

# Introductie in Energie- & Industriesystemen

TB141E – Hoorcollege 8. Warmte- en CO<sub>2</sub>-netwerken

**Prof. dr. ir. Margot P.C. Weijnen**

# Carbon Capture & Storage (CCS)

## Indeling

1. Waarom CCS?
2. Eigenschappen van CO<sub>2</sub>
3. Nuttige toepassingen
4. Bronnen van CO<sub>2</sub> emissies
5. Afvangen van CO<sub>2</sub>
6. Geologische opslag van CO<sub>2</sub>
7. Transport van CO<sub>2</sub>



# Veiligheid: fysiologische effecten van CO<sub>2</sub>

Kooldioxide is een kleurloos–en grotendeels reuk- en smaakloos gas. Daarom is het voor de menselijke zintuigen praktisch niet waarneembaar.

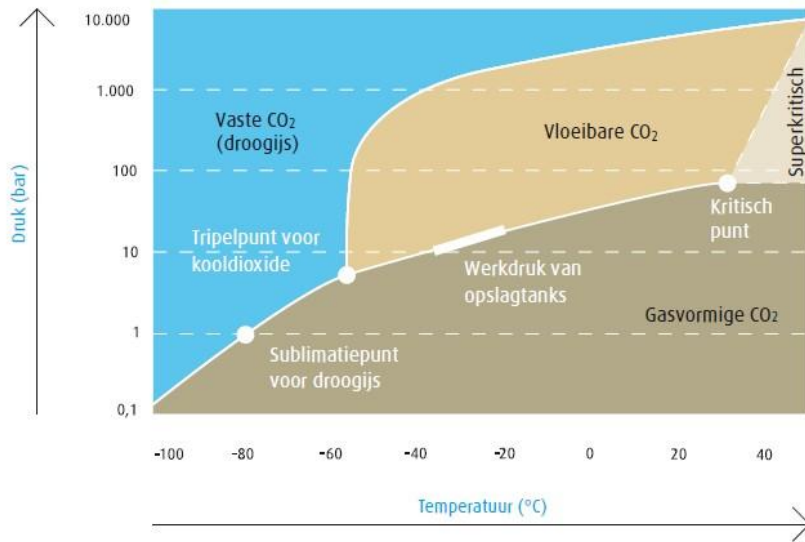
Kooldioxide wordt als niet-giftig beschouwd. Het is geen gevaarlijke stof, zoals bedoeld in de Arbo-wetgeving inzake gevaarlijke stoffen.

De lucht die wij inademen, bevat ca. 0,03 vol.% kooldioxide. Bij hogere concentraties kan CO<sub>2</sub> schadelijk zijn voor de gezondheid. Bij 3-5 vol.% CO<sub>2</sub> in de ingeademde lucht ontstaan hoofdpijn, storingen in de ademhaling en onpasselijkheid. Een concentratie van 8-10 vol.% kan leiden tot krampen, bewusteloosheid, ademstilstand en de dood. Het zuurstofgehalte in de ademlucht bedraagt daarbij nog wel ongeveer 19 vol.% en zou dus voldoende moeten zijn. De schadelijke fysiologische werking van dergelijke CO<sub>2</sub>-concentraties ontstaat dus niet als gevolg van zuurstofgebrek, maar door de directe werking van de kooldioxide. Om deze reden is er voor CO<sub>2</sub> een maximaal toelaatbare concentratie (Publieke grenswaarde, vroeger MAC-waarde genoemd) vastgesteld van 0,5 vol.% bij beroepsmatige blootstelling.

# Lake Nyos disaster



In 1986, a tremendous explosion of CO<sub>2</sub> from the lake Nyos, West of Cameroon, killed more than 1700 people and livestock up to 25 km away. The dissolved CO<sub>2</sub> is seeping from springs beneath the lake and is trapped in deep water by the high hydrostatic pressure. If the CO<sub>2</sub> saturation level is reached, bubbles appear and draw a rich mixture of gas and water up. An avalanche process is triggered which results in an explosive over-turn of the whole lake. Since 1990 a French team has carried out a series of tests in an attempt to release the gas slowly through vertical pipes ...

