

# Kemcyklisk förbränning

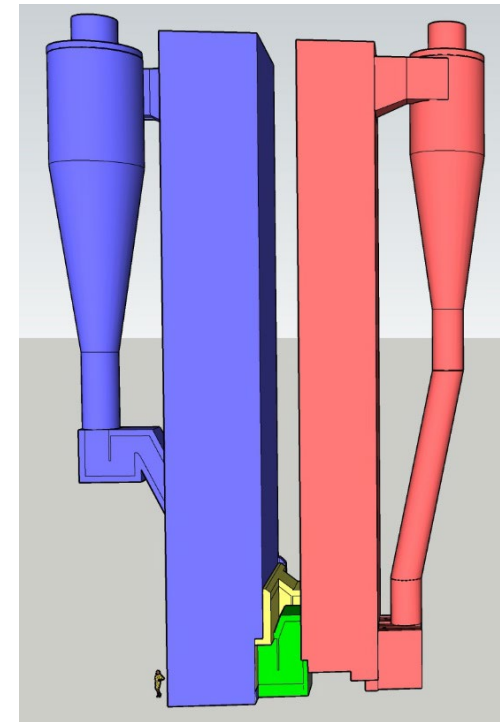
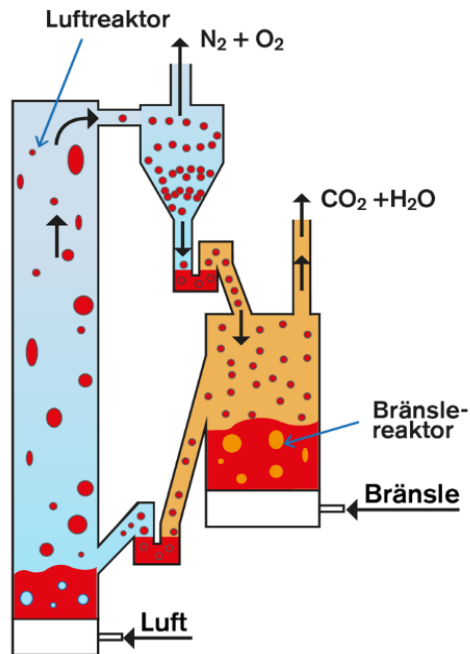
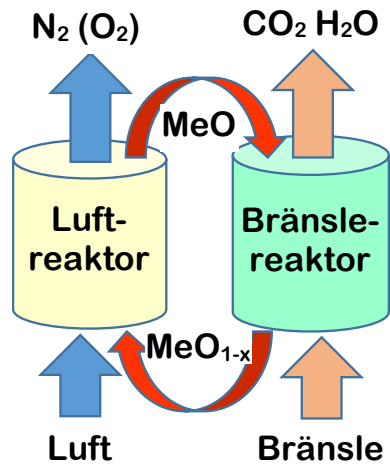
## En helt ny princip för förbränning

Anders Lyngfelt

Webbinar

Sektionen för Detonik och Förbränning

24 september 2024



CHALMERS



## **Ny princip för förbränning**

**Respiration (cellandning)      ~3 100 000 000 f.Kr**

**Förbränning                              ~1 000 000 f.Kr.**

**Bränslecell                                      1839**

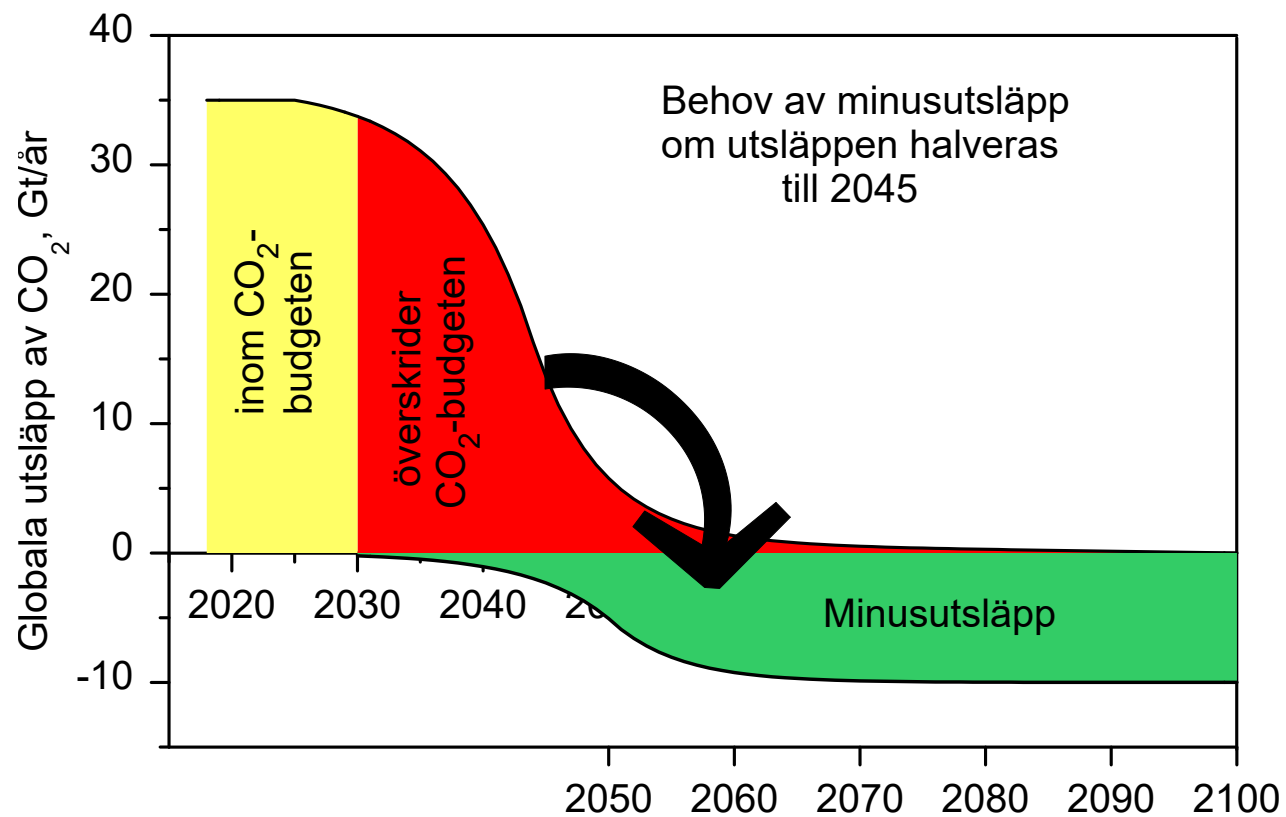
**Kemcyklisk förbränning                      2003**

## **Varför vill man använda kemcyklisk förbränning ?**

### **Fånga in koldioxid (CCS):**

- vid förbränning av fossila bränslen
- omvandling av naturgas till vätgas (ångreforming)
- vid förbränning av biomassa/biogent avfall för att få minusutsläpp

Koldioxidbudgeten (för max 1.5°C uppvärmning) är slut ungefär **2029**

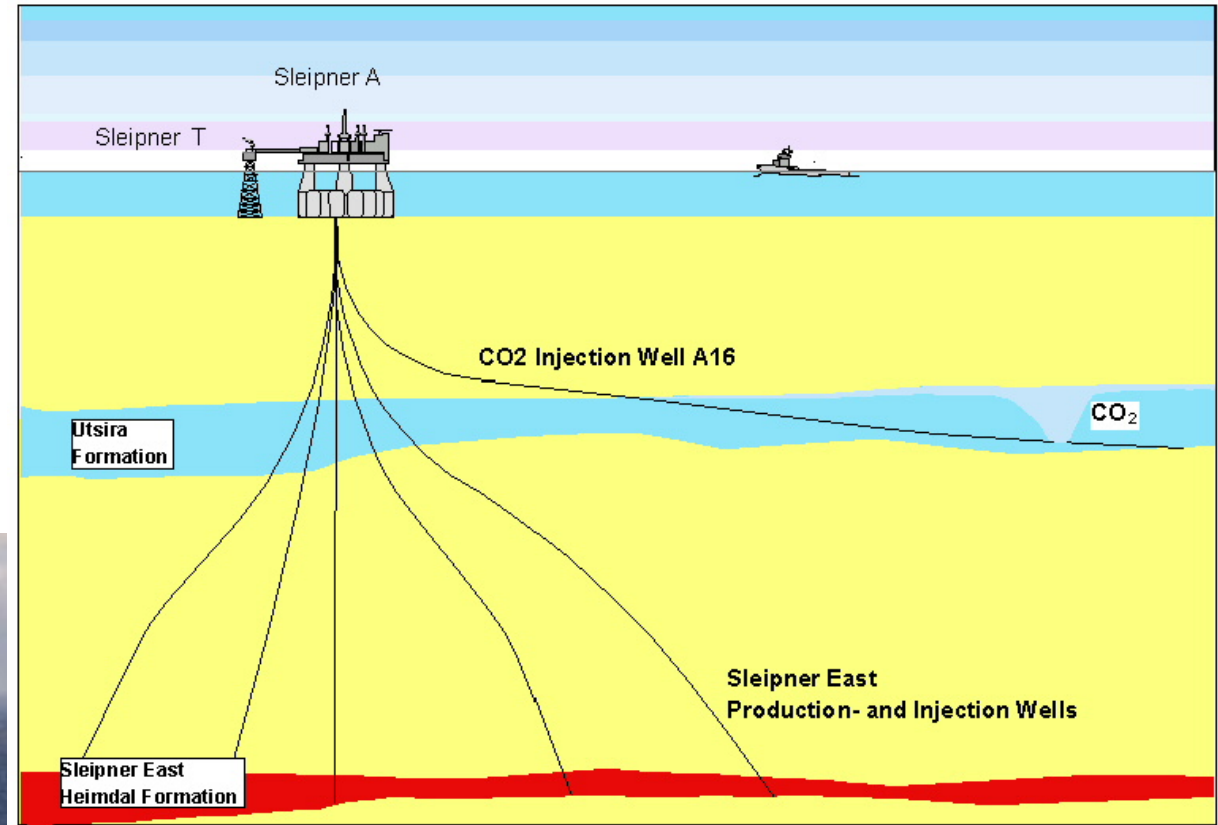


BECCS eller bio-CCS  
Förbränning av biomassa med  
koldioxidinfångning  
ger **minusutsläpp**

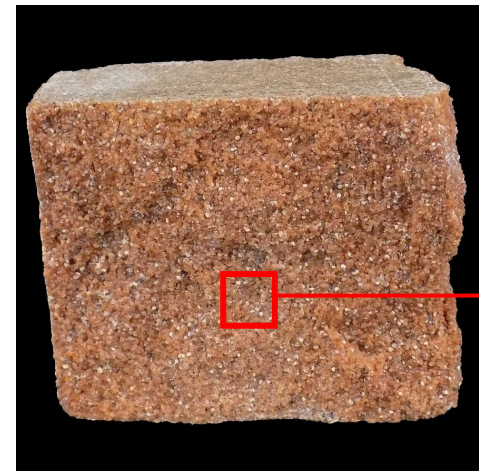


# SLEIPNER AQUIFER CO2 STORAGE

Exempel på lagring

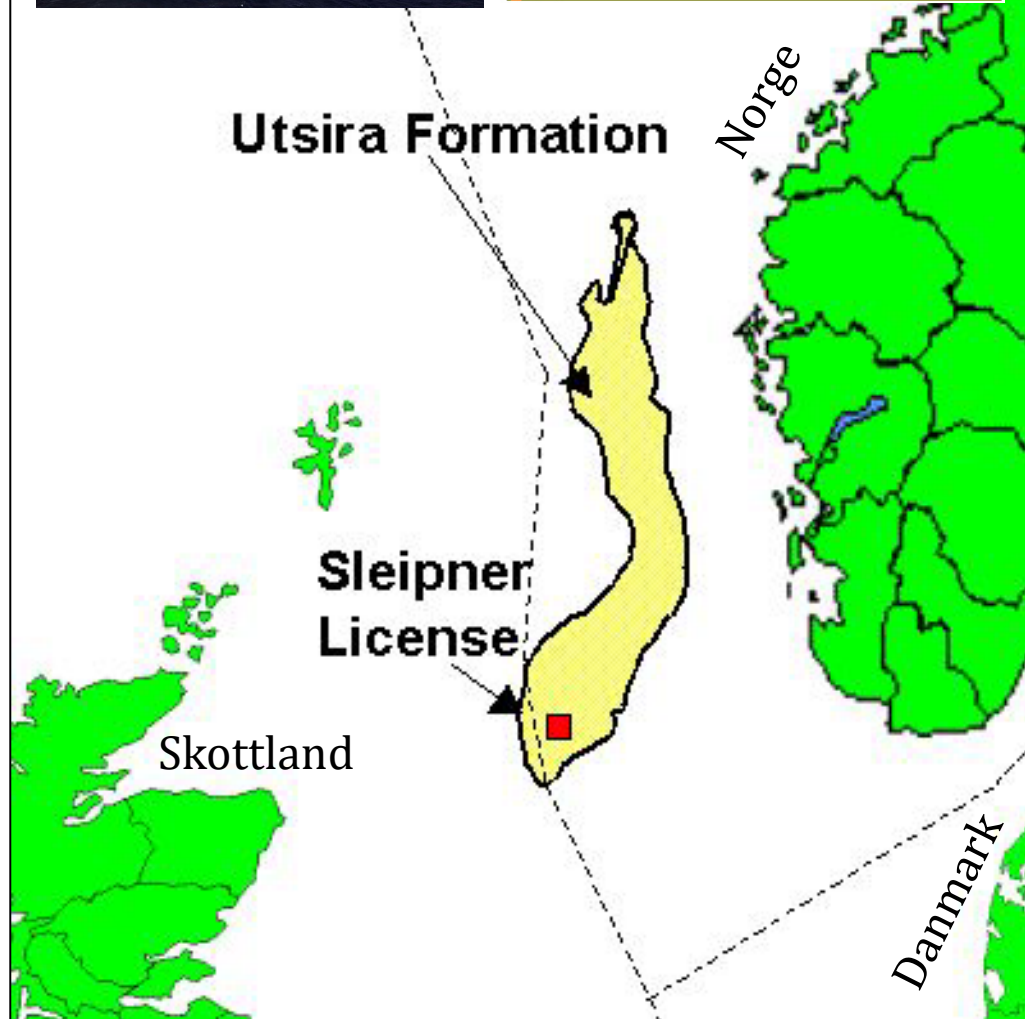
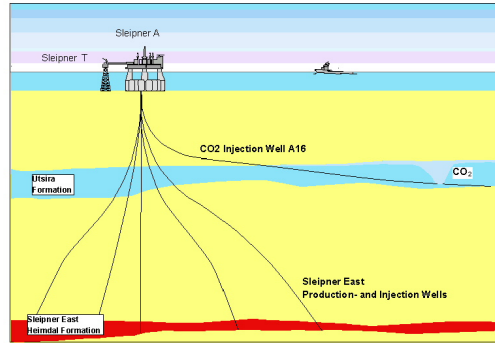


