

# Hållbara Energi och Transportsystem – Naturgas, CCS, Bioenergi & Vind

26 april 2017

Liv Lundberg  
([livl@chalmers.se](mailto:livl@chalmers.se))  
Fysisk Resursteori  
Energi och Miljö, Chalmers

## Energisystemet står inför 3 stora utmaningar



- Utvecklingsutmaningen
  - 2,7 Mdr människor är fortfarande beroende av traditionell bioenergi 2014



- Resurs- & säkerhetsutmaningen
  - Ställa om från ändliga till förnybara energikällor, samt minska beroendet av energiimport

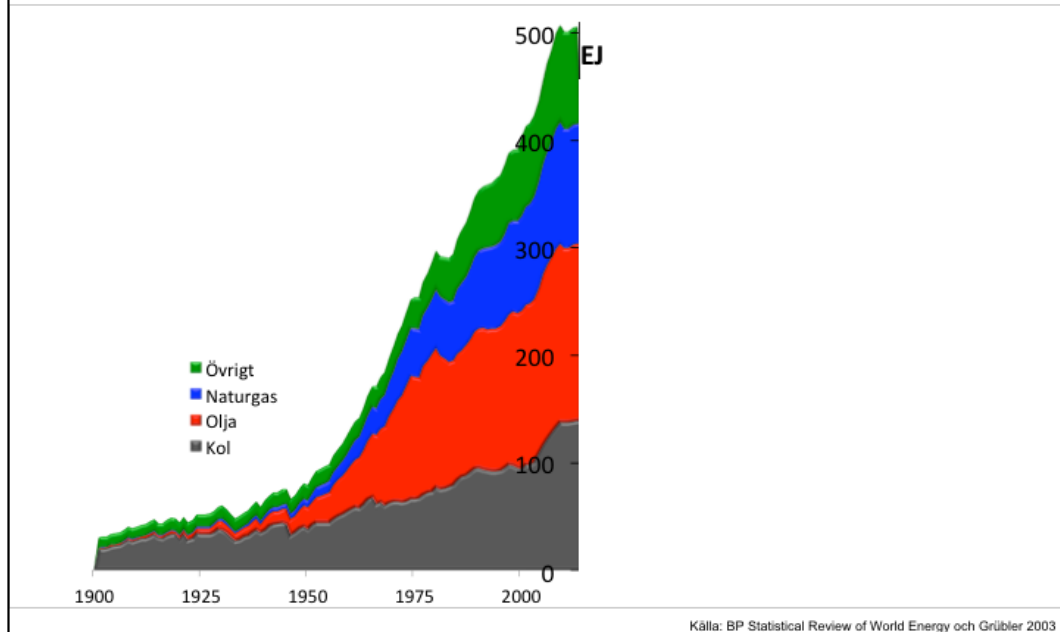


- Miljöutmaningen
  - Minska miljöpåverkan av energianvändning, framförallt klimatpåverkan

## Fossila bränslen – karaktäristik

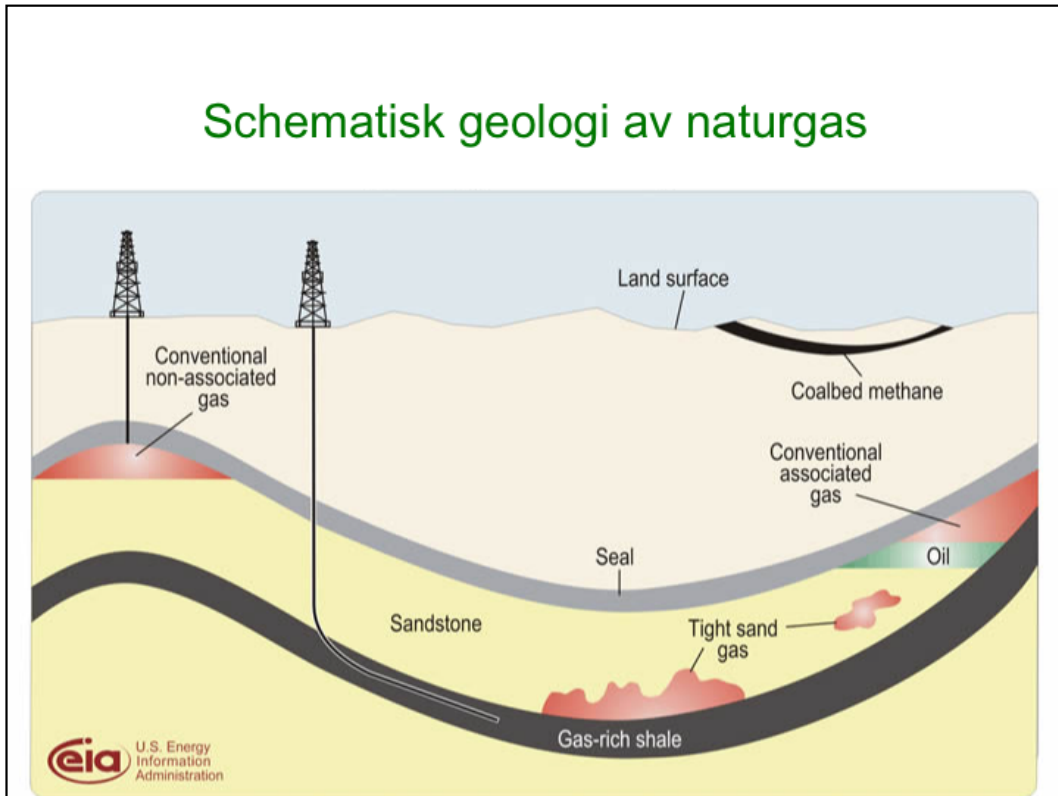
- **Kol** – Fast form, skrymmande, höga utsläpp av lokala luftföroreningar, 95 gCO<sub>2</sub>/MJ.
- **Olja** – Flytande form, hög energitäthet, enkelt att transportera och lagra, 75 gCO<sub>2</sub>/MJ.
- **Naturgas** – Gasform, skrymmande, låga utsläpp av lokala luftföroreningar, kräver kostsam infrastruktur (rör, trycksatta behållare eller kyld/komprimerad till flytande), 55 gCO<sub>2</sub>/MJ.

## Global primärenergitillförsel



Naturgas har växt kraftigt. Konsumtionen har tredubblats de senaste 30 åren. En viktig anledning är låga CO<sub>2</sub> innehållet. Används inom elproduktion, uppvärmning och inom industri.

## Schematisk geologi av naturgas



Naturgas: består till större delen av metan.

Hittas ofta tillsammans med olja (o ibland även kol)

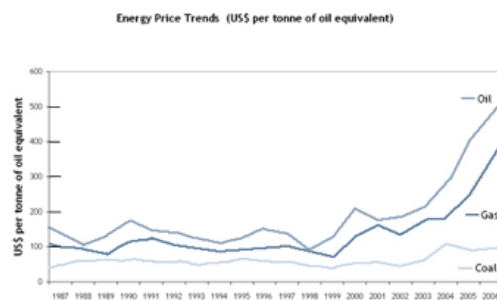
Kan bli biprodukt när man producerar olja. Ofta eldas den bara upp direkt.



Gas som eldas upp i samband med oljeutvinning. Kallas för flaring.

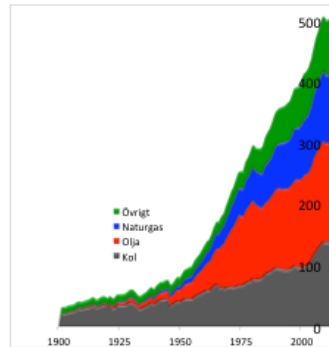
## Ekonomi

- Dyrare bränslekostnad än kol
- Billigare investeringskostnad för att bygga kraftverk
- Kraftverk kan startas upp med kort varsel – används ofta som “peak power”
- Kotsam infrastruktur för att transportera (behövs tex pipelines)



## Hur länge kommer naturgasen att räcka?

Räkna med att det finns naturgas motsvarande ca 6860 [EJ] kvar, samt att vi kommer fortsätta använda lika mycket energi från naturgas som vi gör idag.





