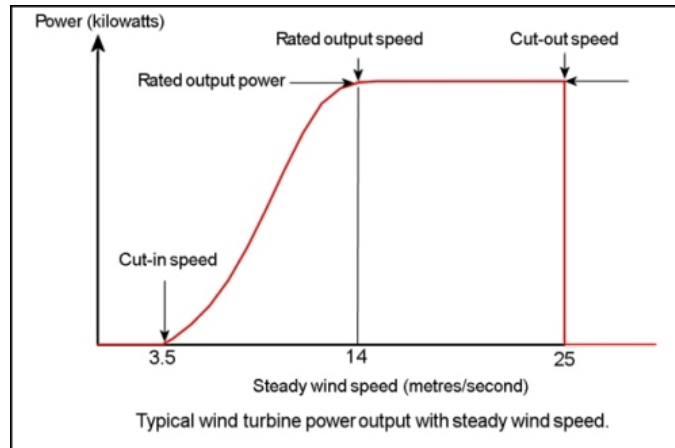
$P_{el}$ : märkeffekt, dvs turbinens maximala eleffekt ( $W_{el}$ )

$\eta$ : turbinens verkningsgrad vid märkvind (anger hur stor andel av vindens rörelseenergi som kan omvandlas till elenergi; teoretiskt maximal verkningsgrad är ca 59%, beror främst av att luftens hastighet bakom turbinbladen ej kan vara noll)

$\rho$ : luftens densitet,  $1,2 \text{ kg m}^{-3}$

$V$ : dimensionerande vindhastighet (märkvind/rated output speed), dvs den vindhastighet vid vilken turbinen producerar el med maximal effekt ( $\text{m s}^{-1}$ )

$r$ : radie på rotorn på vindturbinen (m)

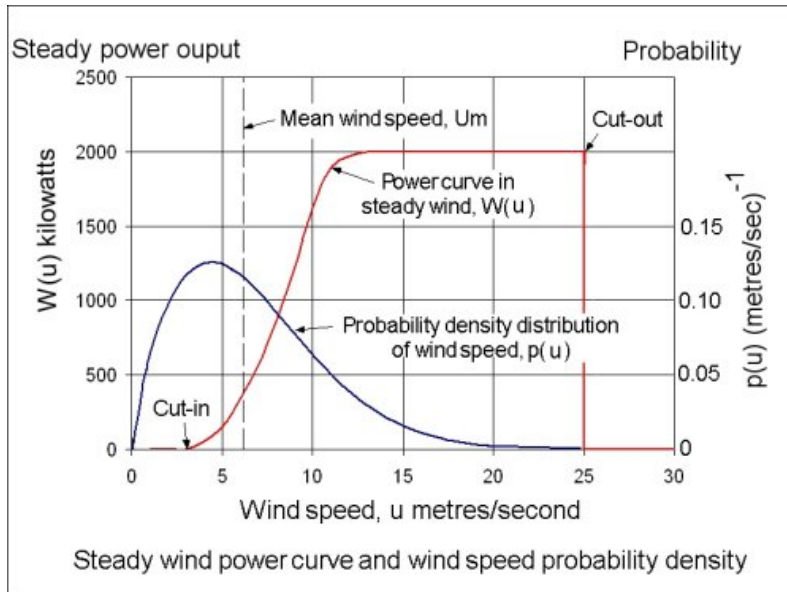


Figur 1: Effekten som ett vindkraftverk genererar som funktion av vindhastigheten.

Figur 1 visar effekten som ett kraftverk genererar vid olika vindhastigheter (effektkurvan). "Rated output power" är märkeffekten  $P_{el}$ , d.v.s. vindkraftverkets maximala effekt. I detta exempel är den dimensionerande vindhastigheten (rated output speed) 14 m/s. När det blåser för lite (mindre än "cut-in speed", i detta exempel 3.5 m/s) kan inte vindkraftverket producera någon el alls. När vindhastigheten tilltar ökar effekten kraftigt upp till märkeffekten. Vid hastigheter ovanför märkvind begränsas kraftproduktionen så att den inte överstiger märkeffekten eftersom den elektriska generatoren inte klarar av detta. Detta kan ske t.ex. genom att vinkla rotorbladen så att en mindre andel av energin i vinden fångas upp. Vid för höga vindhastigheter stängs kraftverket av helt, eftersom de starka krafterna från vinden annars riskerar att skada vindkraftverket.