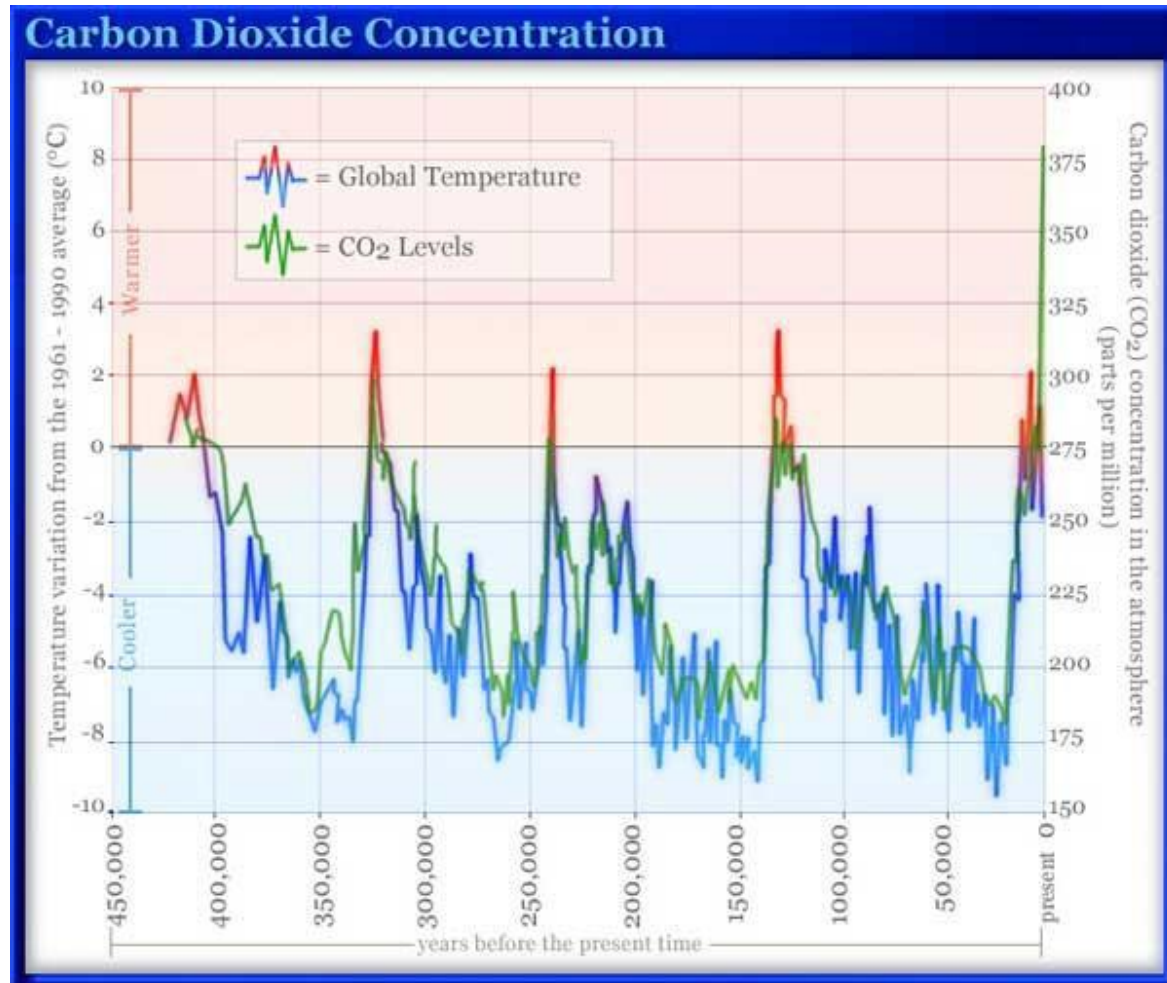


Koolstofdioxideblussers zijn direct te herkennen omdat ze een zwarte expansiekoker of sneeuwkoeker aan het uiteinde van de slang hebben. Tussen expansiekoker en slang zit een handvat, dat men tijdens gebruik van de blusser moet vasthouden. Het handvat is nodig omdat het uiteinde van de onbeschermd koker zeer koud wordt (tot ongeveer  $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) en men door deze extreme kou derdegraads brandwonden op kan lopen. (Wikipedia)