## Hur länge kommer naturgasen att räcka?

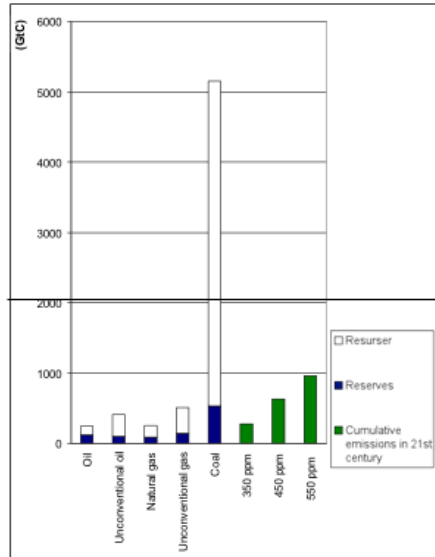
Räkna med att det finns naturgas motsvarande ca 6860 [EJ] kvar, samt att vi kommer fortsätta använda lika mycket energi från naturgas som vi gör idag.

$$6860 \text{ [EJ]} / 108 \text{ [EJ/år]} \approx 63 \text{ år}$$

## Fossila bränslen i energisystemet i korthet

- Kol – baskraft för elproduktion, billig i drift, högre investeringskostnader för själva kraftverket. Räcker ca 146 år (med dagens reserver).
- Gas – peak power för elproduktion, dyrare i drift, men ofta billigt att bygga själva kraftverket. Räcker ca 63 år (med dagens reserver).
- Olja, används främst inom transportsektorn. Räcker ca 42 år (med dagens reserver).

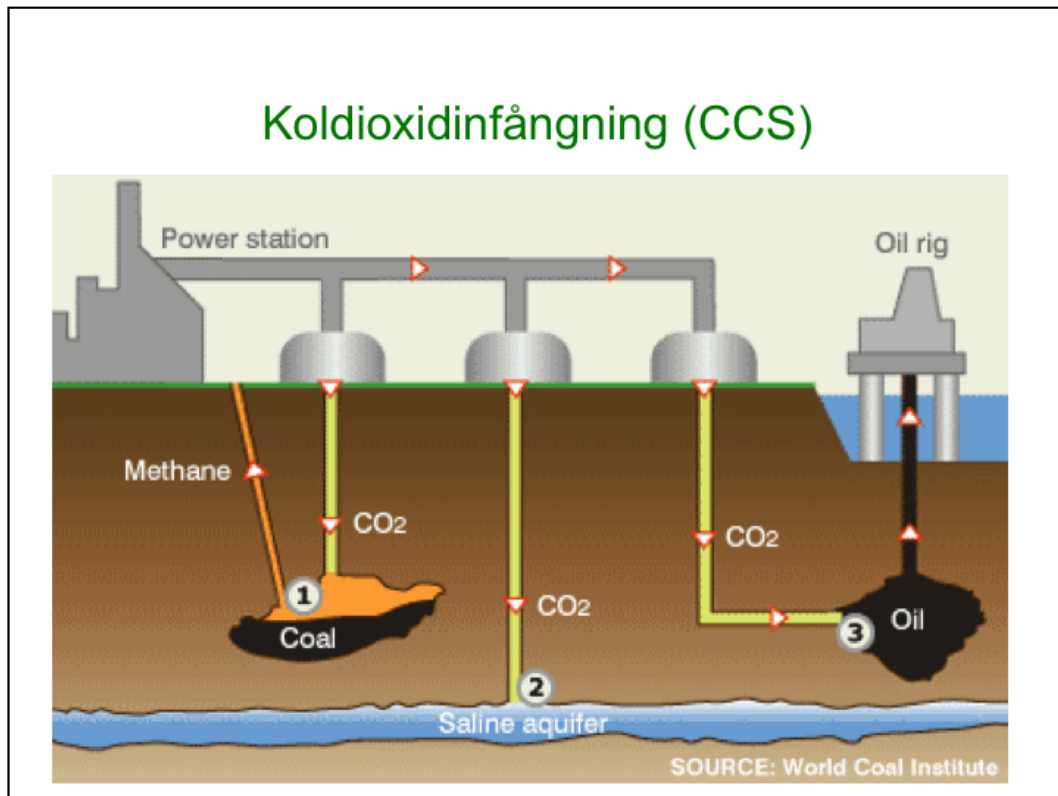
## Finns det för mycket eller för lite fossila bränslen?



Klimatförändringarna kommer inte att stoppas i tid utav att fossilbränslen tar slut (framförallt för att det finns väldigt mycket kol).

# Koldioxidinfångning

Carbon Capture and Storage – CCS

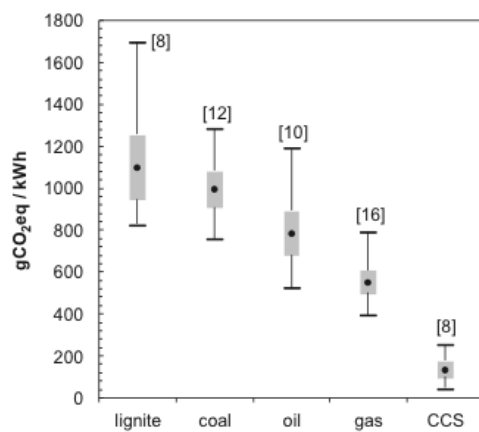


**Saline aquifers - Saltvattenlösning** are geological formations consisting of water permeable rocks that are saturated with salt water, called brine. Super-critical carbon dioxide ( $\text{CO}_2$ ),  $\text{CO}_2$  that has been pressurized to a phase between gas and liquid, may be injected into a saline aquifer where it may either dissolve in the brine, react with the dissolved minerals or the surrounding rock, or become trapped in the pore space of the aquifer due to its attraction to the walls of the aquifer (International Energy Agency (IEA), 2008). An increase in the amount of trapped gas may decrease the relative permeability of  $\text{CO}_2$  into water in the region, forming a buffer zone that will slow the spread of the trapped  $\text{CO}_2$ , called the plume, which could potentially escape if it travels too far. (MacMinn, 2008). Ideal aquifers have layers of minimally porous rock, which prevent water flow and the escape of injected  $\text{CO}_2$  (IEA, 2008). Cement is used to plug wells after injection is finished.

## Koldioxidinfångning

- Minskad verkningsgrad 10 – 15 %-enheter
- Infångningsgrad 80 – 95 %
- Ökad pris på el 30 – 60 %
- Infångningskostnad (incl. Transport) ca 500 kr/ton CO<sub>2</sub>

## CO<sub>2</sub>-utsläpp från elproduktion



Källa: Weisser, 2007

## Lagringspotential

- 1700 Gton CO<sub>2</sub> – 10 000 Gton CO<sub>2</sub>
- Globala utsläpp idag: 30 Gton CO<sub>2</sub>
- Global utsläpp 2050: runt 50 Gton CO<sub>2</sub>

= Lagringsutrymmet skulle räcka i 34 – 200 år



## Schwartze Pumpe, Tyskland

30 MW Oxyfuel pilotanläggning  
Invigdes 2008 – CCS slutade 2014



**NIMBY**  
Not In My Back Yard

Bild: [www.vattenfall.com](http://www.vattenfall.com)

NIMBY= Not In My Back Yard: även om många kan tycka att CCS är en bra idé så är det få som vill ha CO<sub>2</sub> lagrat nära där man själv bor. Vindkraft och förvaring av kärnbränsle har ofta samma problem.

### **Ett annat exempel på CCS:**

#### **Rotterdam Opslag en Afvang Demonstratieproject (ROAD)**

Zuid-Holland, the Netherlands

CO<sub>2</sub> capture source: A new coal and biomass-based power plant within the Maasvlakte section of the Rotterdam port and industrial area, Zuid-Holland

CO<sub>2</sub> storage sites: Primary storage location: A gas reservoir located approximately 3.5 km / 2 miles offshore of the Maasvlakte, under the floor of the North Sea

CCS start: 2019-20

<https://www.globalccsinstitute.com/projects/rotterdam-opslag-en-afvang-demonstratieproject-road>



## Lake Nyos, Kamerun 1986

- Stort läckage av CO<sub>2</sub> från en sjöbotten (det var ett naturligt fenomen, men liknande händelser skulle potentiellt kunna inträffa om CO<sub>2</sub> som man lagrat från CCS läckte ut i stor skala).
- 1700 människor döda
- 3500 djur döda



## Koldioxidinfångning (CCS)– för-, och nackdelar

- + Det fungerar ("troligt" att 99% av CO<sub>2</sub> är kvar om 1000 år)
- + Kan installeras i existerande anläggningar
- + Finns stor lagringskapacitet, räcker 100+ år innan fullt
- + Kan skapa negativa utsläpp i kombination med biomassa
- + fossillobbyn med på tåget (!)
- kostnad (antagligen som vind eller kärnkraft)
- kostnad (elen blir mellan 50% - 100% dyrare)
- risk för läckage (klimat effekt, säkerhetsaspekter)
- **NIMBY (Not In My Back Yard)**