1 km  
5 km





## SLEIPNER AQUIFER CO<sub>2</sub> STORAGE

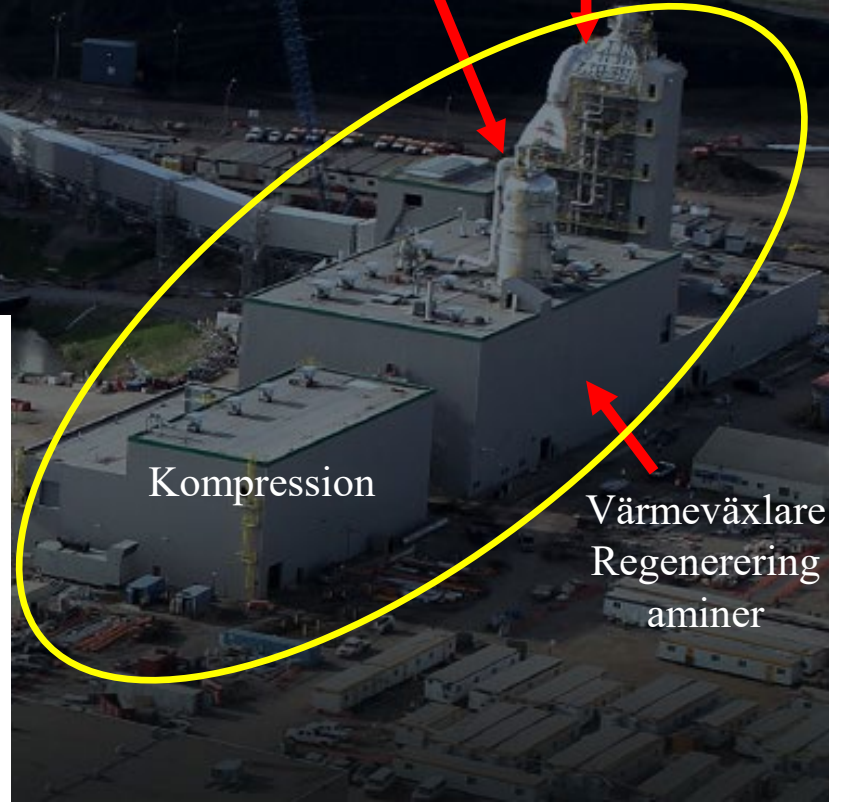
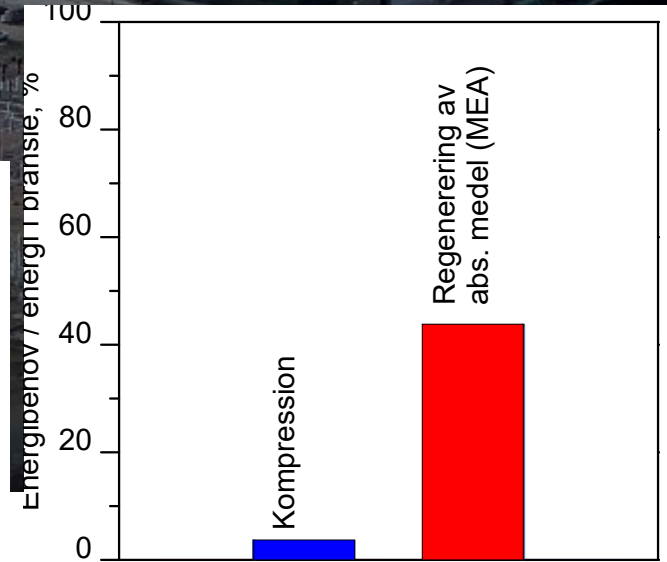
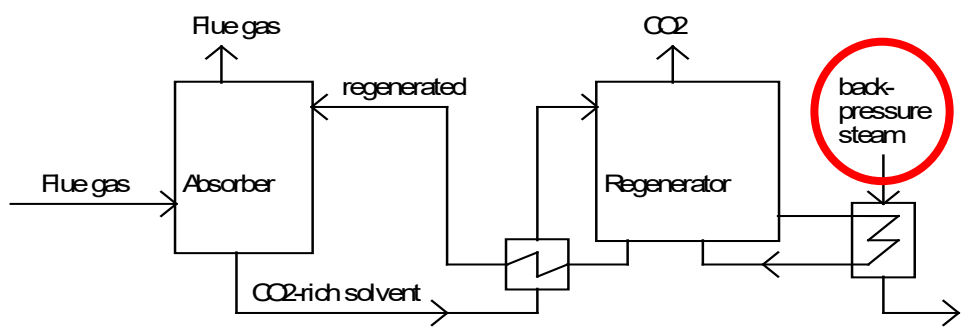
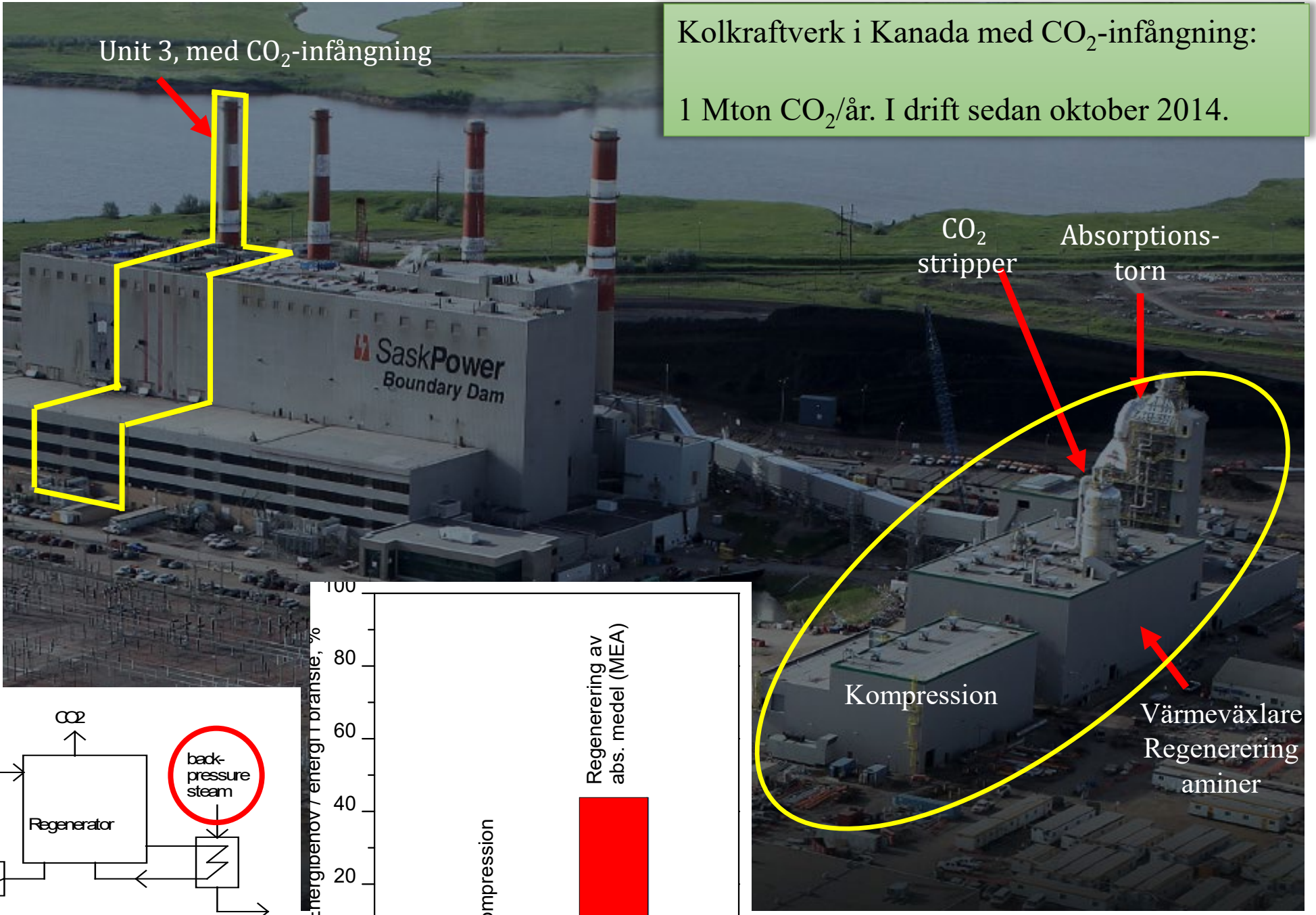


Lagring sedan 1996  
1 miljon ton CO<sub>2</sub>/år  
(3% Norges utsläpp)

Area: 26 000 km<sup>2</sup>  
Djup: 550 to 1500 m  
Höjd: 200-300 m  
Porositet: 30-40%

Exempel på koldioxid-  
infångning

Kolkraftverk i Kanada med CO<sub>2</sub>-infångning:  
1 Mton CO<sub>2</sub>/år. I drift sedan oktober 2014.





Problem:  
Gasseparation

Varför:

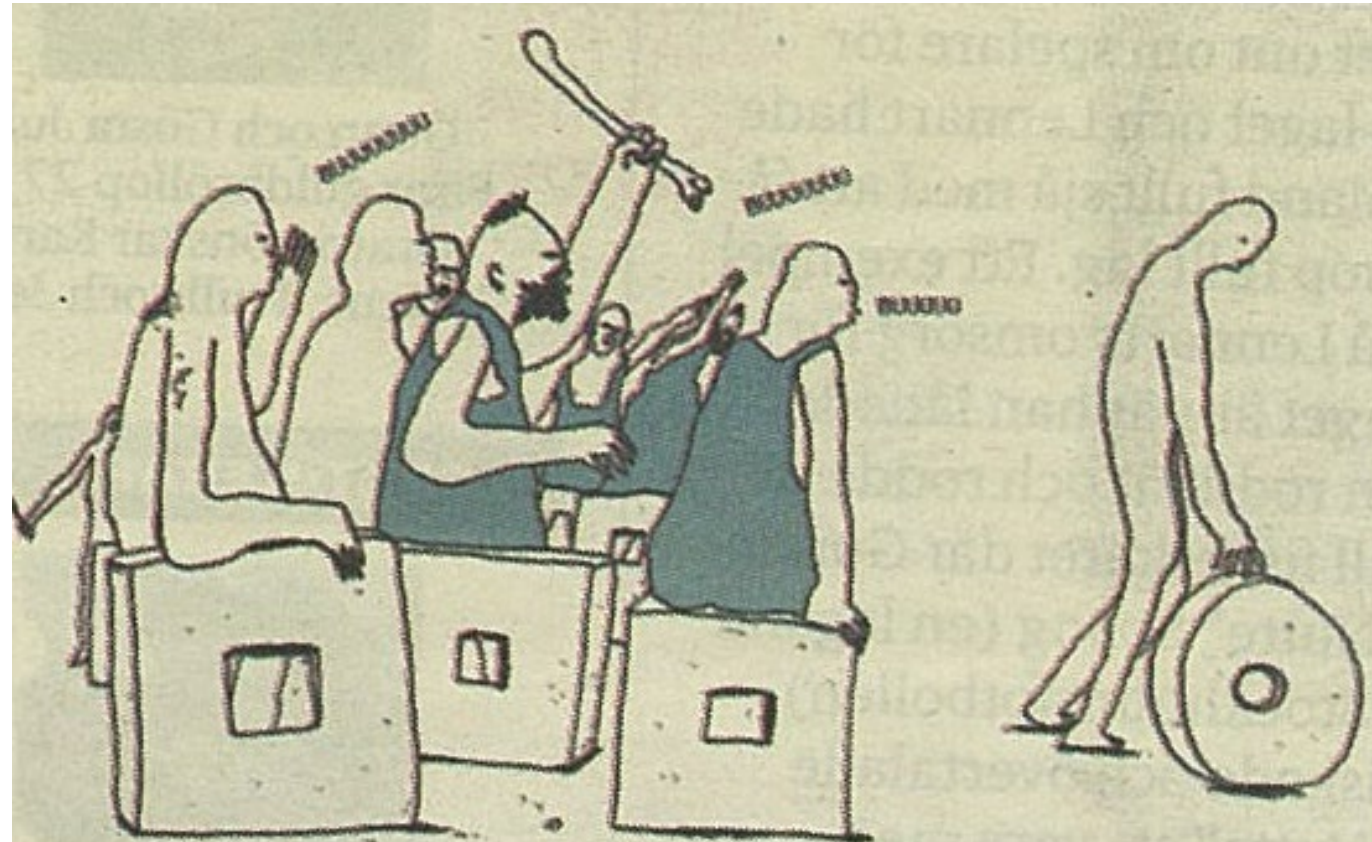
Vid normal förbränning blandas  
bränsle med förbränningsluft

>>

CO<sub>2</sub> blir utspädd i kväve

Kan det undvikas?