Hade vinden blåst med konstant hastighet året runt skulle man kunnat dimensionera vindkraftverket så att man alltid producerade 100 % av märkeffekten. *Kapacitetsfaktorn* är kvoten mellan energin man faktiskt får ut i genomsnitt, och energin man skulle ha fått ut om vindkraftverket konstant hade producerat el vid märkeffekten.

- a) I figur 2 ser vi igen ett exempel på ett vindkraftverks effektkurva (power curve), d. v. s. hur hög effekt vindkraftverket i fråga genererar vid olika vindhastigheter. Antag att kraftverkets rotordiameter är 90 m. Hur hög är då dess turbinverkningsgrad,  $\eta$ ? (Använd formeln på föregående sida.) **(1p)**
- b) Figur 2 innehåller även en sannolikhetskurva för vindhastigheten på en viss plats (probability density distribution of wind speed). Använd figuren och förenklingen av sannolikhetskurvan enligt tabell 1 för att svara på följande frågor:
  - hur hög är vindkraftverkets kapacitetsfaktor? (avläs i figur 2 på ett ungefär hur hög effekt som vindkraftverket genererar vid de fem olika vindhastigheterna)
  - Hur mycket el skulle vindkraftverket kunna producera per år?
  - Ungefär hur många studenthushåll skulle vindkraftverket kunna försörja med el? (Ta reda på hur hög elförbrukningen är på ett ungefär i ett studenthushåll.) **(2p)**



Figur 2: Exempel på sannolikhetsfördelningen för vindhastigheten på en viss plats, tillsammans med ett vindkraftverks effektkurva. Man kan se att detta kraftverks installerade effekt är 2 MW. Den genomsnittliga effekten som kraftverket genererar är dock lägre eftersom maxeffekten (=den installerade effekten) bara uppnås vid höga vindhastigheter.

Tabell 1: Förenklad sannolikhetsfördelning för vindhastigheter.

Vindhastighet (m/s)	Sannolikhet
3	0,33
6	0,31
9	0,18
12	0,12
15	0,06

## 2. Effekttäthet

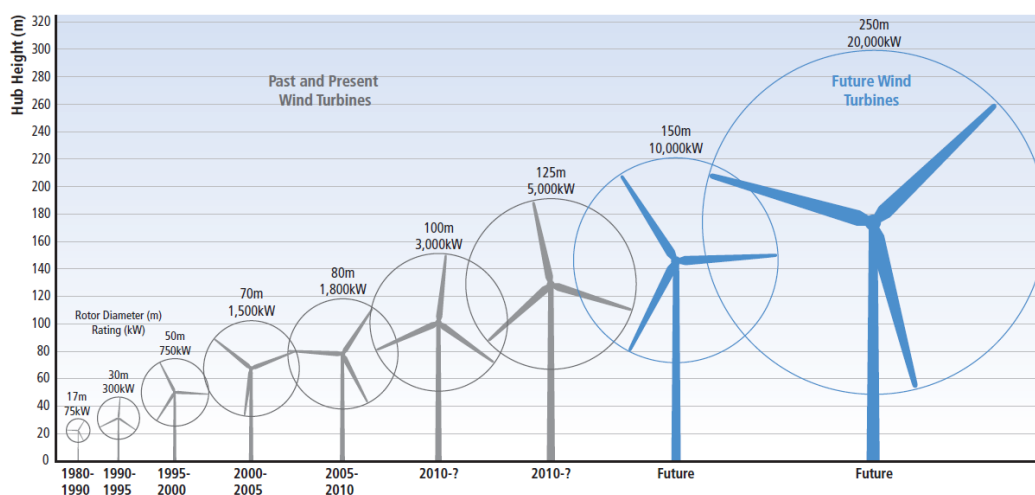
Förnybara energikällor kan räcka under en praktiskt taget obegränsad tidsrymd. En begränsning däremot som kan ha stor betydelse i valet mellan olika förnybara energislag är att de kräver relativt stora markytor. En viktig indikator för förnybara energikällor är därför hur mycket energi, eller effekt (d.v.s. energi per tidsenhet), som i genomsnitt går att få ut per ytenhet från olika energikällor. I denna uppgift ska ni därför uppskatta "effekttätheten" (uttryckt i  $W/m^2$  mark- eller vattenyta) som kan fås från vindkraft.