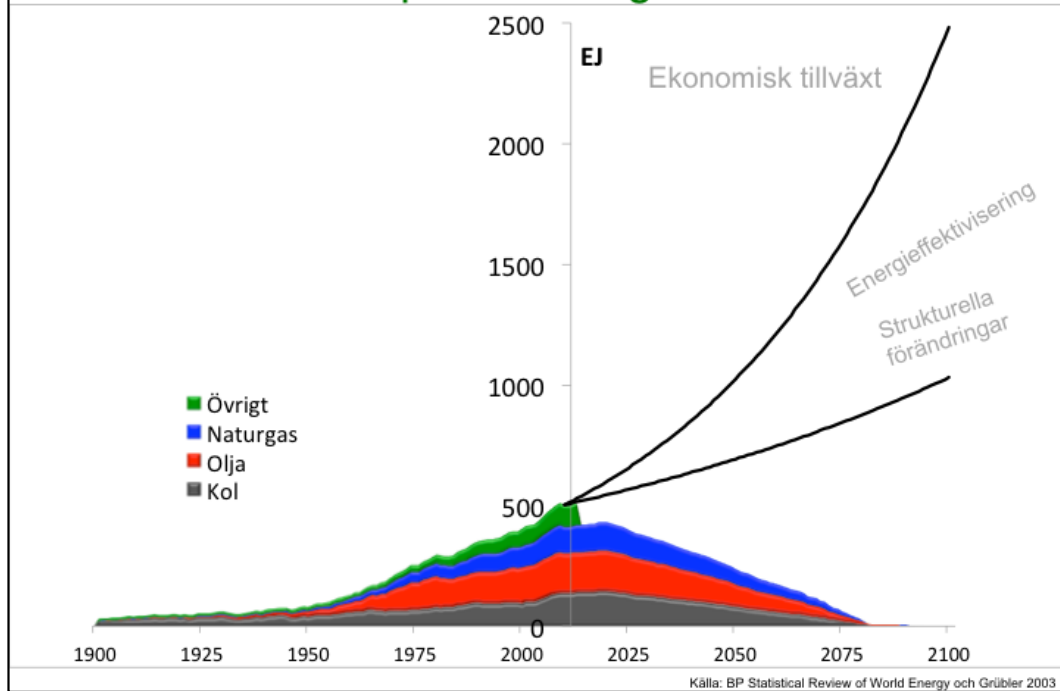
## • Två och två

- Bör världen använda CCS för att minska utsläppen av växthusgaser.  
Varför/varför inte?

## Kan ni redogöra för

- Vilka energikällor som används globalt
- Hur mycket energi som används idag
- Vad de tre framtida utmaningarna för energisystemet är
- Vad energisäkerhet innebär
- Att reserver är den del av en resurs som är kommersiellt lönsam att utvinna ... och hur de beror på priser och teknisk utveckling
- Huvuddragen för fossil energi och koldioxidinfångning

## Global primärenergitillförsel



Vad kan vi fylla gapet med?







## Efter föreläsningen ska ni kunna svara på

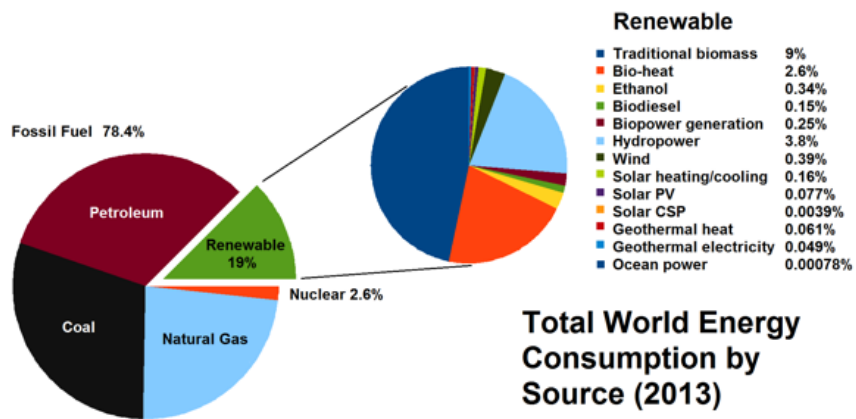
- Vad är bioenergi och vad kan det användas till?
- Vilka de principiellt olika källorna för bioenergi är
- Ungefär hur stor är potentialen för bioenergi?
- Varför bioenergi ofta räknas som klimatneutralt
- Vad är det som avgör klimateffekterna från bioenergi?

## Varför bioenergi?

- I många regioner det billigaste förnybara alternativet
- Inhemsk energikälla – populärt hos jordbrukarna
- Passar bra i befintlig energiinfrastruktur
- Lagringsbart (inga intermittensproblem)
- Restflöden från jord- och skogsbruk
  - Relativt små negativa effekter

# **Vad är bioenergi?**

## Nuvarande användning



[https://en.wikipedia.org/wiki/Renewable\\_energy](https://en.wikipedia.org/wiki/Renewable_energy)

## Varifrån kommer bioenergin? -tre källor för biomassa

**Restflöden**



Ex: biprodukter från  
sågverk o massabruk,  
hushållsavfall

**Skog och plantager**



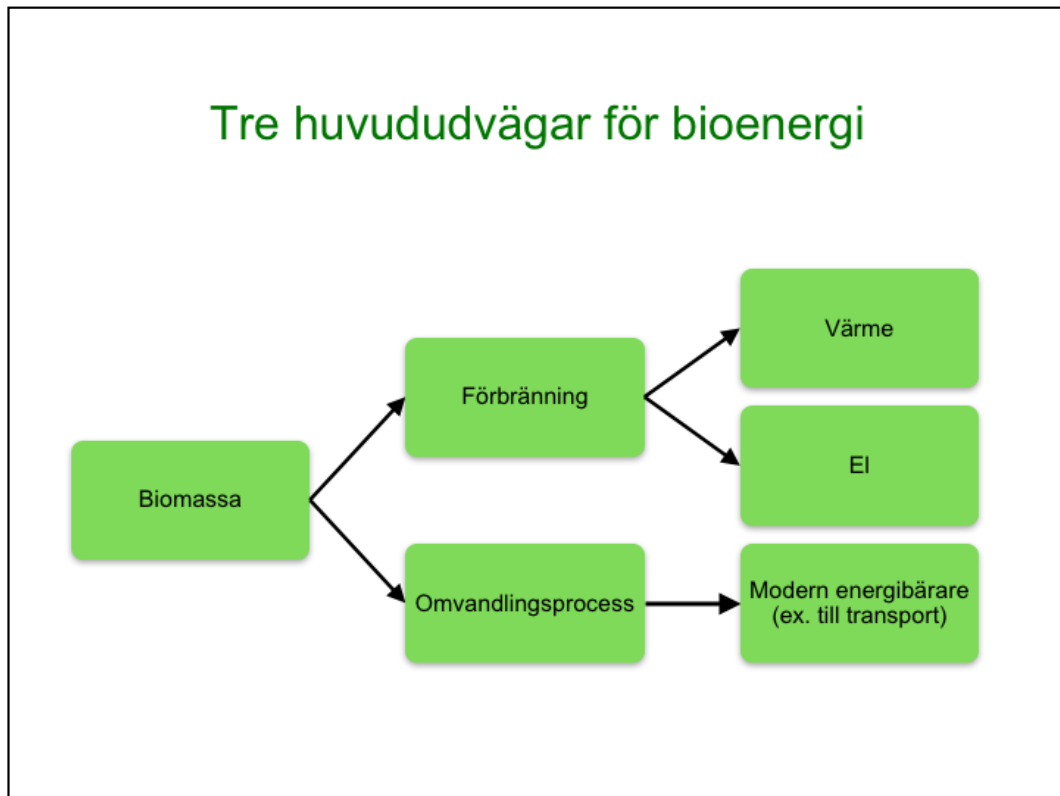
Ex: ved, energiskog

**Jordbruksgrödor**



Ex: spannmål, sockerrör

## Tre huvudvägar för bioenergi



**Biobränsle:** Biomassa avsedd för energi-ändamål (fast, flytande eller i gasform)

Mer förädlade former är t ex pellets, etanol, biogas

**Bioenergi:** Energi från biomassa (biobränslen)

## Energisystemet står inför 3 stora utmaningar



- Utvecklingsutmaningen
  - 2,4 Mdr människor är fortfarande beroende av traditionell bioenergi



- Resurs- & säkerhetsutmaningen
  - Ställa om från ändliga till förnybara energikällor, samt minska beroendet av energiimport



- Miljöutmaningen
  - Minska miljöpåverkan av energianvändning, framförallt klimatpåverkan



## Utvecklingsländer

### Drivkrafter, anv.

- Värme och matlagning
- Småskalig industri
- Brist på alternativ
- Billigt eller gratis

### Effekter

- Negativa effekter på ekosystem, mark pga överuttag
- Hälsoproblem (luftföroreningar inomhus)