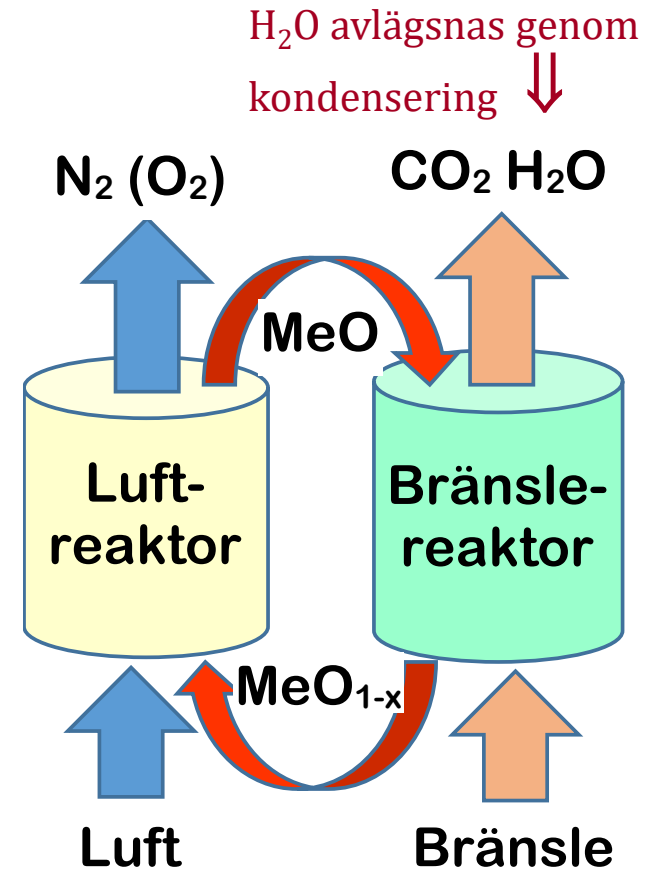
**Ja!**





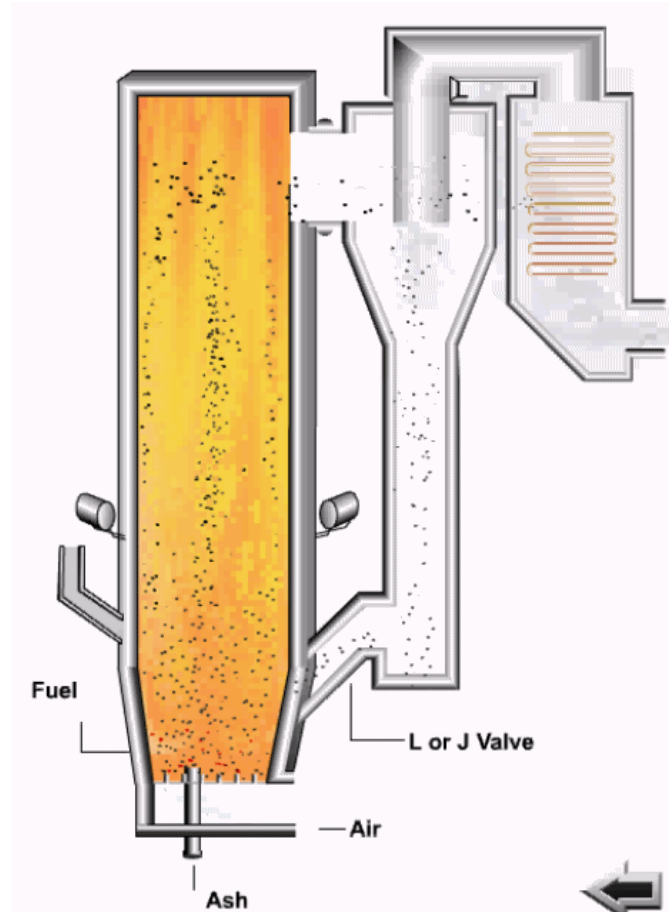
## Kemcyklisk förbränning (CLC = Chemical Looping Combustion)

- Syre transporteras från luft till bränsle med metalloxidpartiklar
- CO<sub>2</sub>-infångning följd av processen:
  - Bränsle och förbränningsluft *blandas aldrig*
  - Ingen *aktiv* gasseparation behövs
  - Stora kostnader och energiförluster för gasseparation kan undvikas

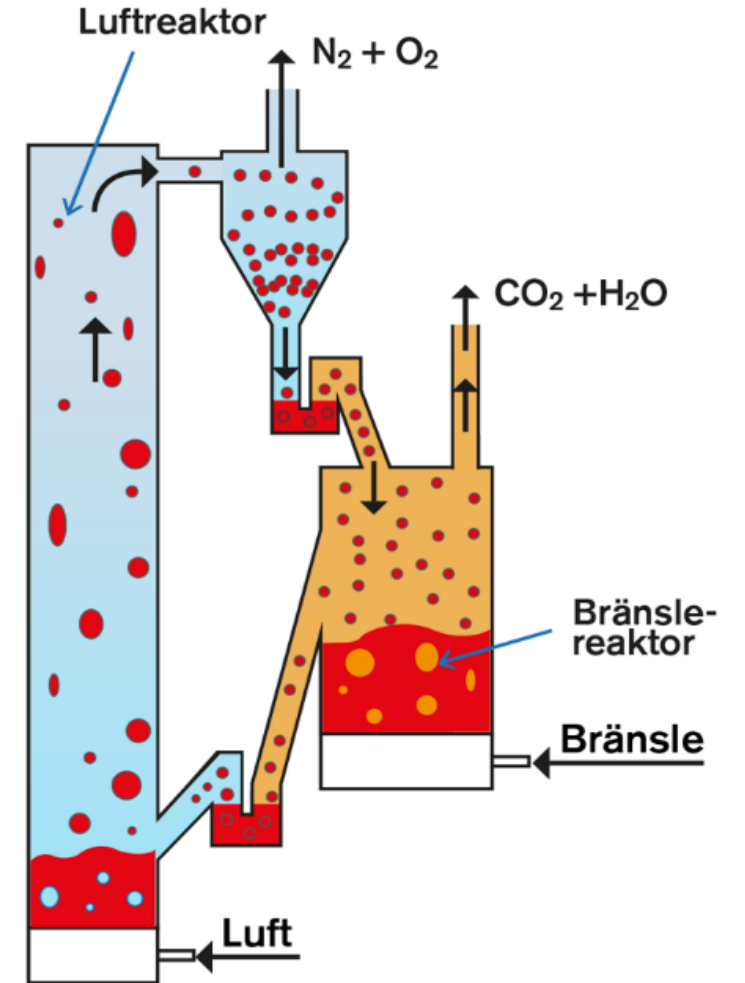


CLC-tekniken är nära släkt med cirkulerande fluidiserad bäddförbränning (CFB)