Inkludera i beräkningarna (genom att subtrahera) den energi som åtgår internt för själva produktionen av vindkraftsverken, d.v.s. beräkningarna ska ge *nettoenergidraget* för vindkraft. Antag alltså att vindkraften fullt ut möter sitt eget interna energibehov. Man kan uppskatta energiåtgången som åtgår vid vindkraftverkets uppbyggnad, drift och nedmontering till 7 månaders elproduktion. Kraftverkets livslängd antas vara 20 år.

I en vindkraftspark med flera turbiner måste turbinerna vara placerade med ett visst minimiavstånd från varandra för att inte för stor interferens mellan de olika turbinerna ska uppstå. En vanlig standard i Europa är att avståndet i bredd mellan de enskilda turbinerna är  $6 \cdot d$  (d.v.s. 6 gånger rotordiametern), och i längd  $8 \cdot d$ . (Avvikelser kan dock ske från denna standard, bl. a. beroende på mark- och infrastrukturkostnaderna samt intäkterna från elproduktionen.) Gör följande antaganden för land- och havsbaserade turbiner:

	On-shore	Off-shore
Rotordiameter	90 m	120 m
Turbinverkningsgrad	29 %	27 %
Kapacitetsfaktor	25 %	35 %
Märkvind	13 m/s	14 m/s

- a) Hur hög är effekttätheten ( $W/m^2$ ) för land- respektive havsbaserad vindkraft? **(2p)**
- b) Sveriges totala yta är ca 450 000  $km^2$ . Hur stor del av Sveriges yta skulle krävas för att producera lika mycket el med vindkraft (on-shore) som Sveriges totala elbehov 2012 som var 142 TWh? Tycker ni att denna markåtgång är stor eller liten? **(1p)**



Figur 3: Utvecklingen av storleken på vindkraftverk. Källa: IPCC, Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation.

### 3. Ekonomisk potential

Produktionskostnaden för el från ett vindkraftverk beror huvudsakligen på fem faktorer:

- Den årliga elproduktionen (beror på kraftverkets installerade effekt och kapacitetsfaktor, vilket i sin tur beror på bland annat vindförhållandena vid platsen där kraftverket står)
- Investeringskostnaden
- Kostnaden för drift och underhåll
- Finansieringskostnaden (räntan)
- Den ekonomiska livslängden på vindkraftverket

Den generella formeln för att räkna ut vad det kostar att producera el från ett kraftverk (per kWh) är

$$\text{Kostnad} = \frac{IK * AF + D\&U}{8760 \frac{h}{\text{år}} * KF} + \frac{BK}{\eta} * 3,6 * 10^{-3} \text{ GJ/kWh}$$

$IK$ : Investeringskostnad, [SEK/kW]

$D\&U$ : Drift och Under hålle [SEK/kW/år]