## Energisystemet står inför 3 stora utmaningar



- Utvecklingsutmaningen
  - 2,4 Mdr människor är fortfarande beroende av traditionell bioenergi



- Resurs- & säkerhetsutmaningen
  - Ställa om från ändliga till förnybara energikällor, samt minska beroendet av energiimport



- Miljöutmaningen
  - Minska miljöpåverkan av energianvändning, framförallt klimatpåverkan

**Hur mycket bioenergi  
kan vi få?**



Hisingen: 130.000 people => ~60000 cars =>  
(15000 km/year, 0.07 liter/km = 2.45 MJ/km => 37 GJ/car/year) => 2.2 PJ/year

<http://www.agroetanol.se>

wheat yield 5.5 ton/ha, 2.6 kg wheat/liter ethanol, 24 MJ/liter => 51 GJeth/ha

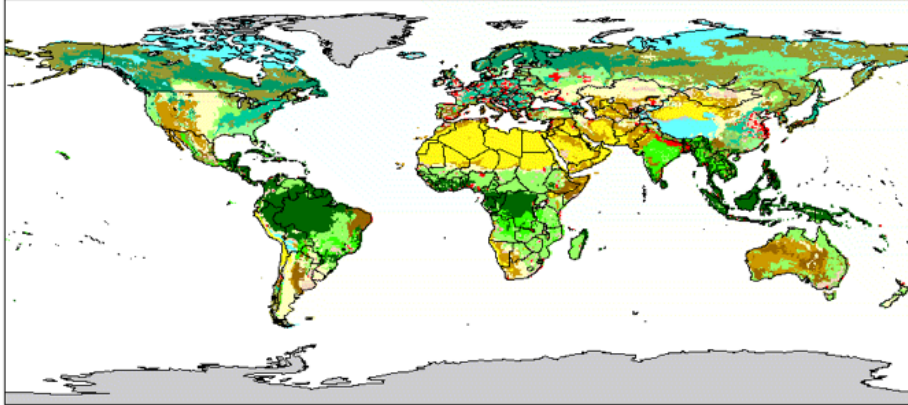
biofuel area for Hisingen's cars: 43000 ha = 430 km<sup>2</sup>

Hisingen area 200 km<sup>2</sup>, so about twice the land area of Hisingen needed!

**Hur mycket mark  
ska vi använda till  
bioenergi?**

## 300 års markanvändning

year 1700

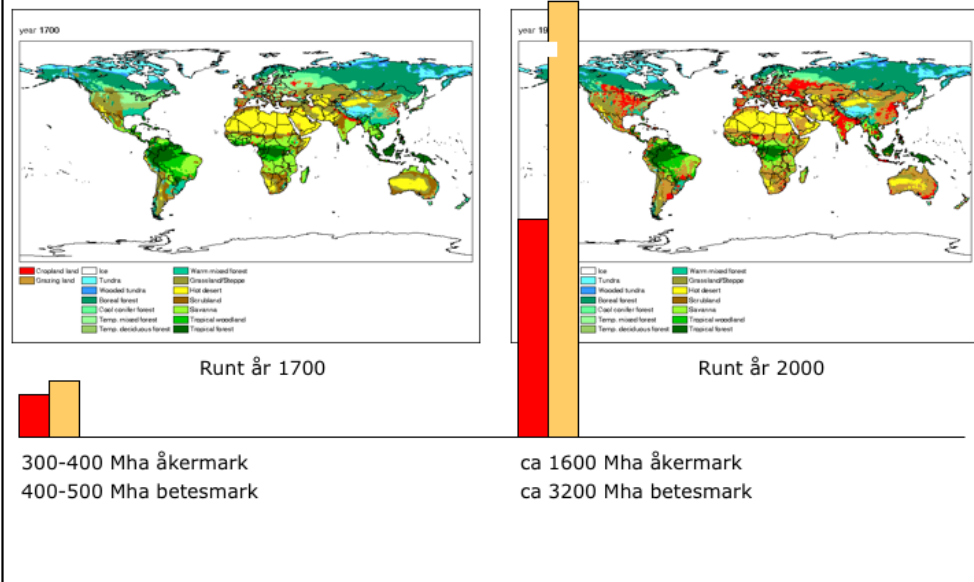


Åkermark



Permanent betesmark

## 300 års markanvändning



## Bioenergipotential

– Kan vi odla tillräckligt mycket biomassa?



500 Mha would supply roughly 20% of current primary energy used.

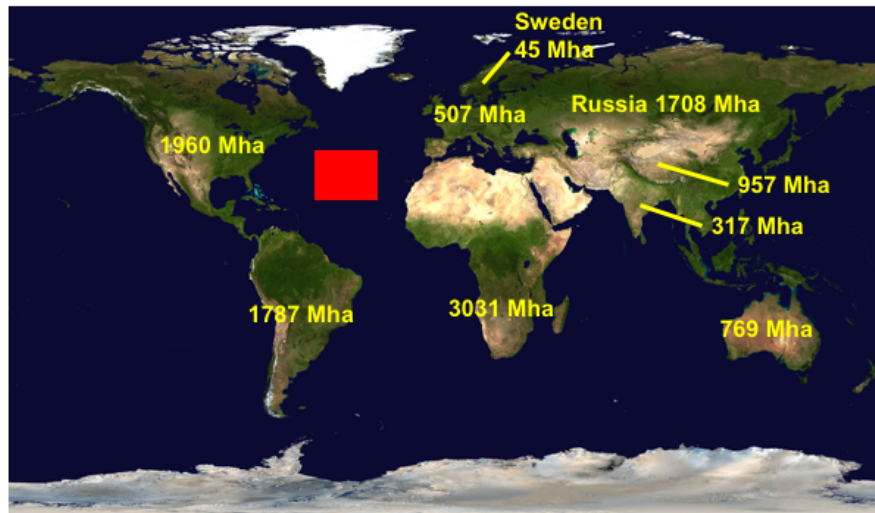
-requires a lot of land.

$$200 \text{ GJ/ha/yr} * 500 \text{ Mha} = 100\,000 * 10^6 \text{ GJ/yr} = 100 \text{ EJ}$$



## Bioenergipotential

– Kan vi odla tillräckligt mycket biomassa?



500 Mha would supply roughly 20% of current primary energy used.  
-requires a lot of land.

Expansion in 50 years would require expansion of 10 Mha/yr = today's deforestation rate

**Table 1:** Overview of the global potential of biomass for energy (EJ per year) to 2050 for a number of categories and the main pre-conditions and assumptions that determine these potentials [Sources: Berndes et al., 2003; Smeets et al., 2007; Hoogwijk et al., 2005a].