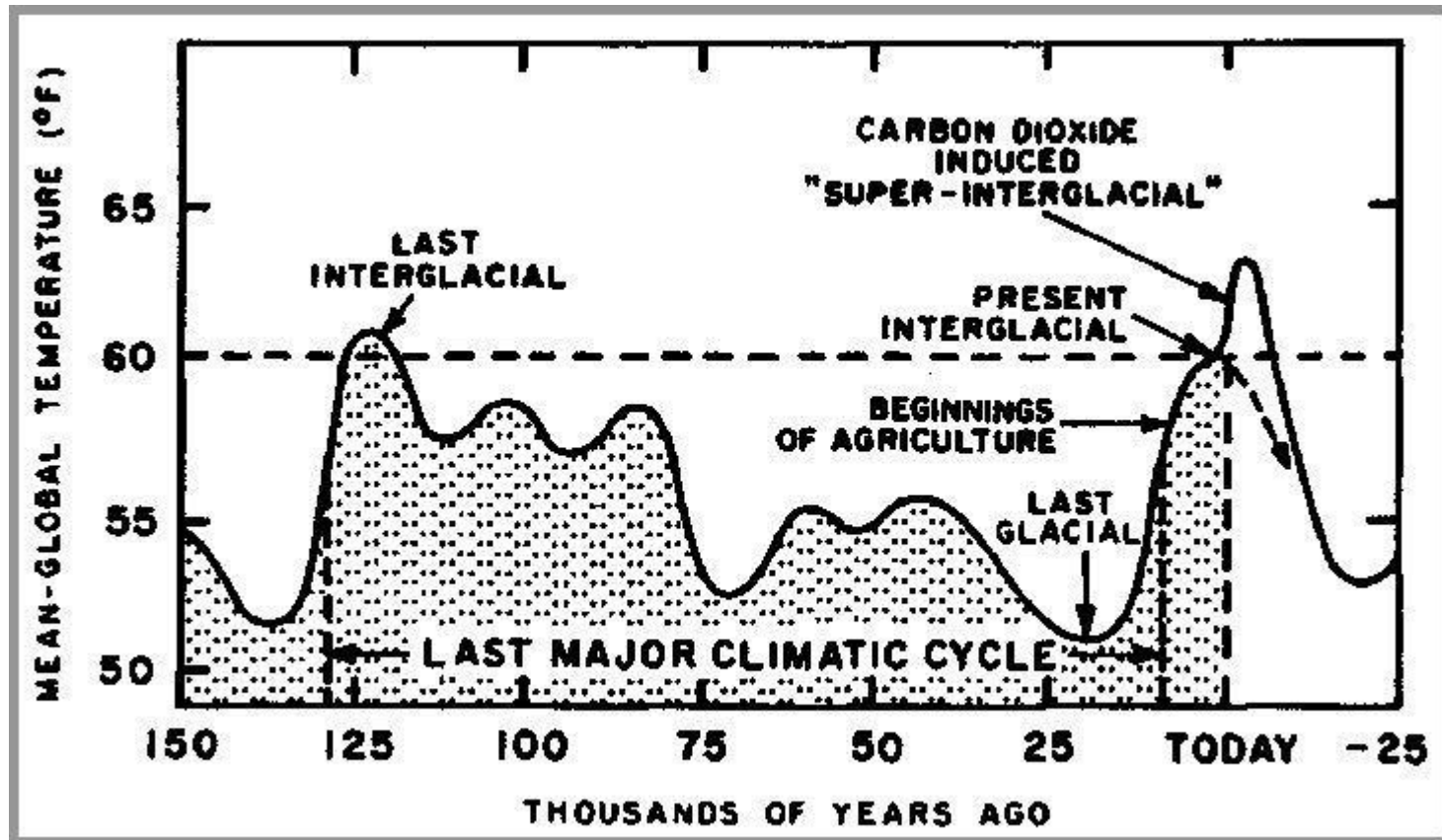


# 1. Aanleiding: CO<sub>2</sub> in de atmosfeer

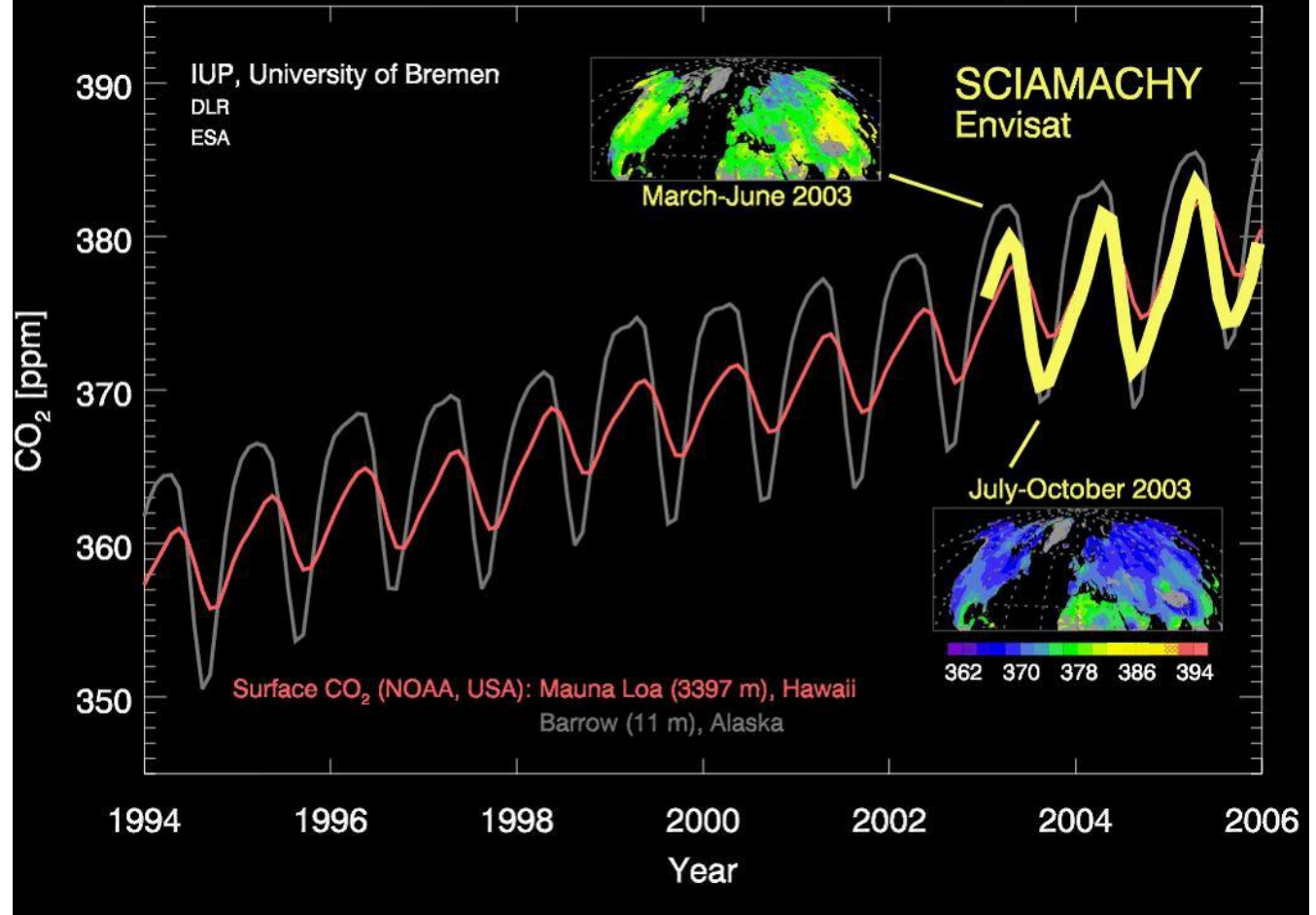
In de loop der eeuwen is de hoeveelheid CO<sub>2</sub> in de atmosfeer voortdurend veranderd. De hoeveelheid CO<sub>2</sub> in de atmosfeer over een groot tijdsbestek is gemeten aan de hand van boormonsters uit het ijs op Groenland en Antarctica. In het ijs zitten minuscule belletjes prehistorische lucht opgeslagen. Hoe dieper in het ijs, hoe ouder de ijslaag en de luchtbelletjes. In de periode tussen 10.000 en 160.000 jaar geleden fluctueerde de atmosferische CO<sub>2</sub> concentratie af en toe snel. Dit zou een oorzaak kunnen zijn voor het ontstaan van de ijstijden. Waarom de hoeveelheid CO<sub>2</sub> in de atmosfeer daalde en steeg voordat de mens op het toneel verscheen is onbekend. Vermoed wordt dat de hoeveelheid plantaardig plankton in de oceanen hierbij een rol speelt.