*AF*: Annuitetsfaktorn [ $\text{år}^{-1}$ ]. Andelen av investeringskostnaden som man behöver betala varje år för att täcka ränta och amortering på lånet. Formeln för annuitetsfaktorn är

$$AF = \frac{r}{1 - \frac{1}{(1+r)^T}}$$

*r*: ränta på lånet

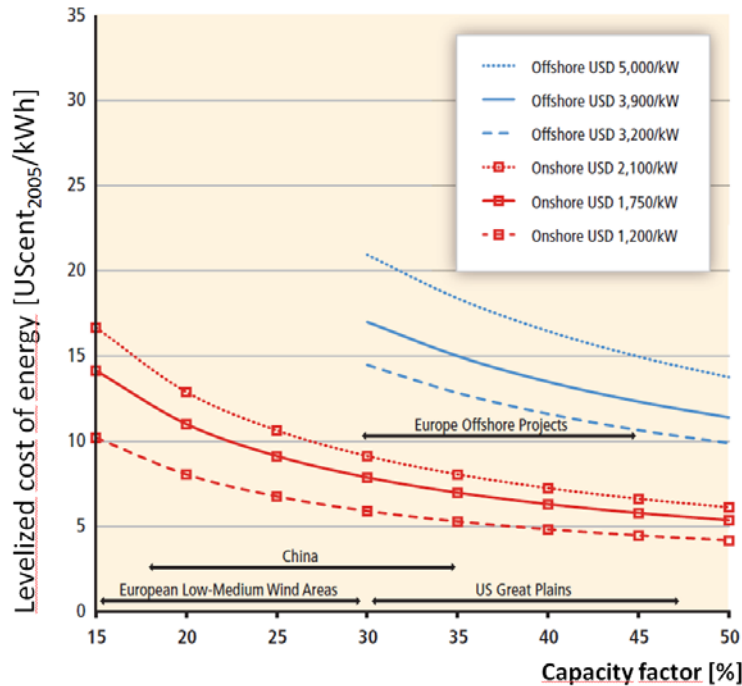
*T*: kraftverkets ekonomiska livslängd, uttryckt i år

*KF*: kraftverkets kapacitetsfaktor, hur stor andel av tiden på full effekt som kraftverkets elproduktion motsvarar

*BK*: bränslekostnad, uttryckt i SEK/GJ (termisk energi)

*$\eta$* : verkningsgrad (mängden elektrisk energi som kraftverket genererar per energienhet i bränslet)

- a) Vad kostar det att producera el från ett vindkraftverk om investeringskostnaden är 17000 SEK/kW, kostnaden för drift och underhåll 265 SEK/(kW\*år), kapacitetsfaktorn 28%, räntan 7,5% och den ekonomiska livslängden på vindkraftverket 25 år? (Lägg till den årliga kostnaden för drift och underhåll till den årliga avbetalningen på investeringskostnaden.) Jämför med vad du betalar för din el hemma. (Eller kolla upp priset hos något av energibolagen.) **(2p)**
- b) Hur högt skulle priset på utsläpp av koldioxid behöva vara för att vindkraft skulle bli billigare i kolkraft? (Svara i SEK/ton  $\text{CO}_2$ .) Bränslet kol har ett C-innehåll av 25 gC/MJ. Vid förbränning bildar varje C-atom en  $\text{CO}_2$ -molekyl. Antag att kapacitetsfaktorn för kolkraftverket är 80%, verkningsgraden från termisk till elektrisk energi är 40%, investeringskostnaden är 20 100 SEK/kW och bränslekostnaden är 28 SEK/GJ. Räkna också med en kostnad på 615 SEK/kW/år för drift och underhåll. Antag åter igen en ränta på 7,5% och en ekonomisk livslängd på kolkraftverket på 40 år. **(3p)**
- c) Ni räknade just ut i uppgift 3a) och b) att den totala kostnaden för att producera el är högre från ett vindkraftverk än från ett kolkraftverk. I Danmark har man en stor andel elproduktion från vindkraft och när det blåser kraftigt så sjunker vanligen elpriset i Danmark. Varför går priset ner när det produceras mycket el från vindkraft, trots att den totala kostanden för att producera el från vindkraft är högre än för kolkraft, som annars skulle vara alternativet? **(1p)**



Figur 4: Uppskattning av produktionskostnad för vindkraftsel. Källa: IPCC, Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation, 2011.