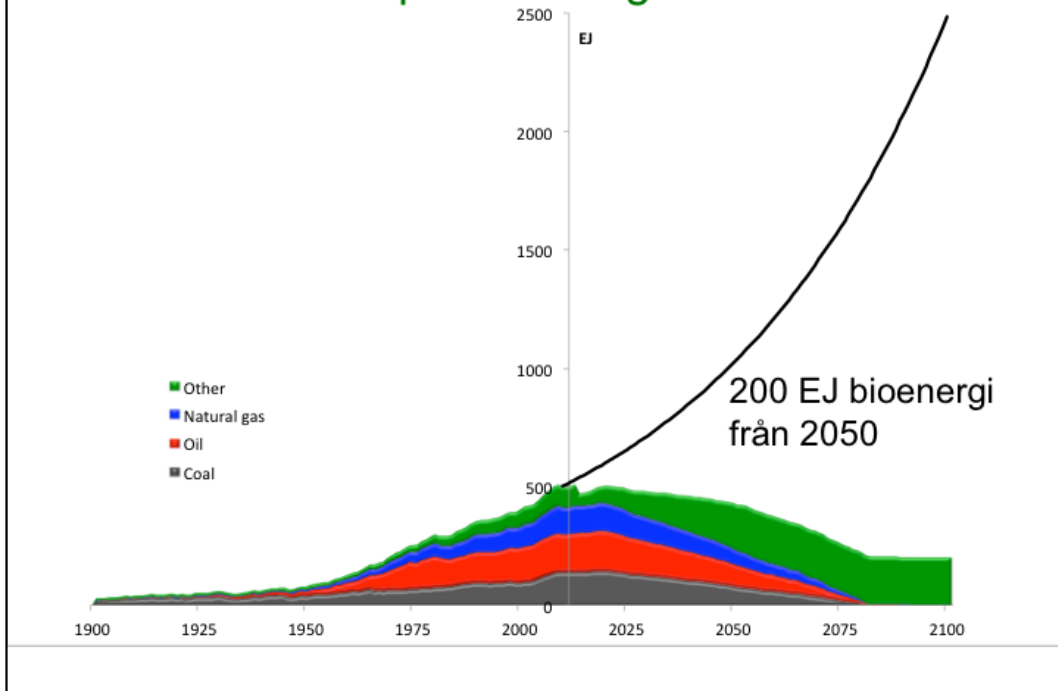
Biomass category	Main assumptions and remarks	Energy potential in biomass up to 2050
Energy farming on current agricultural land	Potential land surplus: 0-4 Gha (average: 1-2 Gha). A large surplus requires structural adaptation towards more efficient agricultural production systems. When this is not feasible, the bioenergy potential could be reduced to zero. On average higher yields are likely because of better soil quality: 8-12 dry tonne/ha/yr* is assumed.	0 – 700 EJ (more average development: 100 – 300 EJ)
Biomass production on marginal lands.	On a global scale a maximum land surface of 1.7 Gha could be involved. Low productivity of 2-5 dry tonne/ha/yr.* The net supplies could be low due to poor economics or competition with food production.	<60 – 110 EJ
Residues from agriculture	Potential depends on yield/product ratios and the total agricultural land area as well as type of production system. Extensive production systems require re-use of residues for maintaining soil fertility. Intensive systems allow for higher utilisation rates of residues.	15 – 70 EJ
Forest residues	The sustainable energy potential of the world's forests is unclear – some natural forests are protected. Low value: includes limitations with respect to logistics and strict standards for removal of forest material. High value: technical potential. Figures include processing residues	30 - 150 EJ
Dung	Use of dried dung. Low estimate based on global current use. High estimate: technical potential. Utilisation (collection) in the longer term is uncertain	5 – 55 EJ
Organic wastes	Estimate on basis of literature values. Strongly dependent on economic development, consumption and the use of bio-materials. Figures include the organic fraction of MSW and waste wood. Higher values possible by more intensive use of bio-materials.	5 – 50 EJ
Combined potential	Most pessimistic scenario: no land available for energy farming; only utilisation of residues. Most optimistic scenario: intensive agriculture concentrated on the better quality soils. In parentheses: average potential in a world aiming for large-scale deployment of bioenergy.	40 – 1100 EJ (200 - 400 EJ)

\* Heating value: 19 GJ/tonne dry matter.

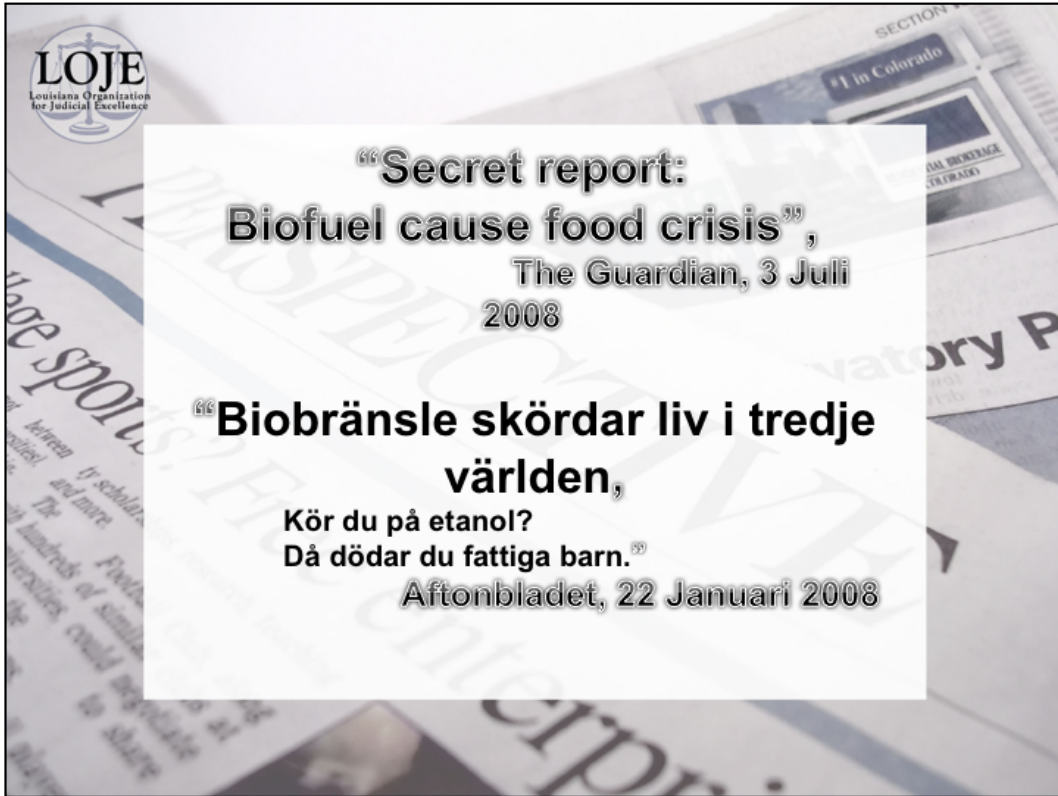
Exempel som kan ge en känsla för hur mycket bioenergi som kan fås från olika källor.

<http://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2013/10/Potential-Contribution-of-Bioenergy-to-the-Worlds-Future-Energy-Demand1.pdf>

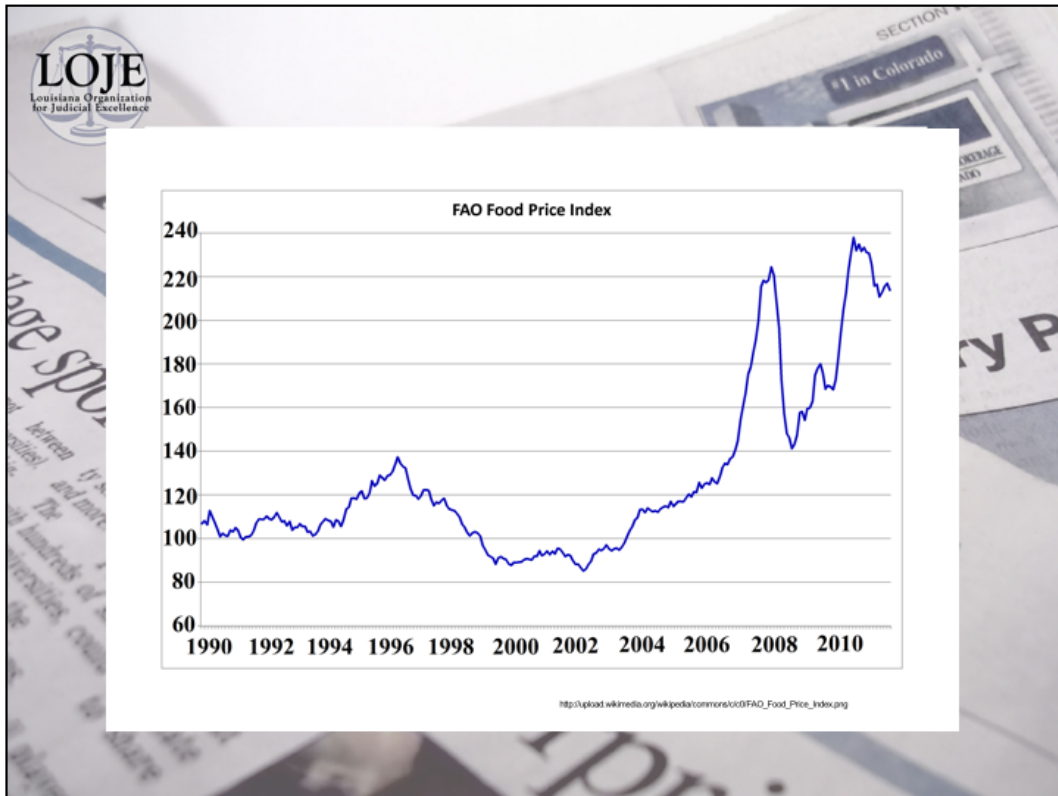
## Global primärenergitillförel



**Kan det bli konflikt med  
utvecklingsutmaningen?**



<http://www.aftonbladet.se/klimathotet/joachimkerpner/article11347303.a>  
b



Matpriser steg kraftigt i världen runt år 2008, vilket orsakade svält och uppror i flera fattiga länder både i sydostasien och afrika. Den "hemliga" rapporten som omnämndes i förra sliden hävdade att ca 75% av matprisökningen kom från en ökad efterfrågan på bioenergi, framförallt etanol till bilar.