# Op weg naar een nieuwe ijstijd?



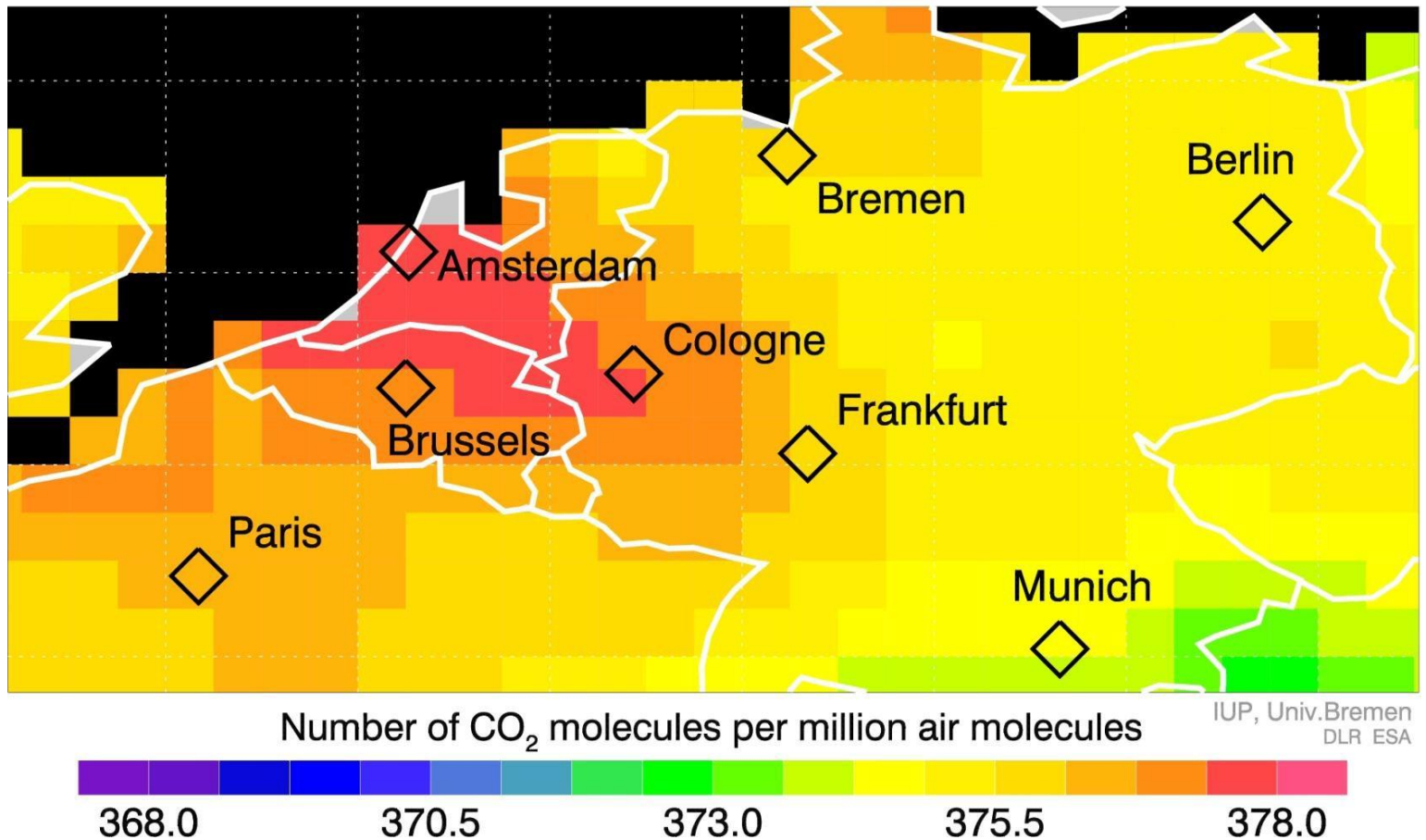
# Atmospheric Carbon Dioxide (CO<sub>2</sub>)



Metingen van de CO<sub>2</sub>-concentratie in de atmosfeer boven het Noordelijk Halfrond. Let op de jaarlijkse schommeling: groeiende planten nemen in de lente en zomer CO<sub>2</sub> op, waardoor het gehalte CO<sub>2</sub> in de atmosfeer daalt. In de herfst sterven planten af en komt opgenomen CO<sub>2</sub> vrij.