### CFB-panna

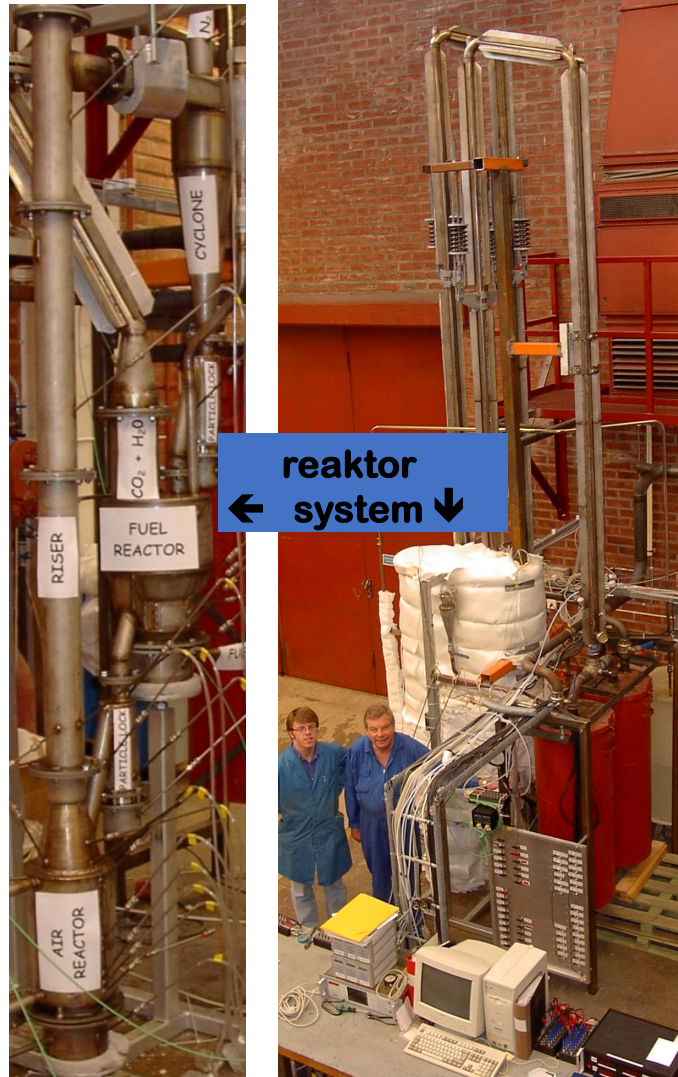


### CLC-panna

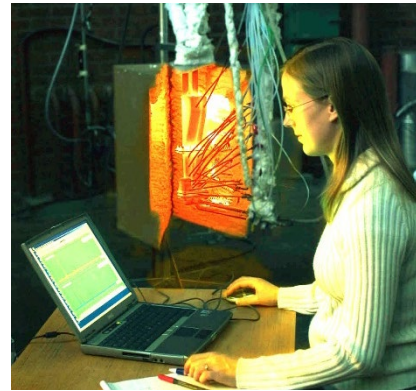


*Men, fungerar CLC i praktiken?*

# *JÅ, DET FUNGERAR !*



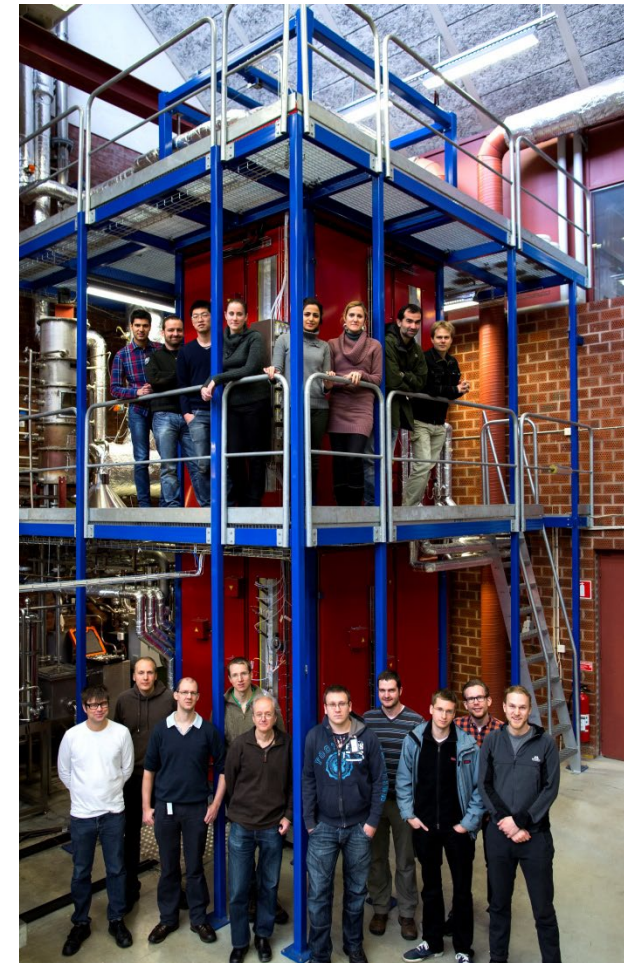
10 kW gas, 2003



300 W gas, 2004



10 kW fastbränsle, 2006



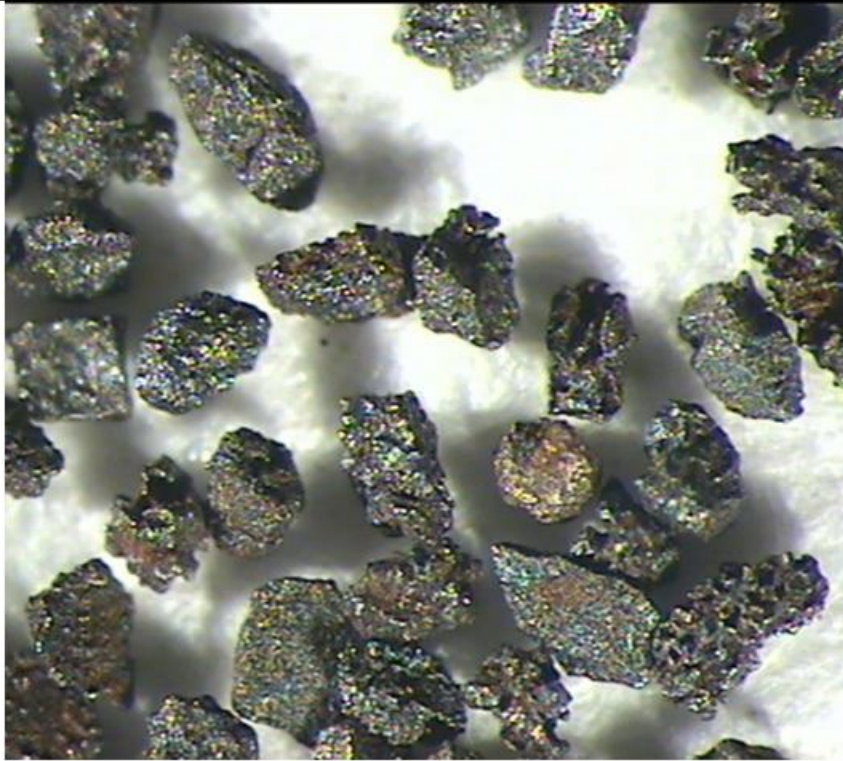
100 kW fastbränsle, 2011

Chalmers:  
Total drifttid med bränsle  
4 200 timmar

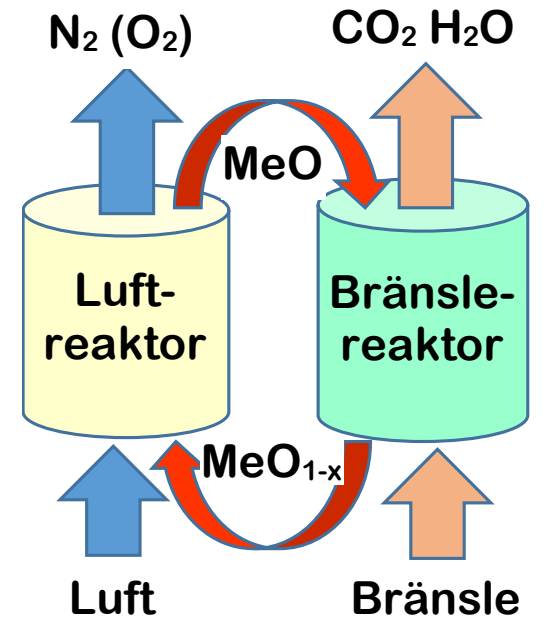
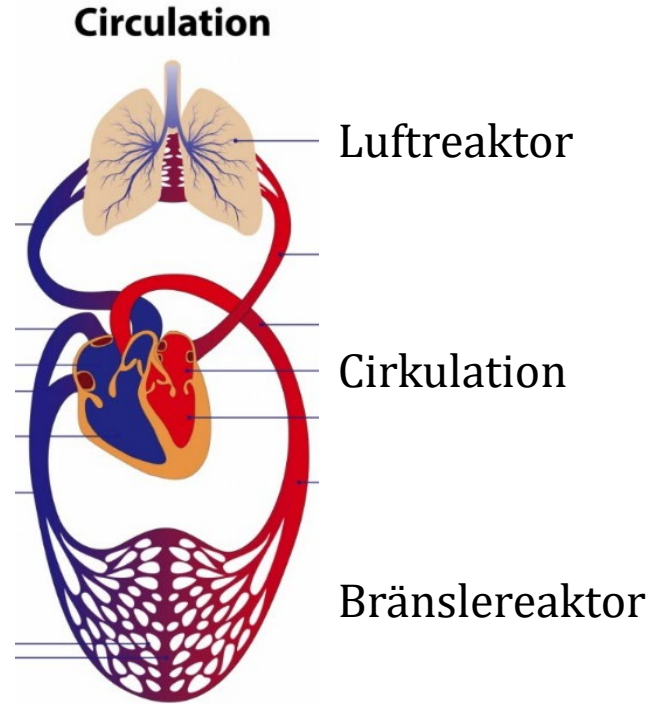
Globalt >12 000 h, i >50 piloter



# Syrebäraren är blodet i CLC



Manganmalm, 0,1-0,3 mm





**Driftstemperatur: 800 – 1100°C**

**Krav på syrebäraren:**

Tillräcklig reaktivitet

Rätt termodynamiska egenskaper:

- Reducerad form måste kunna oxideras i c:a 4% O<sub>2</sub>
- Oxiderad form måste kunna oxidera bränsle (till 100%)

Partikelegenskaper

- Låg förslitning
- Låg risk för agglomerering
- Bibehållen reaktivitet
- Liten risk för miljö och hälsa

Rimlig kostnad

**Interaktion (negativ/positiv) med aska och andra föroreningar  
(bränsle-N, bränsle-S) vid fasta bränslen**

Syrebärarsystem (oxiderad↔reducerad)

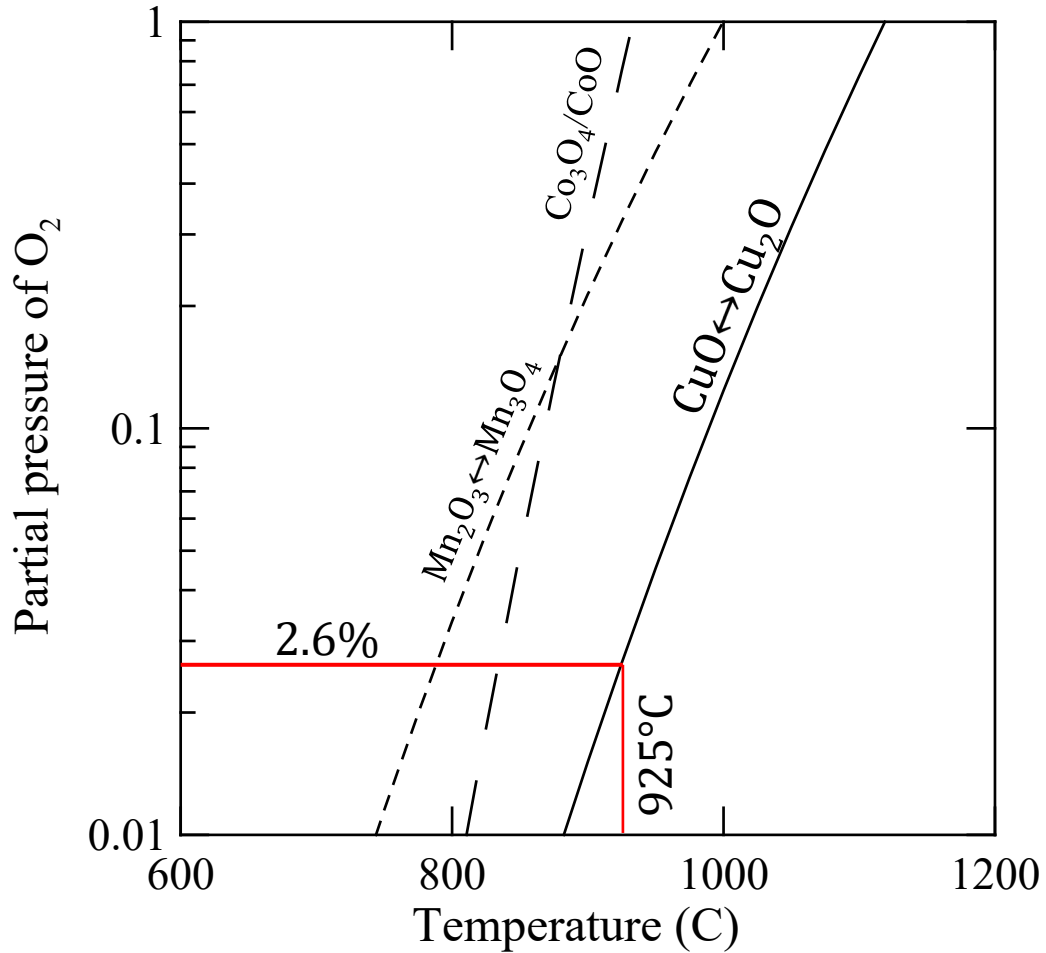
Monometalliska oxider:

- Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>↔Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>; Mn<sub>3</sub>O<sub>4</sub>↔MnO; CuO↔Cu<sub>2</sub>O/Cu; NiO↔Ni

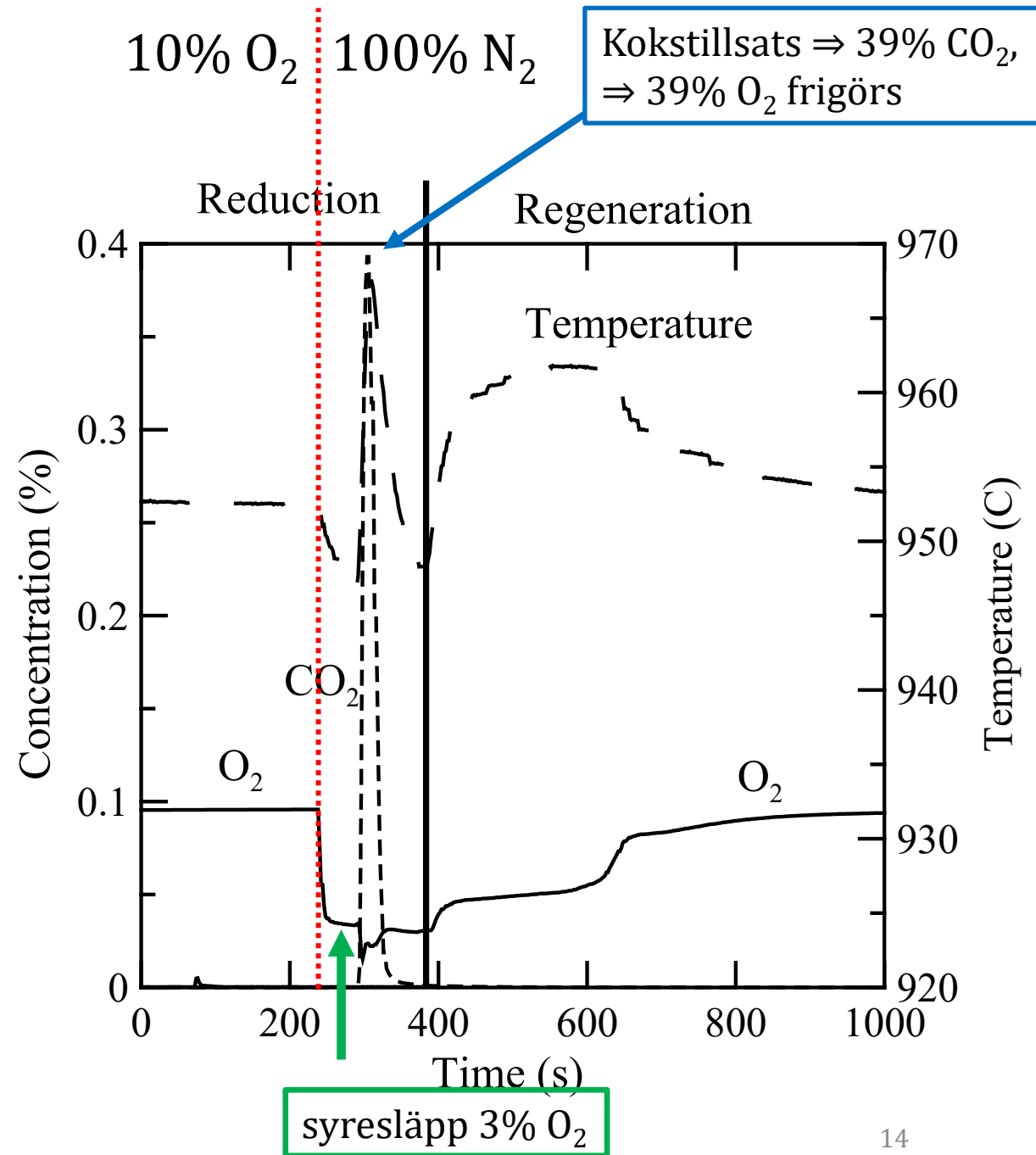
Kombinerade oxider:

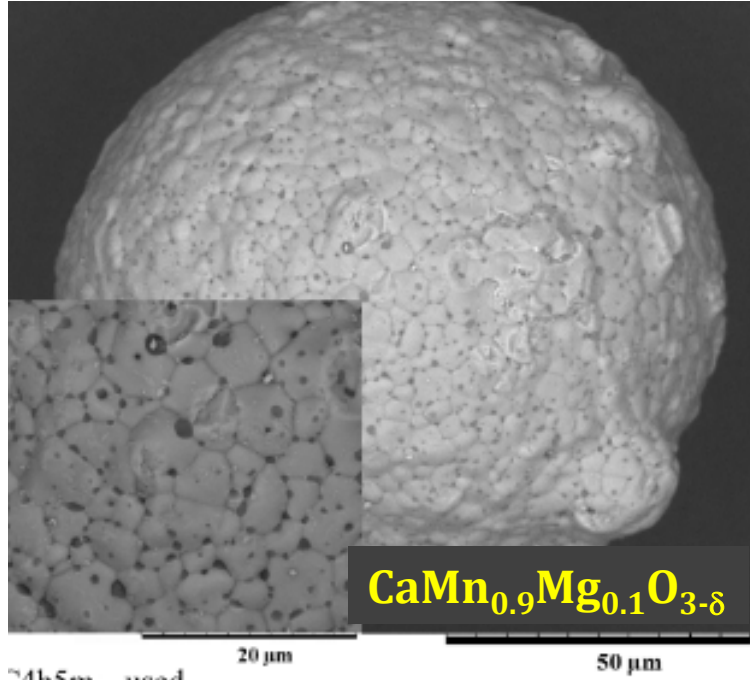
- Fe<sub>2</sub>TiO<sub>5</sub>+TiO<sub>2</sub>↔FeTiO<sub>3</sub>; (Mn,Fe)<sub>2</sub>O<sub>3</sub>↔(Mn,Fe)<sub>3</sub>O<sub>4</sub>;  
Mn<sub>7</sub>SiO<sub>12</sub>+SiO<sub>2</sub>↔MnSiO<sub>3</sub>; Mg<sub>2</sub>MnO<sub>4</sub>↔MgMn<sub>2</sub>O<sub>4</sub>+MgO

CLOU (Chemical-Looping with Oxygen Uncoupling)  
 Syrebärare som släpper syre



$CuO \leftrightarrow Cu_2O$  jämviktkoncentration  $O_2$  vid 925°C är 2.6%



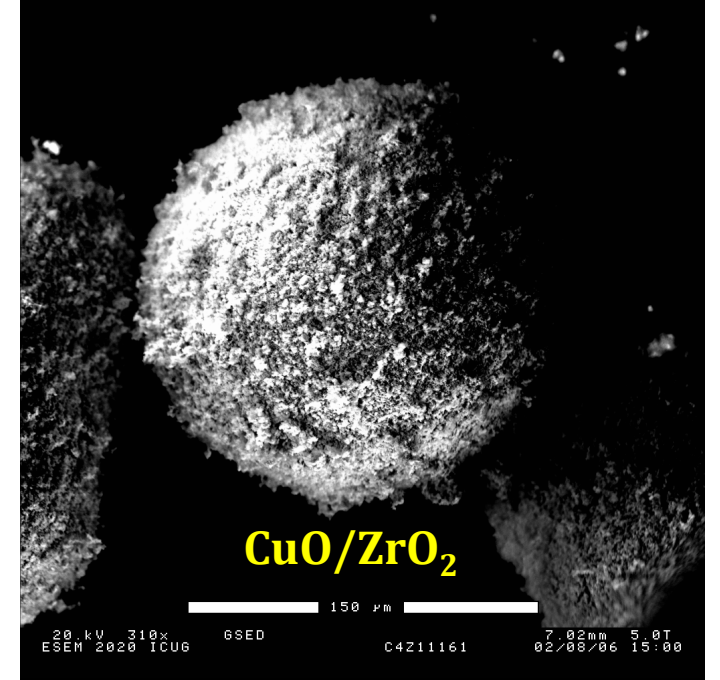


**$\text{CaMn}_{0.9}\text{Mg}_{0.1}\text{O}_{3-\delta}$**

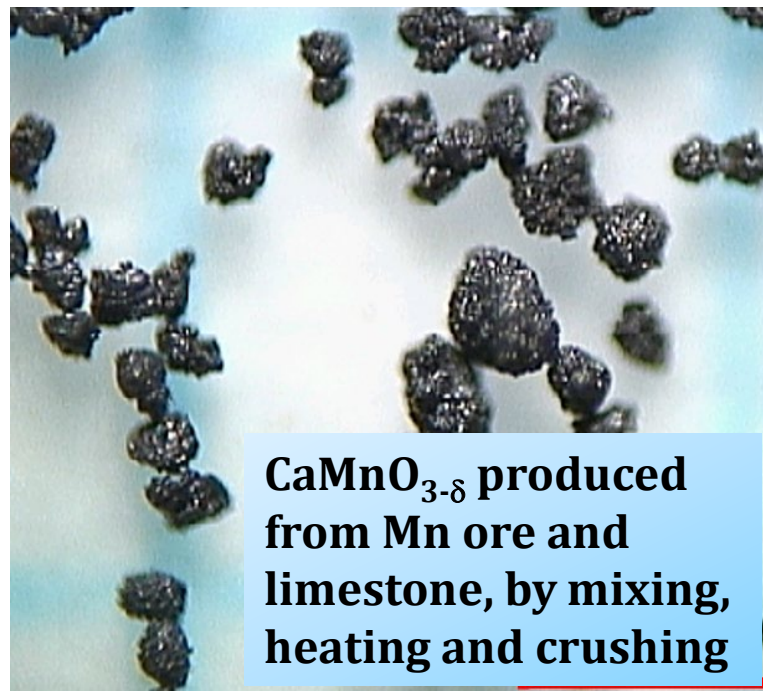
24h5m used



**Ilmenite ore (fresh)**



**$\text{CuO}/\text{ZrO}_2$**



**$\text{CaMnO}_{3-\delta}$  produced from Mn ore and limestone, by mixing, heating and crushing**



**Ilmenite ore (used)**



**Iron ore**



# Syrebärare

## Tillverkade monometalliska syrebärare (ofta används ett bärarmaterial)

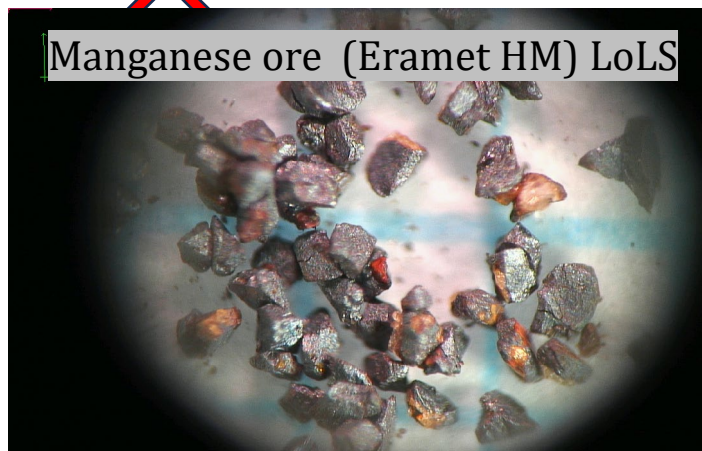
Järnoxid

Manganoxid

Kopparoxid\*

Nickoxid

(Cobaltoxid)



## Malmer och restprodukter

Ilmenit ( $\text{FeTiO}_3$ )

Manganmalm

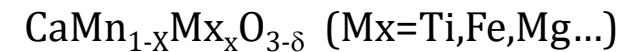
Järnmalm

Avfall med järn: Red mud, LD-slag, glödskal



## Tillverkade kombinerade oxider

*Bimetalliska kombinerade Mangan-material\**



Mn-Fe

Mn-Mg

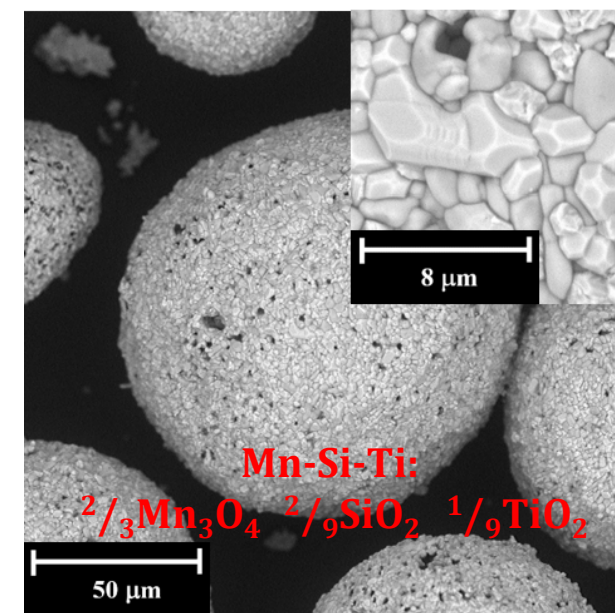
Mn-Si

...

*Ternära Mn-material\**

Mn-Si-Ti, Mn-Ca-Mg, Mn-Ca-Si, Mn-Ca-Fe,

Mn-Fe-Mg, Mn-Fe-Si, Mn-Si-Mg



\*CLOU material (släpper syre)



***Oxider av mangan, järn, koppar, nickel och kombinerade\* oxider*** har framgångsrikt använts i pilotdrift

Naturliga malmer med låg kostnad, t.ex. ilmenit-, mangan- och järnmalmer är väl lämpade för fasta bränslen.

Högreaktiva tillverkade material är lämpliga för askfria gasformiga bränslen,

till exempel kalciummanganat ( $\text{CaMnO}_3$ ):

- Full gasomvandling
- Lång livslängd
- Billiga råvaror

**Drifterfarenheten från 49 pilotanläggningar, 222 publications, 1/3 solid fuels**

Type	Oxygen carrier	Time of operation	Percent
Manufactured	NiO	<b>3291</b>	<b>28%</b>
	CuO	<b>1455</b>	<b>12%</b>
	Mn <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	<b>91</b>	<b>1%</b>
	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	<b>1842</b>	<b>16%</b>
	CoO	<b>178</b>	<b>2%</b>
	Combined	<b>1480</b>	<b>13%</b>
Natural ore or waste material	Fe ore	<b>1075</b>	<b>9%</b>
	Ilmenite	<b>1524</b>	<b>13%</b>
	Mn ore	<b>735</b>	<b>6%</b>
	CaSO <sub>4</sub>	<b>75</b>	<b>1%</b>
Total manufactured		<b>8337</b>	<b>71%</b>
Total natural/waste		<b>3409</b>	<b>29%</b>
<b>Total</b>		<b>11746</b>	<b>100%</b>

## Chalmers forskning inom CLC

26 år

Nära 500 vetenskapliga publikationer

Nära 300 granskade publikationer

25 doktorsavhandlingar

>20 000 citeringar

>500 syrebärare testade i labb

>70 syrebärare testade i pilotdrift

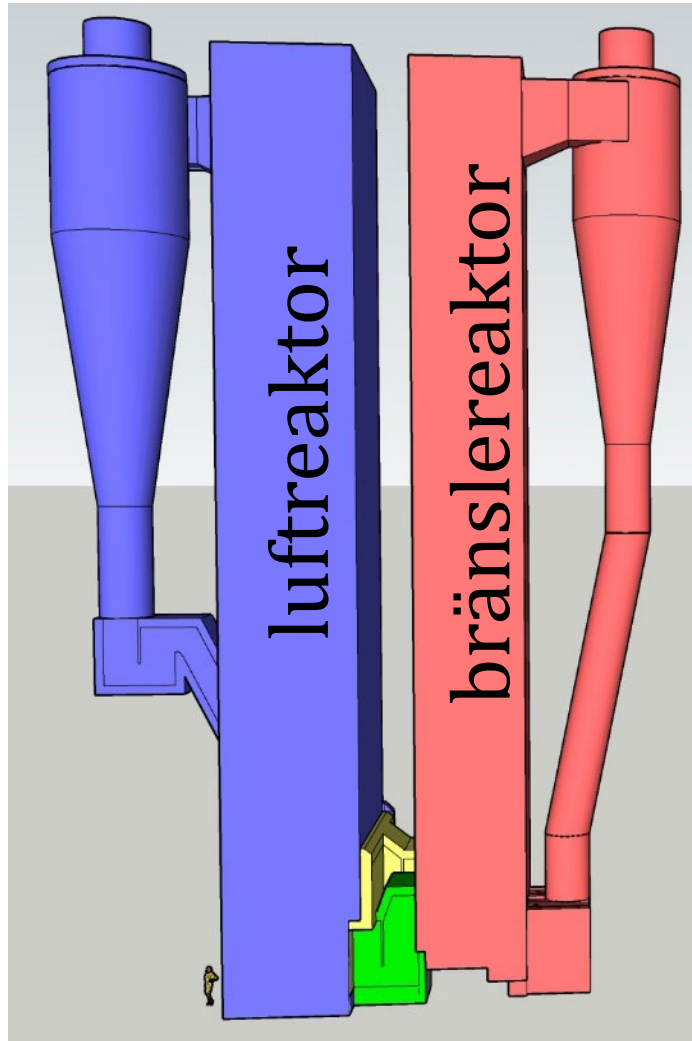
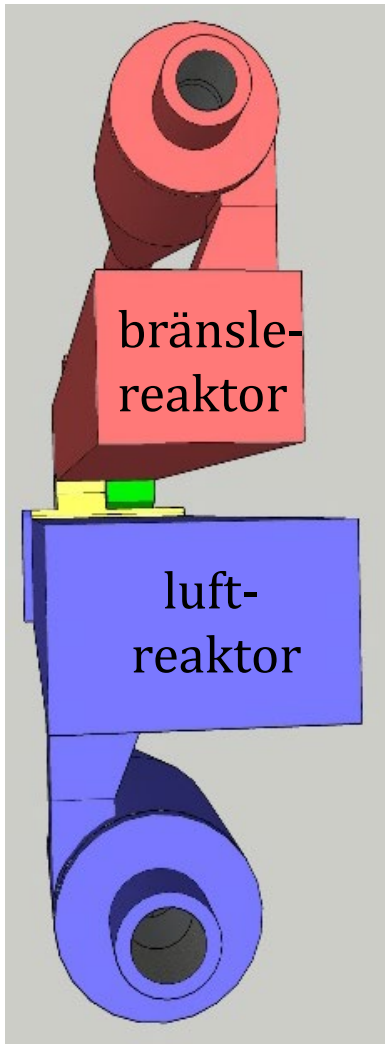
4 CLC-piloter med  $\frac{1}{3}$  av global drifterfarenhet