## Energisystemet står inför 3 stora utmaningar



- Utvecklingsutmaningen
  - 2,4 Mdr människor är fortfarande beroende av traditionell bioenergi

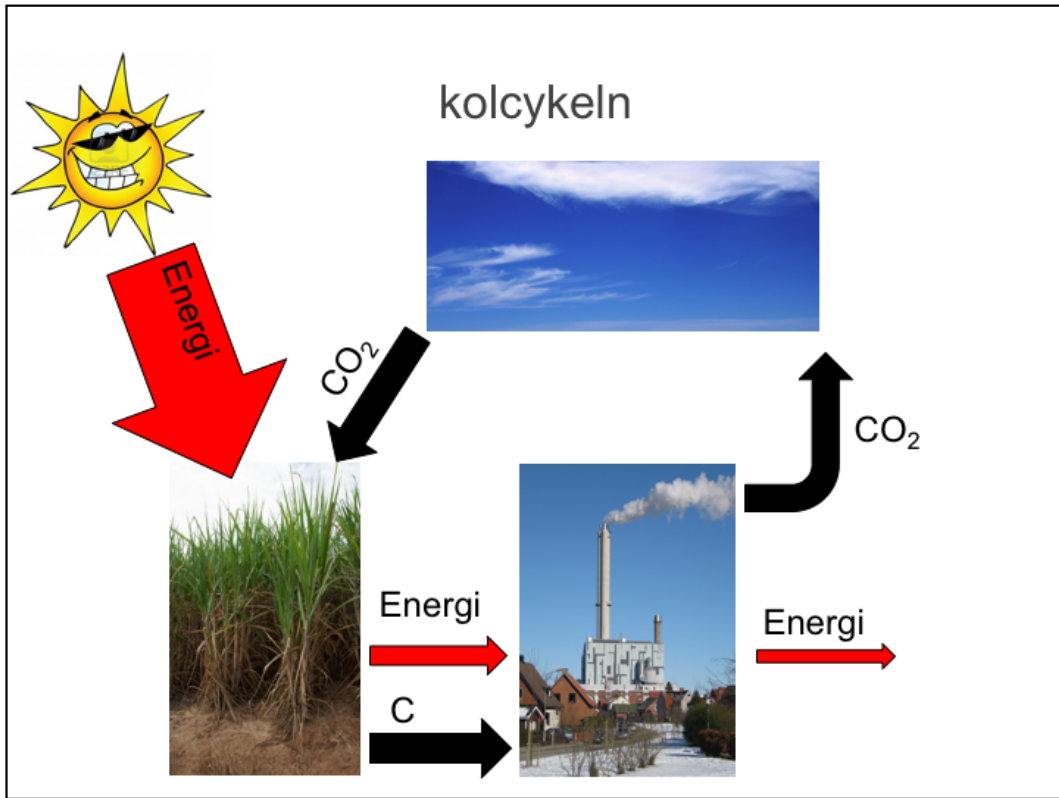


- Resurs- & säkerhetsutmaningen
  - Ställa om från ändliga till förnybara energikällor, samt minska beroendet av energiimport



- Miljöutmaningen
  - Minska miljöpåverkan av energianvändning, framförallt klimatpåverkan





## Klimatnytta beror på

- Vilket system bioenergin ersätter
- Hur bioenergin är producerad
- På vilken mark grödorna placeras
- Vilka andra grödor som konkurrerar om marken

## Klimatnytta beror på

- Vilket system bioenergin ersätter
- Hur bioenergin är producerad
- På vilken mark grödorna placeras
- Vilka andra grödor som konkurrerar om marken

Räkneexempel: -20%

Besparing = ersatt fossil energi – prod. Utsl.

## Spannmålsetanol

- Vete ger ca 2000 liter/ha
- Majs ger ca 4000 liter/ha
- Kol/naturgas vanligt för processenergi
- Kräver mycket handelsgödsel och besprutning
- Mycket dålig energibalans
- Liten klimatnytta: 0-20% minskning av GHG-utsläpp



Skillnad på etanol och etanol

## Sockerrörsetanol (Brasilien)

- Baserad på sockerrör, ger 6000 – 7000 liter/ha
- Bioenergi för processenergi (Restprodukt – bagasse)
- El till nätet (från bagasse)
- Kräver relativt lite insatser i form av handelsgödsel
- Bra energibalans
- Relativt stor klimatnytta: 80 – 90% minskning av GHG utsläpp



## Klimatnytta beror på

- Vilket system bioenergin ersätter
- Hur bioenergin är producerad
- På vilken mark grödorna placeras
- Vilka andra grödor som konkurrerar om marken

## Direkta markanvändningsförändringar

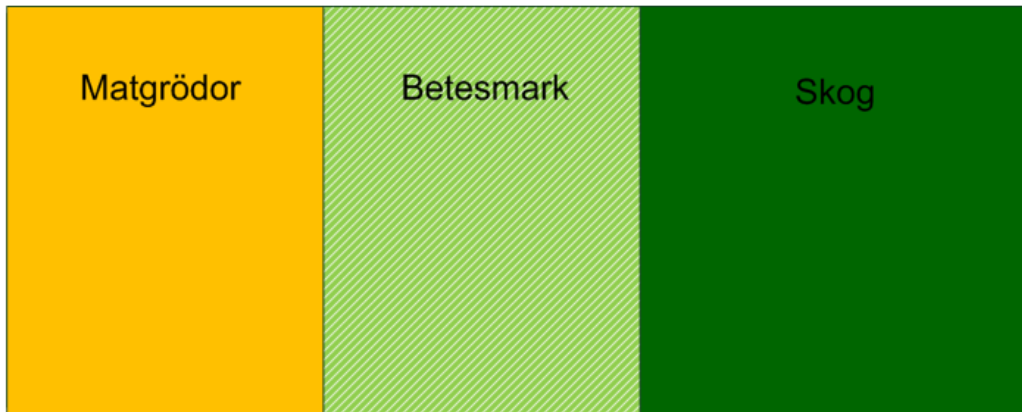


## Klimatnytta beror på

- Vilket system bioenergin ersätter
- Hur bioenergin är producerad
- På vilken mark grödorna placeras
- Vilka andra grödor som konkurrerar om marken
  - Indirekt markanvändning