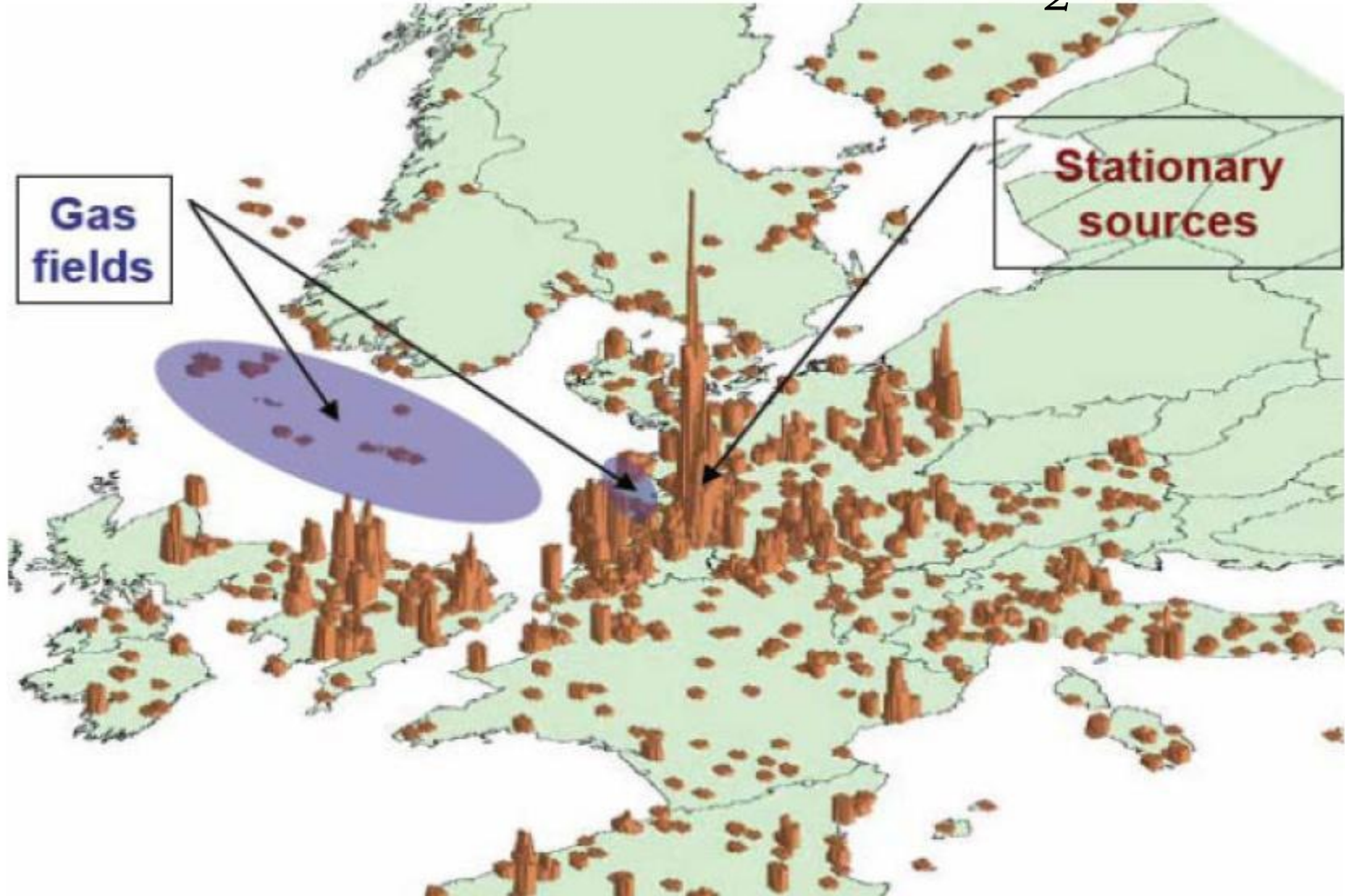


## Carbon Dioxide SCIAMACHY/ENVISAT 2003-2005



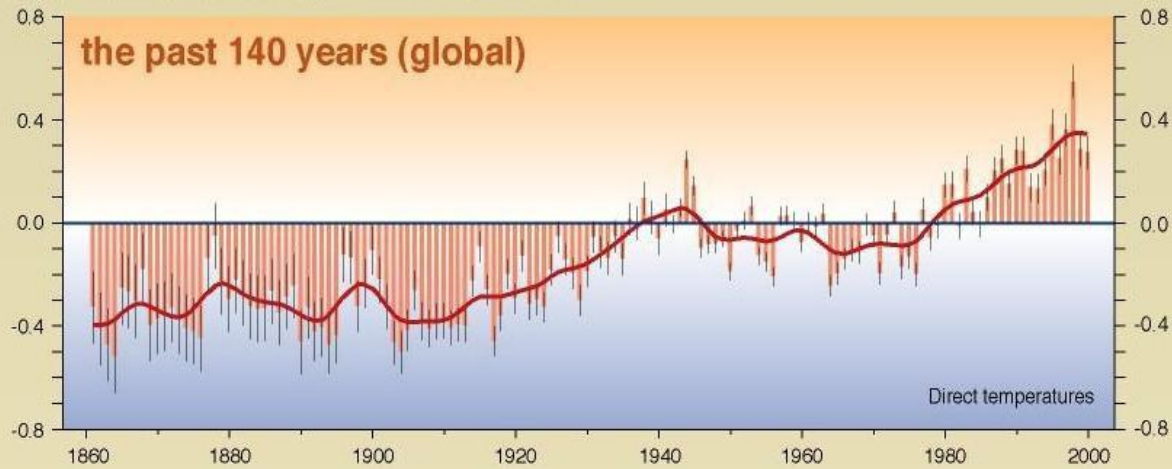
CO<sub>2</sub> kaart gebaseerd op de metingen van SCIAMACHY aan boord van de ESA ENVISAT satelliet gedurende 2003 t/m 2005.