Nära samarbete med ledande partners i Europa i 11 EU-

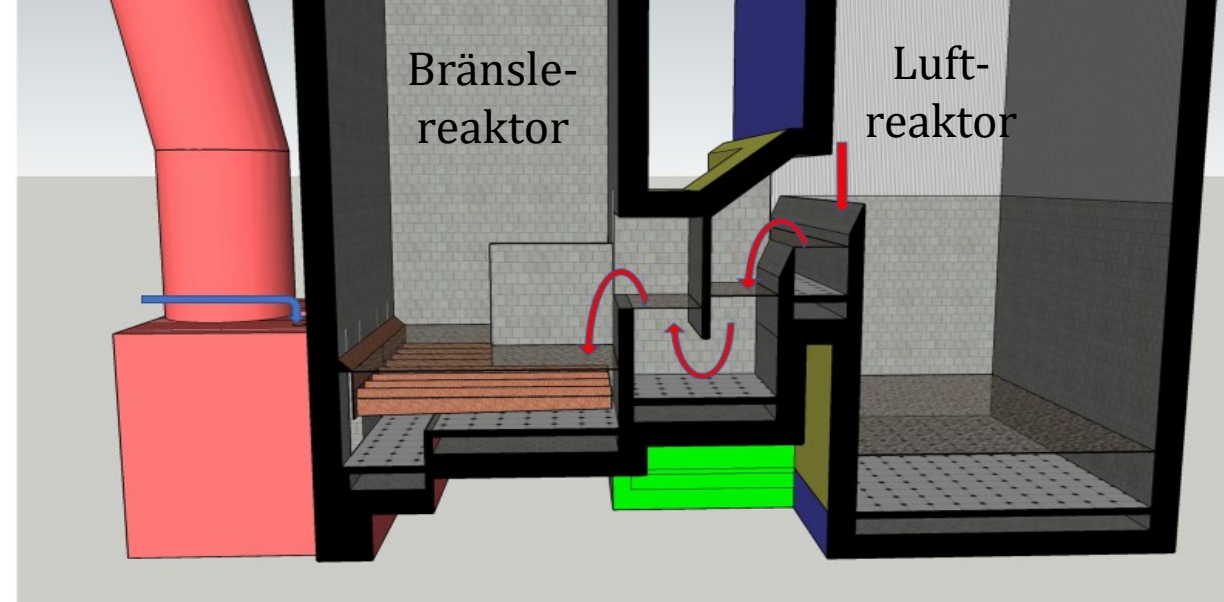
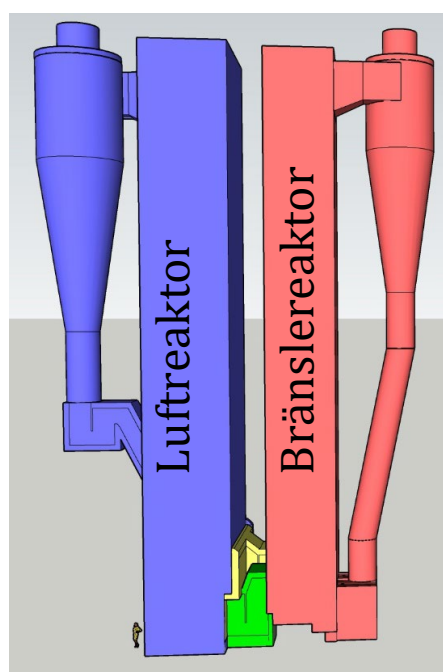
projekt

> 200 miljoner kr

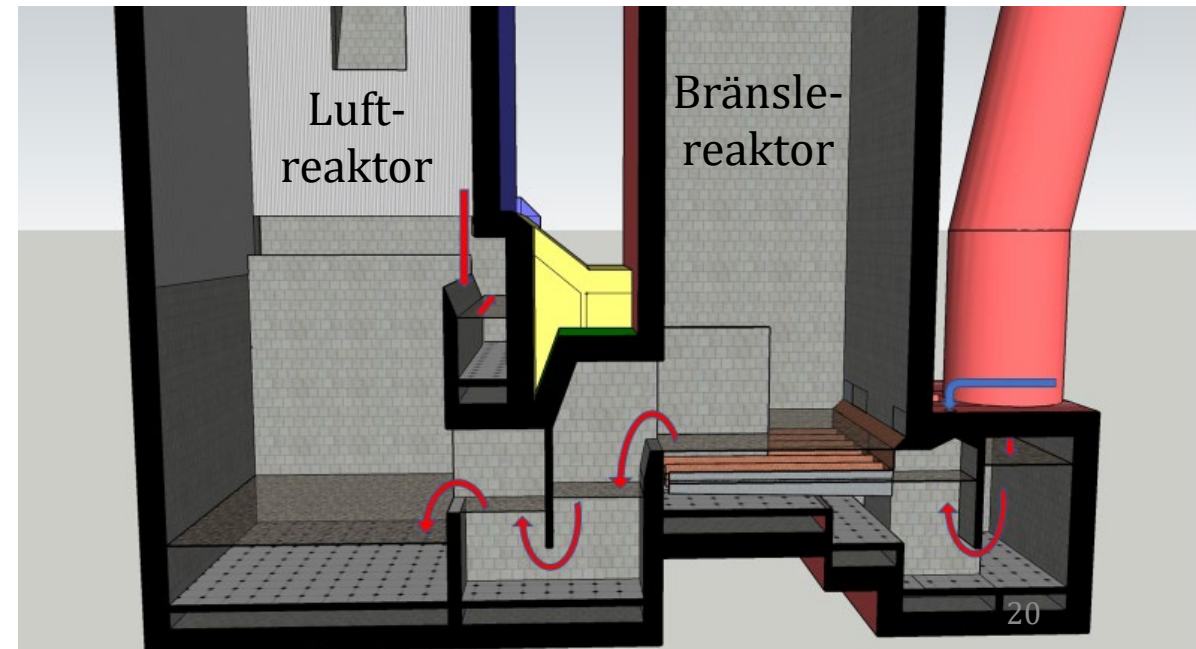
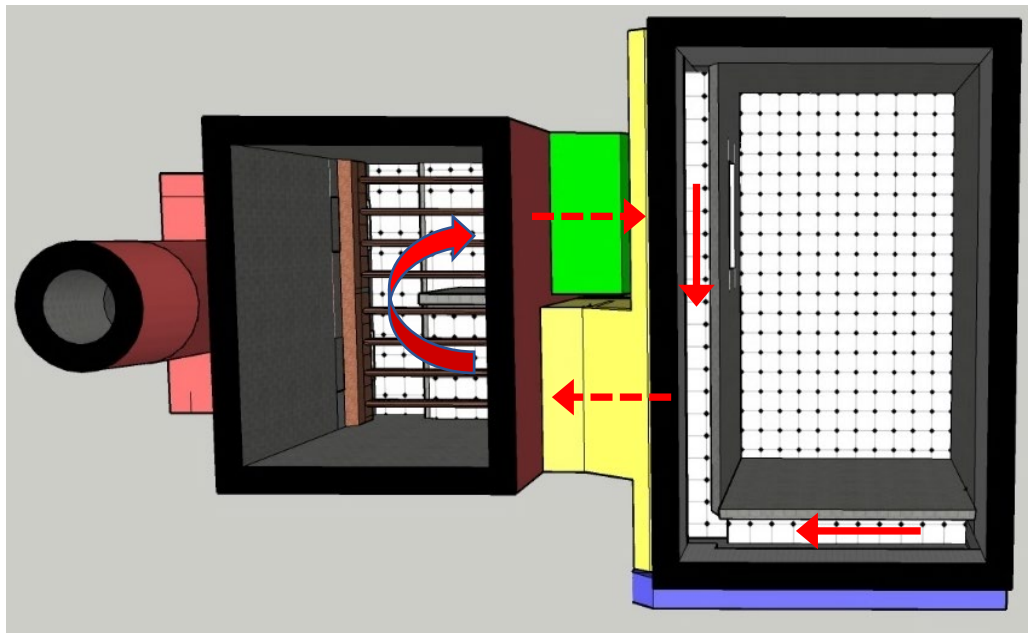
## 200 MW CLC-CFB panna, 40 m hög



*Luftreaktorn utformas så att den också kan användas som en vanlig CFB.*

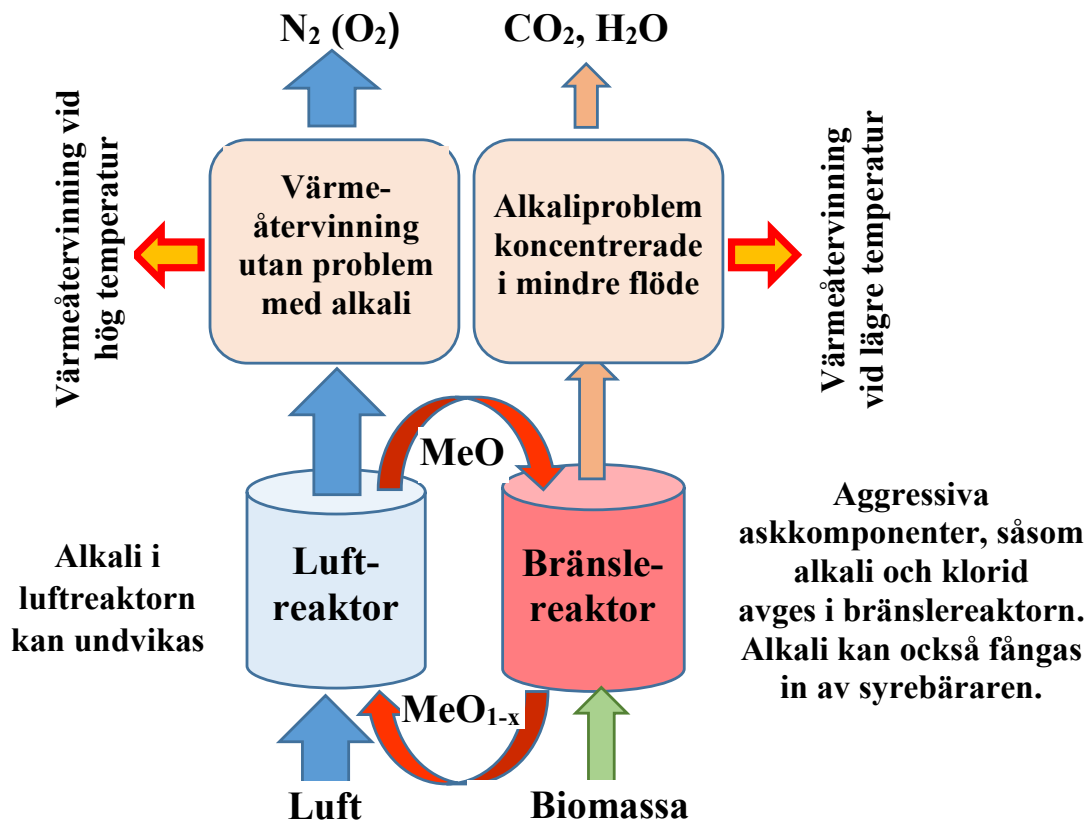


Roterad 180°





## Andra fördelar med CLC



Aggressiva askkomponenter, alkali och klorider, välkänt problem när biomassa eldas i fluidiserad bädd.