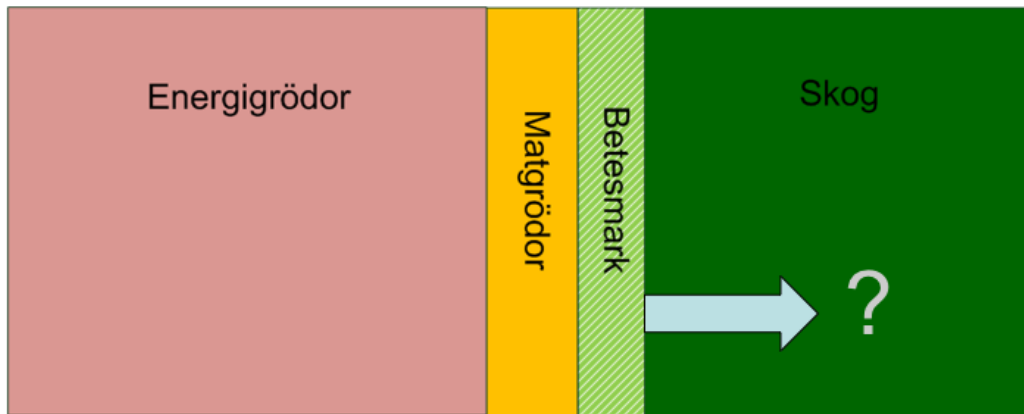


## Indirekt markanvändningsförändring (1)

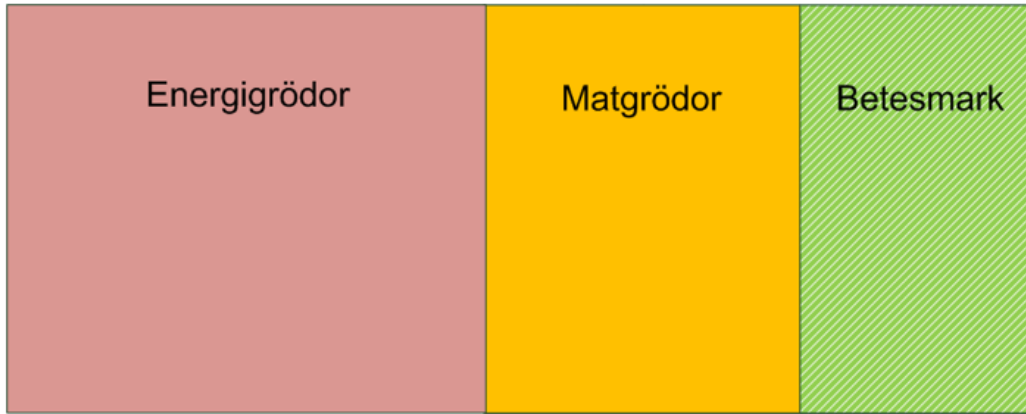


Direkt leder till indirekt

## Indirekt markanvändningsförändring (2)



## Indirekt markanvändningsförändring (3)



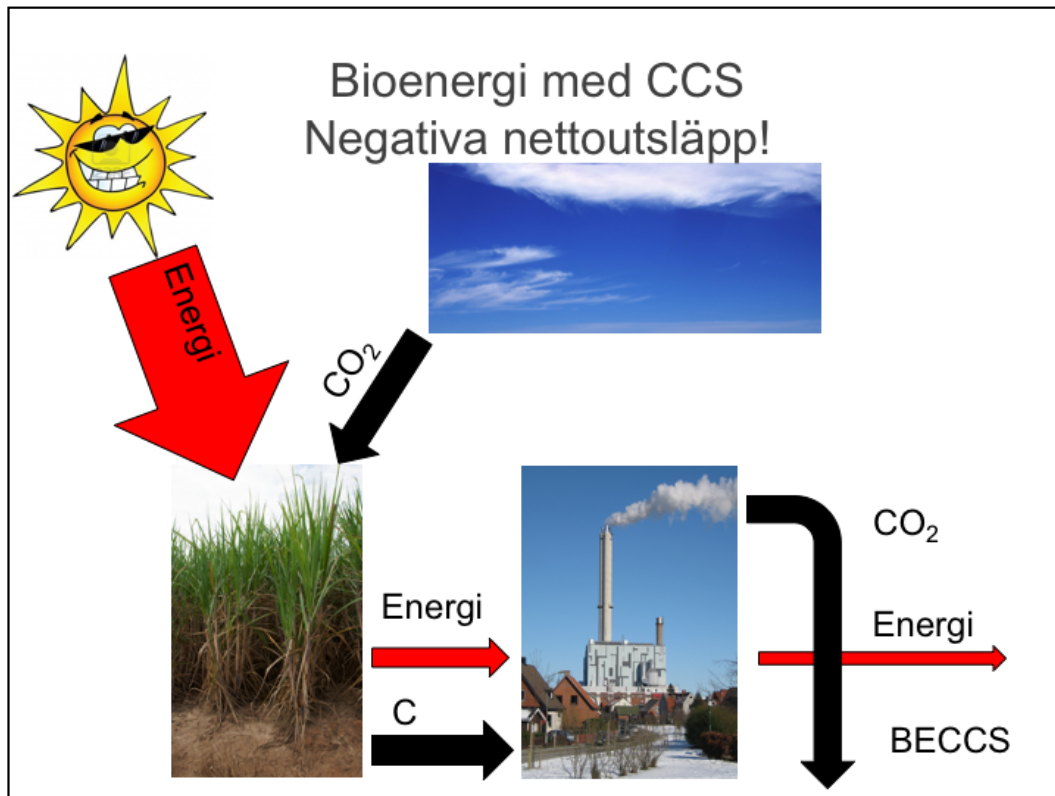
Amazonas – världens snabbaste  
jordbruksexpansion



## Bioenergi huvudkaraktistik

- Mycket arealkrävande
- Relativt begränsad resursbas (dvs produktiv mark för odling)
- Konkurrerar främst med mat om åkermark
- Produktionen kan ge upphov till växthusgasutsläpp
- Storskalig produktion kan bidra till avskogning – vilket påverkar klimatnyttan negativt

**Så var det en  
grej till...**



BECCS – Bio Energy Carbon Capture and Storage: kan ge negativa CO<sub>2</sub> utsläpp. Tar upp CO<sub>2</sub> från atmosfären (när växterna växer) och pumpar sen ner den i marken.

**Är bioenergi en bra  
lösning på energi-  
systemets utmaningar?**



## Kan ni redogöra för?

- De tre principiellt olika källorna för biomassa
- Vad bioenergi är och vad det kan användas till
- Ungefär hur stor potentialen är för bioenergi
- Varför bioenergi ofta räknas som klimatneutralt
- Vad som avgör bioenergins klimatpåverkan

## Vindkraft



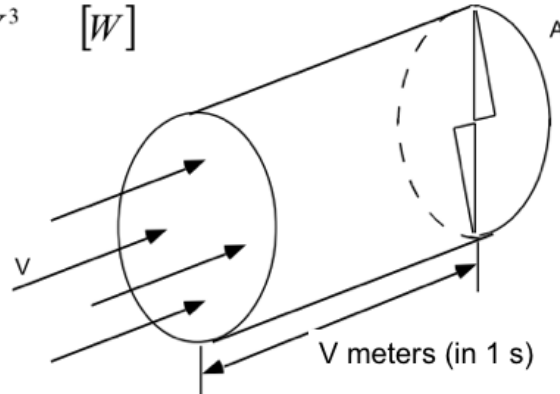
## Vindens energiinnehåll

$$P_{kin} = \frac{1}{2}(\rho AV)V^2 = \frac{1}{2}\rho AV^3 \quad [W]$$

Mass flow rate

$$\dot{m} = \rho AV$$

$\rho$  = air density [kg/m<sup>3</sup>]  
 $V$  = air velocity [m/s]  
 $A$  = rotor disk area [m<sup>2</sup>]  
 $m$  = mass of the air



**Men den maximala utvinningsbara energin är begränsad av Betz lag till 59 %!**  
**Varför?**

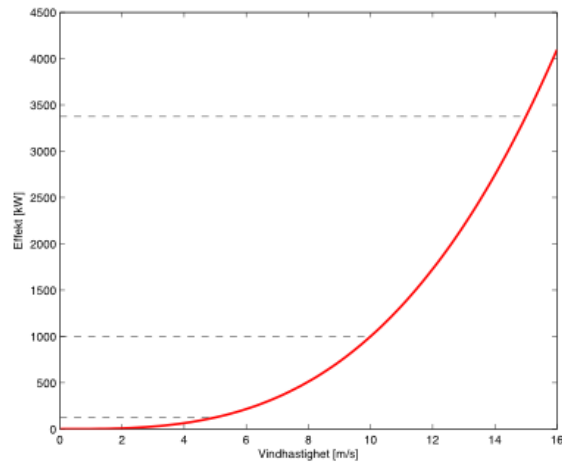
Vad avgör hur mycket energi man kan få ut ur vinden?

Vindkraftsekvationen: kan härledas från ekvationen för rörelseenergi.  
 $E = mv^2/2$

## Vindkraftsekvationen

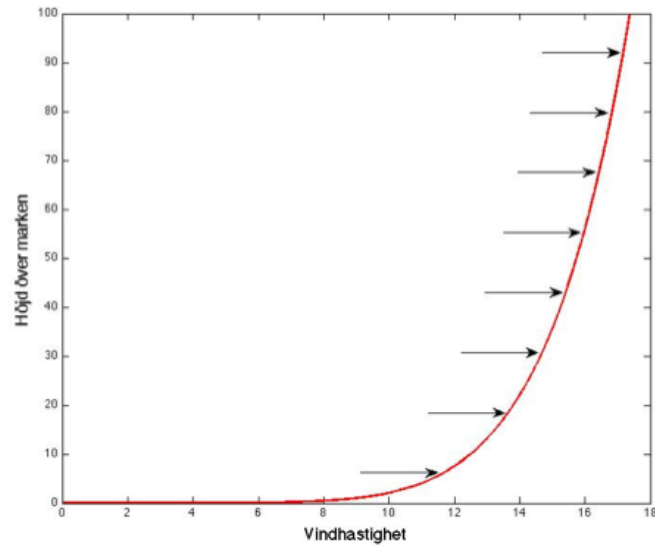
$$P_{el} = \eta \cdot \rho \cdot v^3 \cdot \pi \cdot \frac{d^2}{8}$$

## Effekten vs. vindhastighet



Högre vindhastighet=> mer effekt (dock till en viss grad. Över en viss vindhastighet så stängs vindkraftverken av).

## Vindprofil i höjled

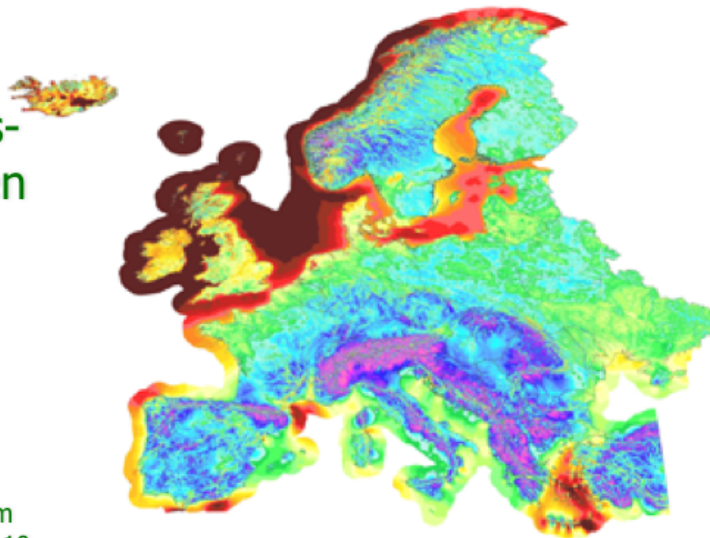


Högre höjd=> Högre vindhastighet=> mer effekt => Vi vill bygga höga vindkraftverk.