#### 4. Begränsningar

- Något som skulle kunna begränsa en fortsatt kraftig expansion av vindkraft är om man inte erhåller acceptans från allmänheten. Vilka faktorer kan man se påverkar det folkliga stödet? Utgå gärna från Box 1. **(1p)**
- Vad finns det för fördelar respektive nackdelar med havsbaserad vindkraft jämfört med vindkraft på land? (Använd information från detta uppgiftspapper, från föreläsningen eller sök information på internet.) **(2p)**

##### Box 1: Folklig acceptans av vindkraft

En faktor som kan begränsa expansionstakten av vindkraft är lokalt motstånd. Många projekt har stoppats på grund av att lokalbefolkningen är rädd för det estetiska intrånget och bullret. På vissa ställen är den generella attityden till vindkraft överlag positiv, medan attityden mot specifika etableringar av vindkraft är mer negativ. (Detta kallas NIMBY-syndromet: Not In My Back Yard.)

Om man tittar på de Europeiska länderna kan man se att acceptansnivån skiljer sig markant åt mellan olika länder och olika områden, skillnader som inte är direkt kopplade till hur stor del av utrymmet som använts för vindkraftsetablering. Danmark, Tyskland och Spanien är länder med hög penetration av vindkraft och det är länder där vindkraften också har brett folkligt stöd. I Danmark har man gjort det möjligt för privatpersoner att köpa andelar i vindkraftverk, så att de därmed kan producera sin egen elektricitet. Resultatet är att nästan alla vindkraftverk ägs av dem som bor i närheten. I Tyskland har man länge reglerat energiproduktionen från förnyelsebara energikällor så att energibolagen tvingats köpa all producerad energi till fasta priser. Detta har gjort det möjligt för små föreningar, ofta bestående av jordbrukare, att investera i vindkraft och därmed få extra avkastning från sin mark. I Spanien har istället investeringarna framförallt gjorts av elbolag, regionala energimyndigheter och tillverkare av vind-

kraftverk. Befolkningen är emellertid fortfarande positiv på grund av att vindkraftsetableringarna i många fall har fört med sig arbetstillfällen och tillväxt.

Storbritannien och Sverige är exempel på länder där vindkraft tvärtom kommit att ses som något kontroversiellt. I England och Skottland har myndigheterna mötts av kraftfulla protester från motståndare till vindkraftverk. De flesta vindkraftsparker har finansierats och byggts av stora energibolag och oberoende företag specialiserade på förnyelsebara energikällor. Det har inte funnits någon lokal förankring så som i Danmark, Tyskland och Spanien. I Sverige har vi sett många utdragna tillståndsprocesser och det ökande antalet överklaganden av vindkraftsetableringar riskerar att leda till förseningar och ökade kostnader för företagen som vill bygga vindkraft.

En utveckling av den havsbaserade vindkraften skulle kunna vara en lösning på problemet med folkligt motstånd. På vissa håll anses havsbaserad vindkraft dock vara ett hot mot turismnäringen.

I en generator genereras elektrisk ström när en ledare rör sig genom ett magnetfält. I ett traditionellt vindkraftverk skapas det magnetiska fältet av strömförande kopparspoler med järnkärnor som matas med el från generatoren själv. Turbinen och generatoren är sammankopplade med en växellåda eftersom generatoren behöver rotera med höga varvtal. Växellådor är dock dyra och kräver mycket underhåll. Speciellt för havsbaserad vindkraft som är svårtillgänglig vill man undvika behov av underhåll så mycket som möjligt. De senaste åren har man börjat utveckla vindkraftsgeneratorer utan växellådor som istället roterar med samma varvtal som rotorbladen. Med en långsamt roterande generator behöver man istället utöka antalet magnetiska poler på generators rotor. Den ökade mängden magnetiska poler kräver att generators diameter ökas kraftigt. En 3 MW turbin kan ha en generator på 4 m i diameter. För att minska vikten kan permanentmagneter användas istället för de tunga kopparspolarna. En typ av permanentmagnet som används i vindkraftverk består av neodym, järn och bor (Nd-Fe-B). Neodym ses av vissa som en möjligt flaskhals vid en fortsatt utbyggnad av vindkraft. För den intresserade: läs dessa två debattartiklar där två olika synsätt presenteras.