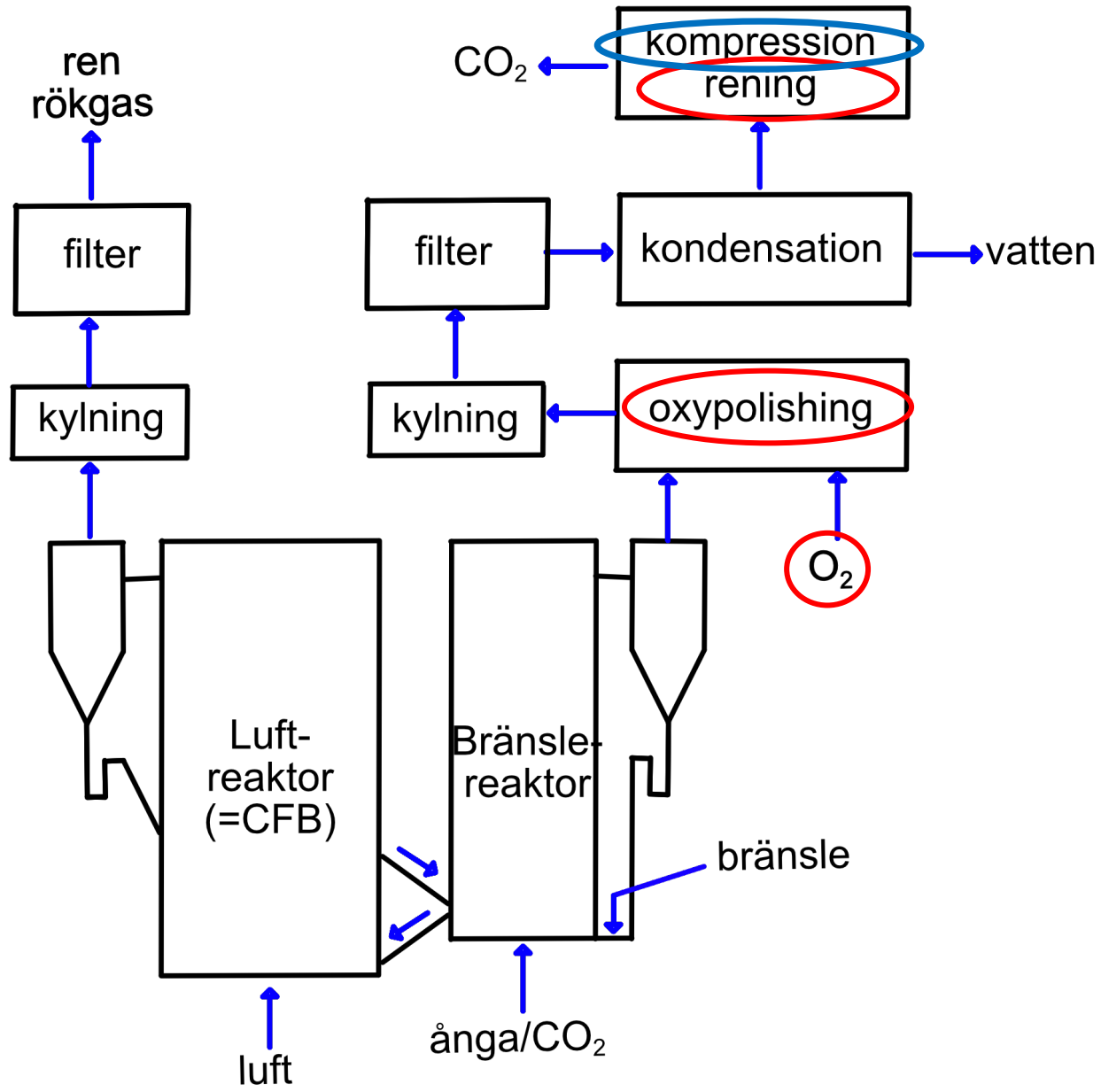
Med CLC koncentreras problemen till det mindre flödet från bränslereaktorn.

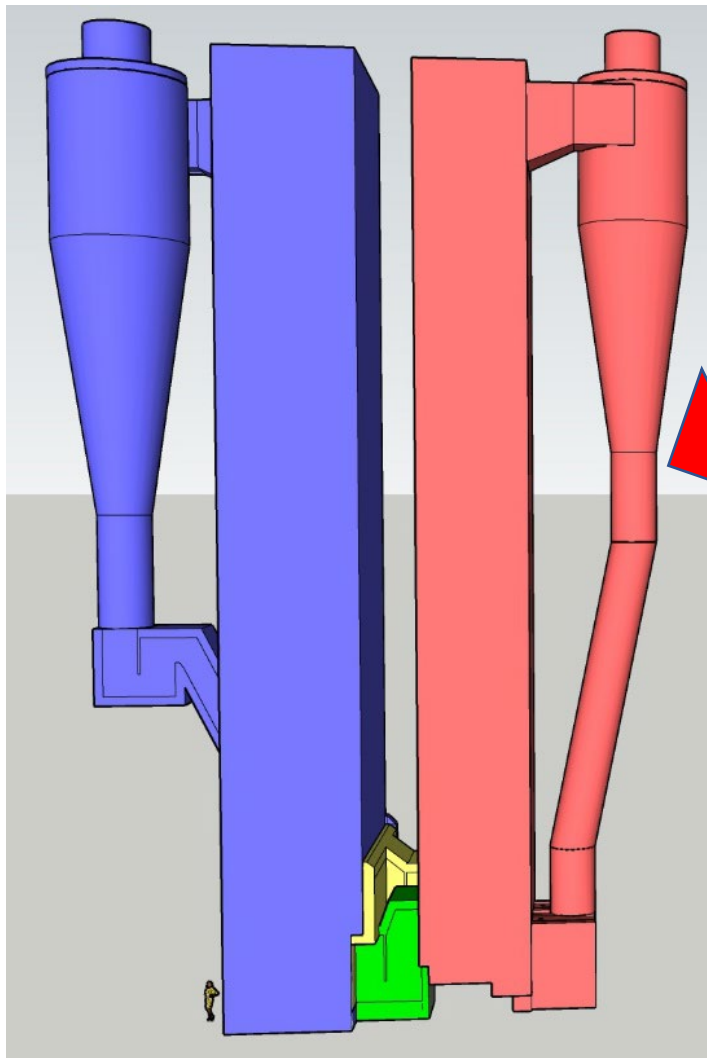
Med ilmenit som syrebärare ( $\text{FeTiO}_3$ ) bildar alkalin icke-klibbiga titanater.

Värmeåtervinning utan alkali i och efter luftreaktorn. Högre ångdata, mer el.

\*\*\*\*\*

Även kväveoxidutsläpp kan minskas/elimineras.





**Vad kostar en 40 m hög 200 MW<sub>t</sub> CLC panna ?**

**Merkostnad bränslereaktor:**

**1500 m<sup>2</sup> isolerad vägg kostar**

**20.000 kr/m<sup>2</sup>**

**1500 x 20 000 = 30 Mkr, eller ≈3 Mkr/år**

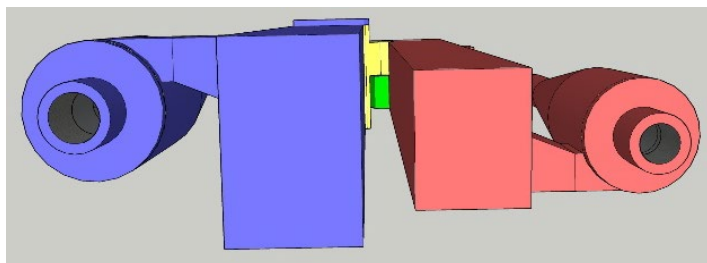
**delat med 0,4 Mton CO<sub>2</sub>/år**

**ger kostnad för bränslereaktor:**

**7,5 kr/t CO<sub>2</sub>**

**Konventionell koldioxidinfångning kostar**

**700-1000 kr/t CO<sub>2</sub>**



## Uppskattad kostnad CFB-CLC

stor kostnad

Kostnad	€/ton CO <sub>2</sub>	Intervall, €/ton CO <sub>2</sub>	Förlust elverkningsgrad, %
Kompression CO <sub>2</sub>	10	10	3
Oxy-polishing	6.5	4-9	0.5
CLC-panna, merkostnad	1	0.1-2.3	-
Syrebärare	2	1.3-4	-
Fluidisering bränslereaktor, ånga + CO <sub>2</sub>	0.8	0.8	0.8
Malning bränsle	0.2	0.2	0.1
Lägre luftfaktor	-0.5	-0.5	-0.5
<b>Totalt</b>	<b>20</b>	<b>15.9-25.8</b>	<b>3.9</b>

liten kostnad



(b)



Nya resultat från 60 h drift av en 5-6 MW CLC i Kina visar:

Mycket hög gasomvandling:  
syrebehov  $<3\%^*$

Hög  $\text{CO}_2$ -infångning:  
95%

\*Innebär att  $<3\%$  av syret måste tillföras i oxypolishing-steget.  
Behovet av gasseparation minskas med 97%!

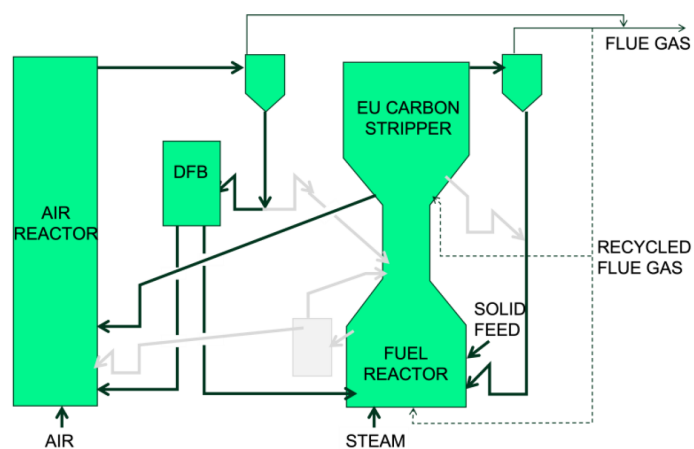


Figure 3: Schematic design for pet-coke combustion

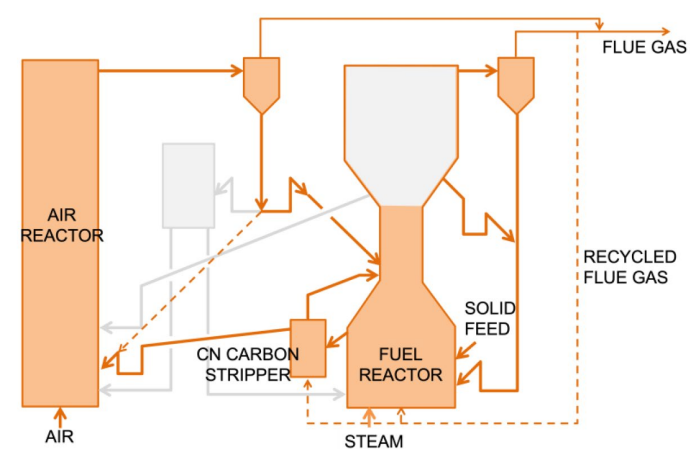


Figure 4: Schematic design for lignite combustion

# Kemcyklisk förbränning (CLC)

Tekniken liknar vanlig cirkulerande fluidiserad bäddförbränning

Högkoncentrerad CO<sub>2</sub> kan fås till liten extra kostnad

Kostnad per ton CO<sub>2</sub>: 25-50% av konkurrerande teknologier

Fungerar med biomassa

Kan också användas för avfall, kol, eller för att göra "blå" vätgas

Kan eliminera/minska utsläppen av NO<sub>x</sub>

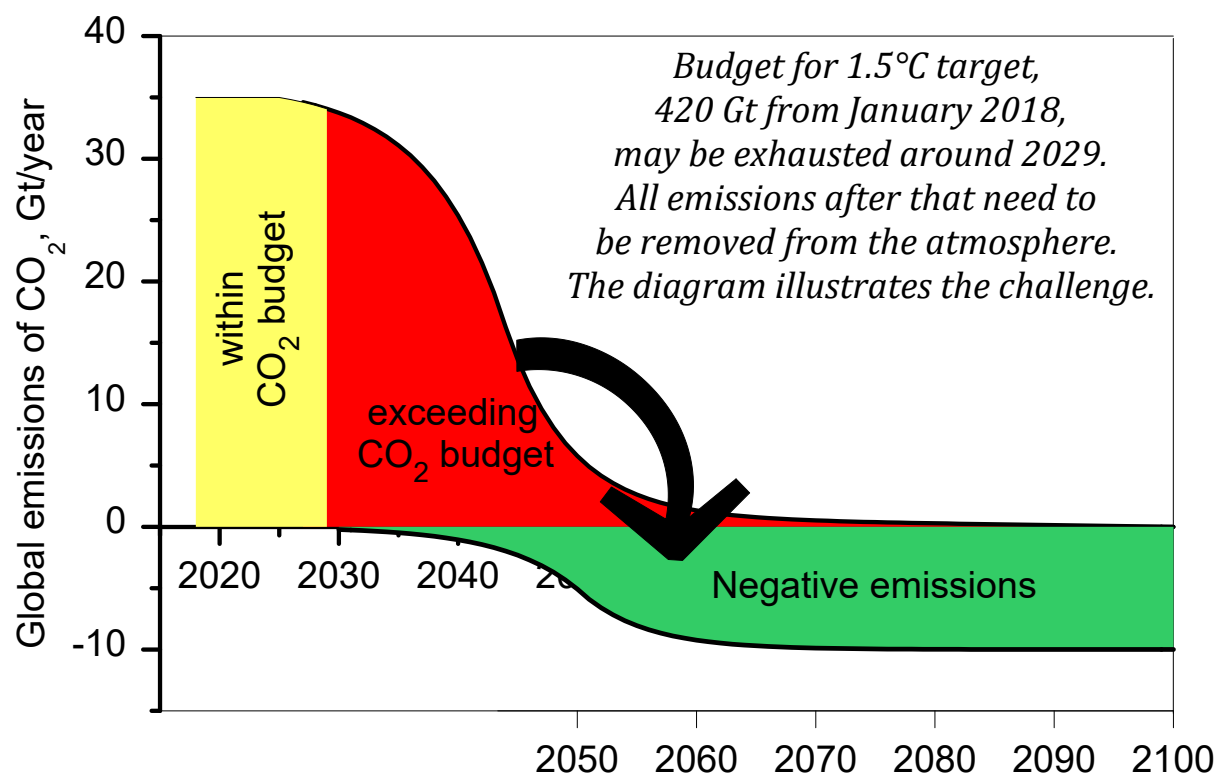
Kan eliminera/reducera problem med besvärliga askkomponenter