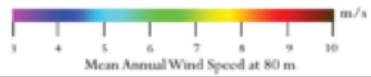
# Vindkrafts- potentialen

## Vind- resurser i Europa

Årsgenomsnittshastighet vid 80 m höjd. Mörkbrun = 10 m/s



Wind Resource of Europe at 2 km grid-cell resolution.  
SOURCE: Data and image developed by AWS Truepower for  
windNavigator®  
windNavigator.com | awstruepower.com



Lönar sig att bygga högt och där det blåser



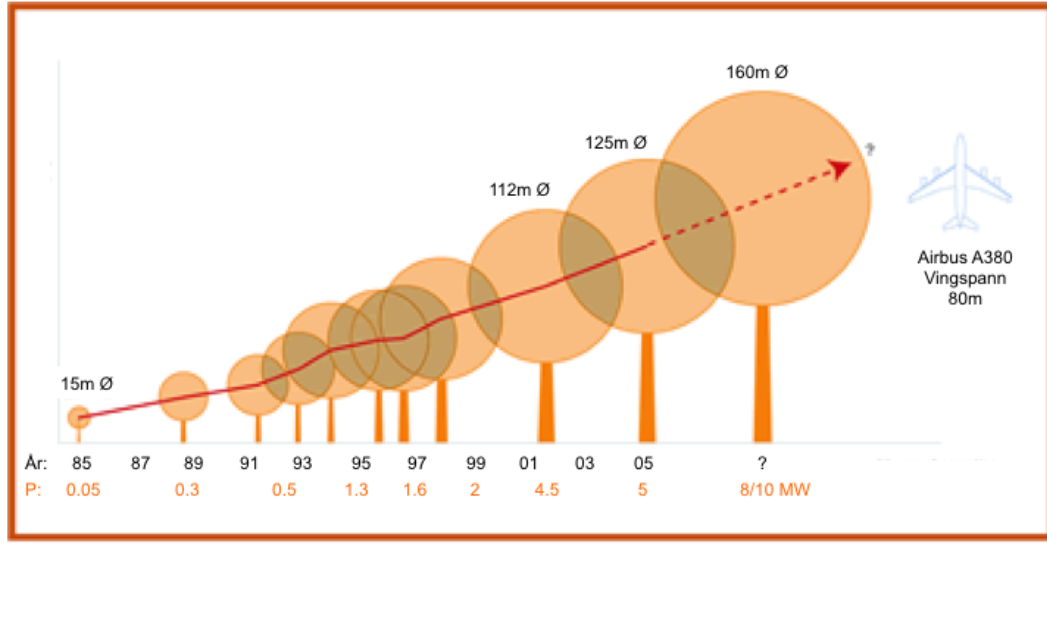
Bild: <http://beta.thehindu.com/sci-tech/energy-and-environment/article20147.ece>



## Vindkraftsekvationen

$$P_{el} = \eta \cdot \rho \cdot v^3 \cdot \pi \cdot \frac{d^2}{8}$$

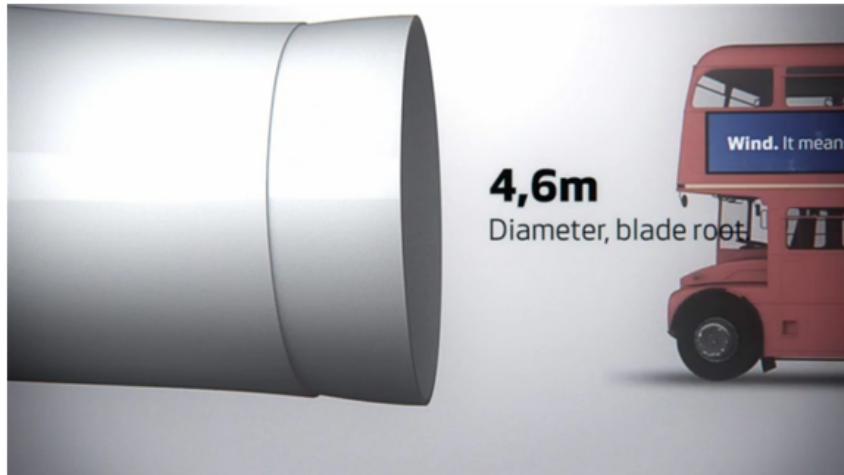
## Utveckling över tiden





<http://www.bloomberg.com/news/videos/b/60fa3ff5-4ce8-4d45-a794-03358d96ed87>

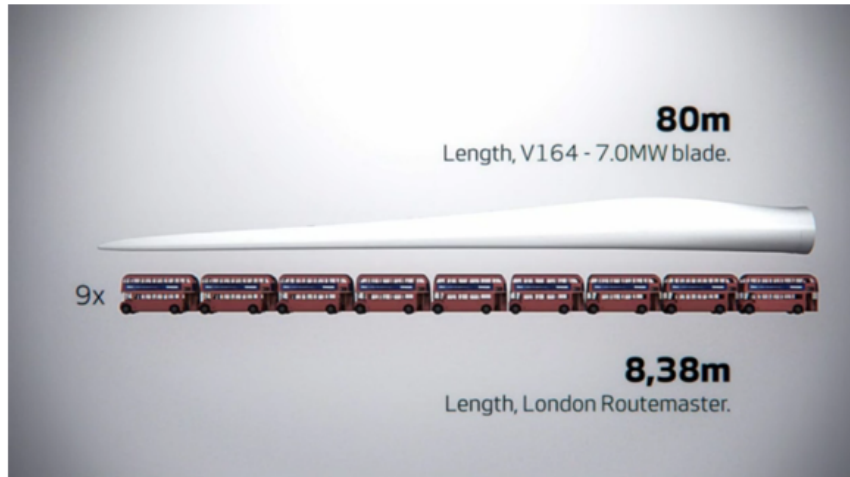
## Offshore wind turbine size (7 MW)



Källa: [www.vestas.com](http://www.vestas.com)

<http://www.bloomberg.com/news/videos/b/60fa3ff5-4ce8-4d45-a794-03358d96ed87>

## Offshore wind turbine size (7 MW)



Källa: [www.vestas.com](http://www.vestas.com)

## Offshore wind turbine size (7 MW)



Bladen når maximalt 187 m

Källa: [www.vestas.com](http://www.vestas.com)



Bild: <http://www.freegreatpicture.com/files/197/6681-wind-energy-image.jpg>



Arealbehov

## Vindkraft

- Runt 6-8  $W_p/m^2$
- 25–30 % Kapacitetsfaktor => runt 1–3  $W_{el}/m^2$  i snitt över året





## Energisystemet står inför 3 stora utmaningar



- Utvecklingsutmaningen
  - 2,4 Mdr människor är fortfarande beroende av traditionell bioenergi



- Resurs- & säkerhetsutmaningen
  - Ställa om från ändliga till förnybara energikällor, samt minska beroendet av energiimport



- Miljöutmaningen
  - Minska miljöpåverkan av energianvändning, framförallt klimatpåverkan

De syns och kan höras



## Vindkraft: För- och nackdelar

- Intermittent
- Buller
- Förändrar landskapsbilden  
NIMBY
- + CO<sub>2</sub>-fri och förnyelsebar
- + Stor potential, särskilt offshore
- + Billigt



Foto: [www.flickr.com/photos/rmwboeckmann](http://www.flickr.com/photos/rmwboeckmann)

## fågelproblemet (?)



average turbine: 4.3 birds/year  
average cat: ~5 birds/year

## “Energiåterbetalning”

- Vestas: 7-9 månader (1.65-2.0 MWs turbiner)
- Siemens Wind Power: 5-10 månader

Wind turbine manufacturer [Vestas claims that initial energy "pay back" is within about 7–9 months of operation for a 1.65-2.0MW wind power plant under low wind conditions,<sup>\[16\]\[17\]</sup> whereas Siemens Wind Power calculates 5–10 months depending on circumstances](#)



## Kommer ni ihåg – Vindkraft

- Stor potential
- Intermittent
- Kräver stora areor – ändrar landskapsbilden
  - Arealen kan dock användas till annat också
- Snabbt växande
- "Billigt"