*Vindkraften har också sin uranbrytning* <http://www.nyteknik.se/asikter/debatt/article3421154.ece>

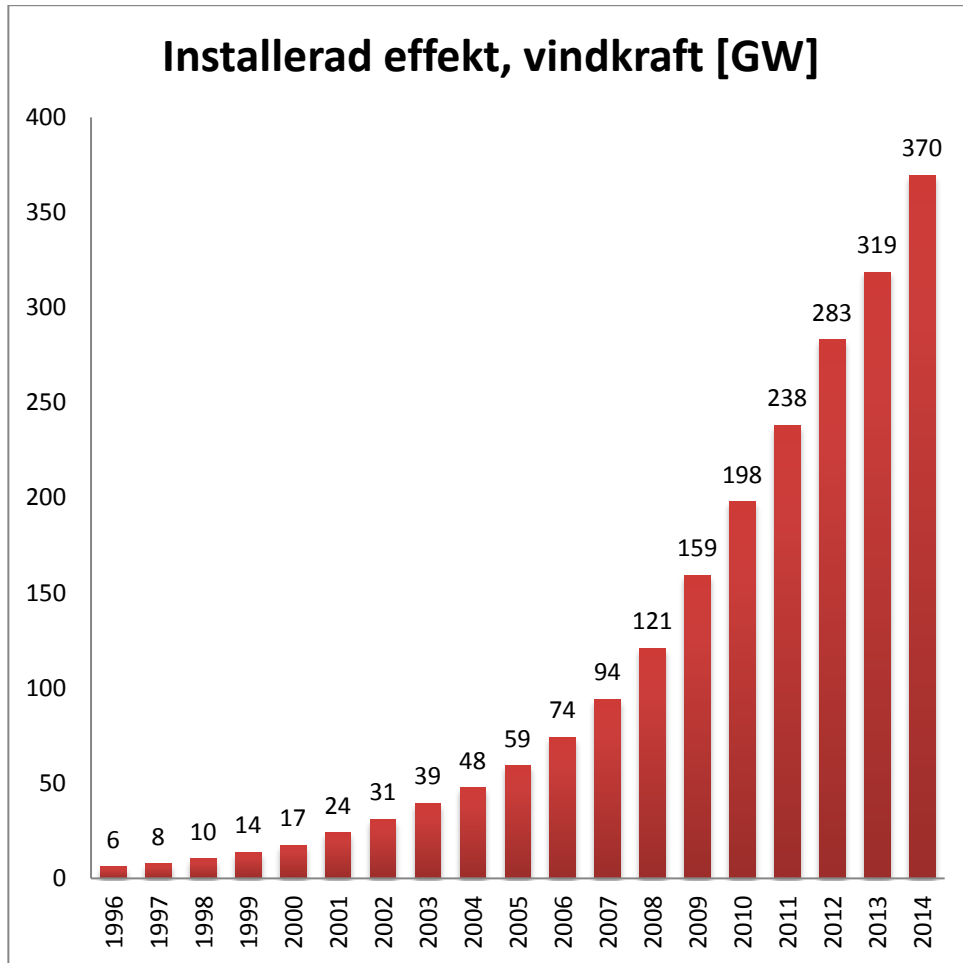
*Kraftigt överdriven oro för neodym* <http://www.nyteknik.se/asikter/debatt/article3432956.ece>

- c) Framtida vindkraftverk med neodym-magneter beräknas ha en materialåtgång på 216 kg Nd/MW<sup>1</sup> (installerad effekt). Antag att den totala elkonsumtionen i världen ökar från 17 200 TWh 2009 med 2,4% per år fram till år 2035. Om 20 % av elen 2035 kommer från vindkraft, och 10 % av nya vindkraftverk använder neodym-magneter, hur mycket neodym skulle då finnas i världens vindkraftverk 2035? (Gör ett rimligt antagande för kapacitetsfaktorn.) Jämför med tillgången på marknaden 2010 som var ca 20 000 ton. **(2p)**

---

<sup>1</sup> Wilburn, D. R., Wind Energy in the United States and Materials Required for the Land-Based Wind Turbine Industry From 2010 Through 2030.