*Riktig marknad för minusutsläpp saknas – dåligt intresse från industrin att engagera sig i utveckling*

# Kan vi klara Parisavtalet?

- Globala koldioxidbudget för +1,5°C slut 2029
- För att klara budgeten måste alla CO<sub>2</sub>-utsläpp efter 2029 tas bort från atmosfären.
- Våra barn får ärva en gigantiskt klimatskuld (kanske 800 Gt CO<sub>2</sub>, eller 100 ton/capita, eller >100 000 kr/capita globalt).

- **Förslag om realistisk finansiering av dessa negativa utsläpp saknas**



Lämnar vi över ett *olösligt* problem  
till våra barn och barnbarn?

Förslag:

## **Producentansvar för CO<sub>2</sub>**

De som släpper ut CO<sub>2</sub> görs ansvariga för att ta bort sina utsläpp från atmosfären

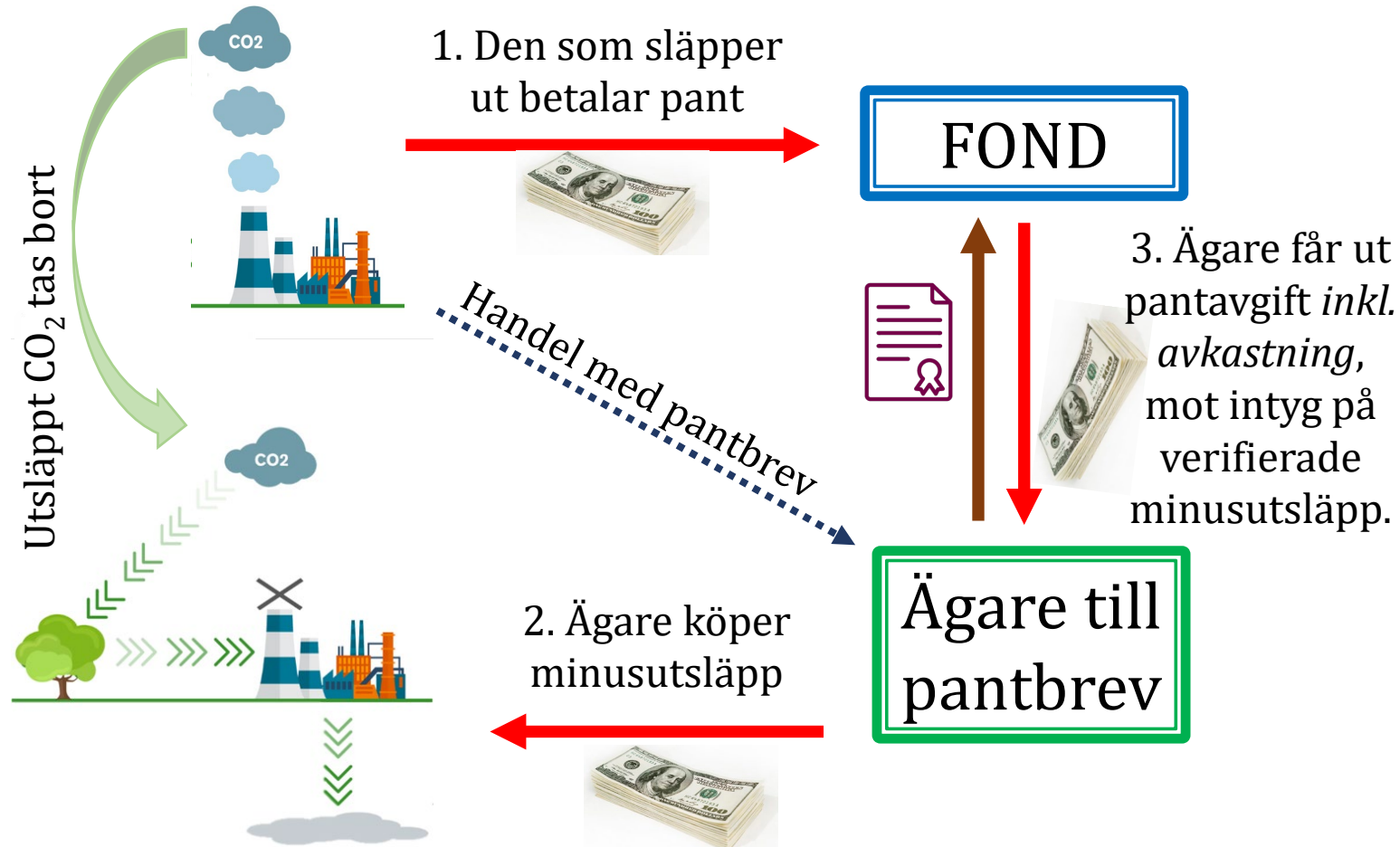
Enkelt, rimligt, begripligt, rättvist, rationellt, hållbart,  
vilket borde underlätta acceptans

Det skulle också ge ett bra incitament för att inte släppa ut CO<sub>2</sub>



# Pantbrev för minusutsläpp

## Atmospheric CO<sub>2</sub> Removal Deposits (ACORDs)



Lyngfelt, A., Fridahl, M., and Haszeldine, S., FinanceForFuture: Enforcing a CO<sub>2</sub> emitter liability using Atmospheric CO<sub>2</sub> Removal Deposits (ACORDs) to finance future negative emissions, *Energy Research & Social Science* **107** (2024) 103356

Anders Lyngfelt and Mathias Fridahl, Inför en pantavgift på koldioxidutsläpp, Debatt, *Svenska Dagbladet*, 19 januari 2024

# Debatt

Redaktör Carina Stensson Bitr redaktör Björn Jorner  
Debattredaktionen debatt@svd.se Telefon 08-13 51 49  
Webb: SvD.se/debatt Twitter: twitter.com/SvDDebatt Facebook: SvD Debatt

## Inför en pantavgift på koldioxidutsläpp

Genom en pantavgift på koldioxidutsläpp kan vi klara de minusutsläpp som är nödvändiga om vi skall klara 1,5-gradersmålet. Då kan vi undvika att lämna över ett olösligt problem till våra barn och barnbarn, skriver två forskare.

Om man gör slut på mer pengar än man har uppstår en skuld som måste betalas tillbaka. Detta gäller även klimatet. Det finns en budget för hur mycket koldioxid mänskligheten kan släppa ut utan att uppvärmningen överskrider 1,5 grader. Denna koldioxidbudget är slut om bara sex år. Samtidigt planerar huvuddelen av världens länder för att nå nollutsläpp av koldioxid långt senare. Hur går då detta ihop? Jo i de scenarier som många beslut grundas på ingår jättelika framtida minusutsläpp.

Minusutsläpp innebär att atmosfären städas på koldioxid. Ett av flera sätt att göra detta är bio-CCS där man fångar in och lagrar koldioxid från förbränning av biomassa. Eftersom biomassan tagit upp koldioxid från atmosfären och denna koldioxid hindras från att komma tillbaka skapas minusutsläpp.

För att klara 1,5-gradersbudgeten måste all-

lösa problemet med betalning av minusutsläpp, nämligen ett pantsystem på koldioxidutsläpp. Genom en pantavgift på koldioxidutsläpp tvingas den som släpper ut koldioxid att betala för att ta bort koldioxid från atmosfären. Pantavgiften inklusive avkastning betalas tillbaka i utbyte mot verifierade certifikat på minusutsläpp.

Förslaget har följande fördelar:

- Handel med pantbrev skapar en marknad som möjliggör långsiktiga investeringar och teknikutveckling.
- Att pantbrevens värde ökar över tid innebär också att incitamentet att åstadkomma minusutsläpp ökar.
- Pantsystemet skapar tydliga ägare vilket gör att de medel som betalas in till minusutsläpp skyddas mot att användas till andra ändamål, vilket är en risk om framtida minusutsläpp skulle finansieras av sparade



Vid Värtaverket i Stockholm har Stockholm Exergi sedan 2019 drivit en forskningsanläggning kring infångning av koldioxid. Företaget planerar en ny anläggning för så kallad bio-CCS till 2026. Foto: Magnus Hjalmarson Neideman

”

Den samhällsekonomiska kostnaden är rimlig, ett par procent av global BNP.

som kan betala skulden och därmed lösa ett problem som annars riskerar att vara olösligt.

Det kan invändas att det inte är realistiskt att alla länder skulle införa ett sådant pantsystem till 2030, men exemplets makt är stor och om något land skulle införa detta pantsystem uppstår genast frågan i andra länder varför inte deras regeringar kan ta sitt ansvar. Att utvecklingsländer inte kan förväntas ta ansvar för utsläpp från 2030 kan balanseras av att rika länder med tiden, genom överkompensation, också tar ansvar för sina stora historiska utsläpp.

Knappt hälften av Sveriges inhemska koldioxidutsläpp ingår i EU:s utsläppshandel ETS. Övriga utsläpp av koldioxid kommer framför allt från transporter och arbetsmaskiner. Om en pantavgift på 1 500 kronor per ton skulle införas på utsläpp av koldioxid som inte täcks av ETS blir kostnaden i storleksordningen 30 miljarder kronor per år. Det vill säga

# Vad skulle ett pantsystem kosta?

Aker Carbon Capture erbjuder CCS till fast pris: **0,07-0,15 €/kg CO<sub>2</sub>**

Koldioxidintensitet\* (globalt): 0,2 kgCO<sub>2</sub>/€

Alltså: en CO<sub>2</sub>-avgift på 0,15 €/kgCO<sub>2</sub> motsvarar **3% av den globala ekonomin**

$$0,2 \times 0,15 = 0,03 \text{ (3\%)}$$

---

\*Koldioxidintensitet = utsläpp/BNP

# Pantbrev för CO<sub>2</sub> - Sammanfattning

Den som släpper ut CO<sub>2</sub> betalar en pantavgift, pantavgiften återbetalas (inklusive avkastning) mot uppvisande av minusutsläpp.



Handel med pantbrev skapar en **marknad** som möjliggör långsiktiga investeringar och teknikutveckling.



Pantbreven har ägare, vilket innebär att de medlen skyddas från att användas för andra ändamål.

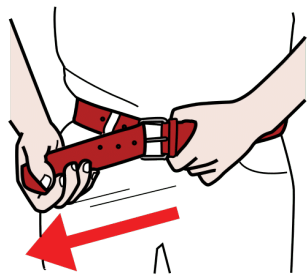


**Intäkterna** ökar värdet på pantbreven och ökar därmed incitamentet att uppnå negativa utsläpp



Pantavgiften kommer att driva på utsläppsminskningar.





Pantsystemet kan successivt skärpas genom **överkompensation**, så att den som släpper ut ett ton tvingas betala för att ta bort t ex två ton. Det ger ytterligare utsläppsminskningar samtidigt som rika länder kan börja betala av sina stora historiska koldioxidskulder.



Pantavgiften kan, och bör, **kombineras** med andra styrmedel som säkerställer snabba minskningar av utsläppen.



Den samhällsekonomiska kostnaden är rimlig, ett par procent av global BNP.



Pantsystemet är enkelt, rättvist, rationellt och lägger kostnaden på den som orsakar problemet. Därför bör det få **acceptans**.



Förslaget kan ses som ett sätt att nå nollutsläpp direkt, även om avlägsnandet av koldioxid från atmosfären sker med fördröjning. Därmed ger förslaget en reell möjlighet att nå 1,5°C-målet.



Vi lämnar inte efter oss en enorm koldioxidskuld och ett olösligt problem till våra barn och barnbarn.



Tack!  
Frågor?