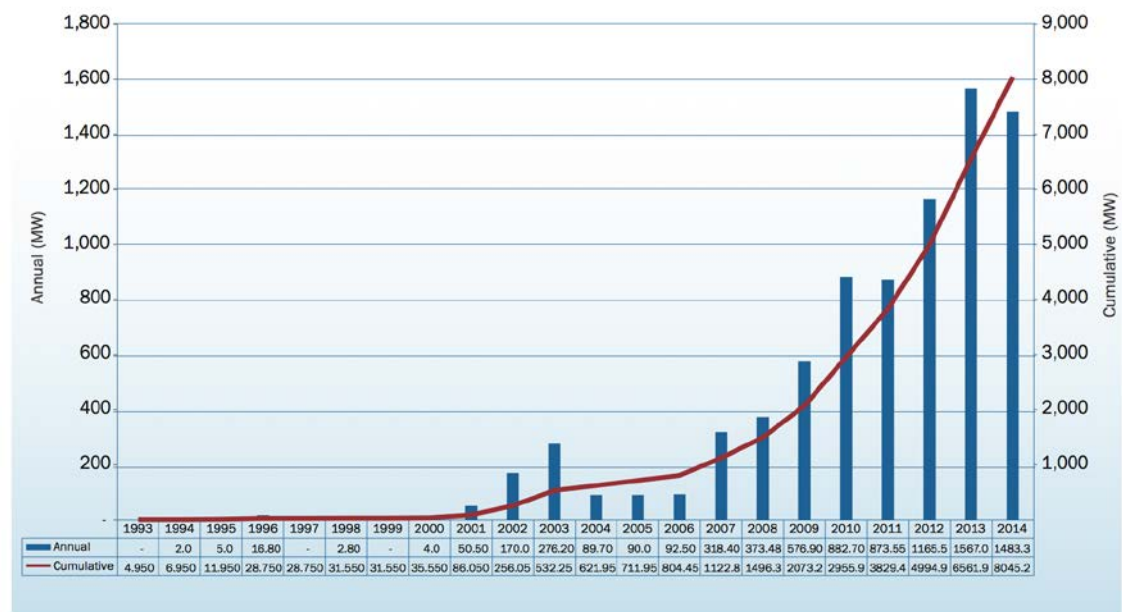




Figur 5: Global (kumulativ) installerad vindkraft 1996-2014. (Med "installerad effekt" menas maxeffekt, inte genomsnittlig elproduktion över tid.) Källa: Global Wind Energy Council

#### 5. Sammanfattning – för och nackdelar av de olika konkurrerande teknologierna

Sammanfatta kort (gärna i en tabell) det ni anser vara de viktigaste för- och nackdelarna med både er teknologi (vindkraft) samt dem som era konkurrenter representerar (bioenergi, soleenergi och kärnkraft). **(3p)**



Figur 6: Installerad effekt, OFFSHORE. Den röda linjen visar kumulativ effekt och avläses på den högra vertikala axeln.

**INFÖR FÖRDJUPNINGSTILLFÄLLET:** Förbered en kort muntlig presentation av er teknik (10 minuter) för presidenten och era konkurrenter. I presentationen skall ni berätta vilken framtida potential ni tror att er teknik har. Basera detta på vilka resurser som krävs och tillgången på dem, kostnader för elproduktion med er teknik, risker med tekniken, samt andra fördelar och nackdelar som ni tycker är viktiga. Meningen är inte att ni skall redovisa era beräkningar under presentationen, men ni får gärna visa resultat från dem för att stärka era argument.