# Distributie van stationaire CO<sub>2</sub> bronnen

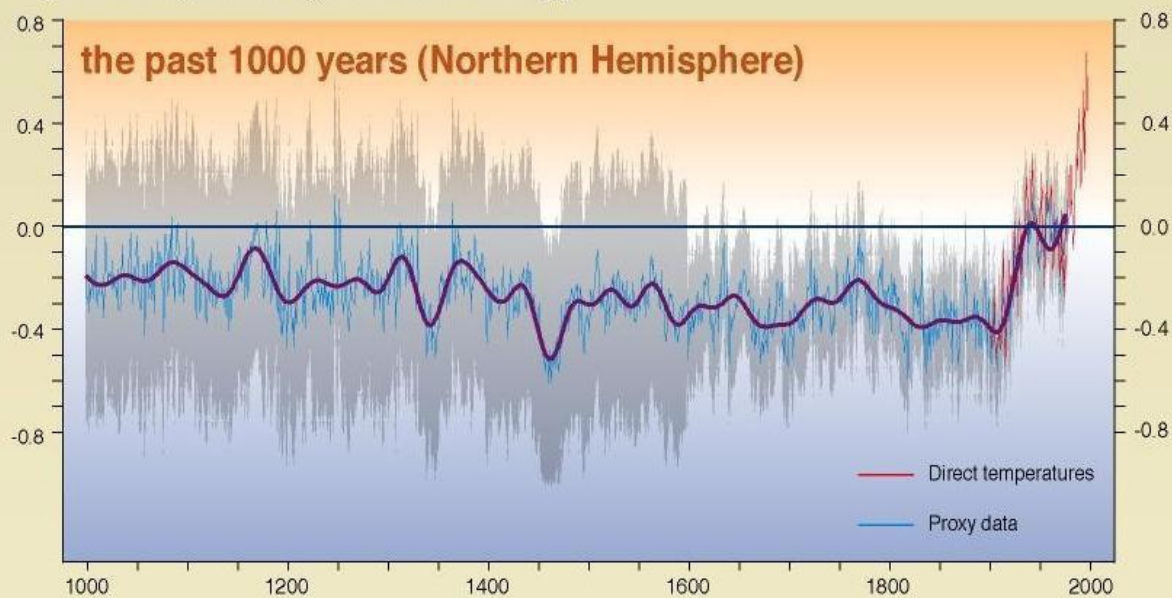


## Variations of the Earth's surface temperature for...

Departures in temperature in °C (from the 1961-1990 average)

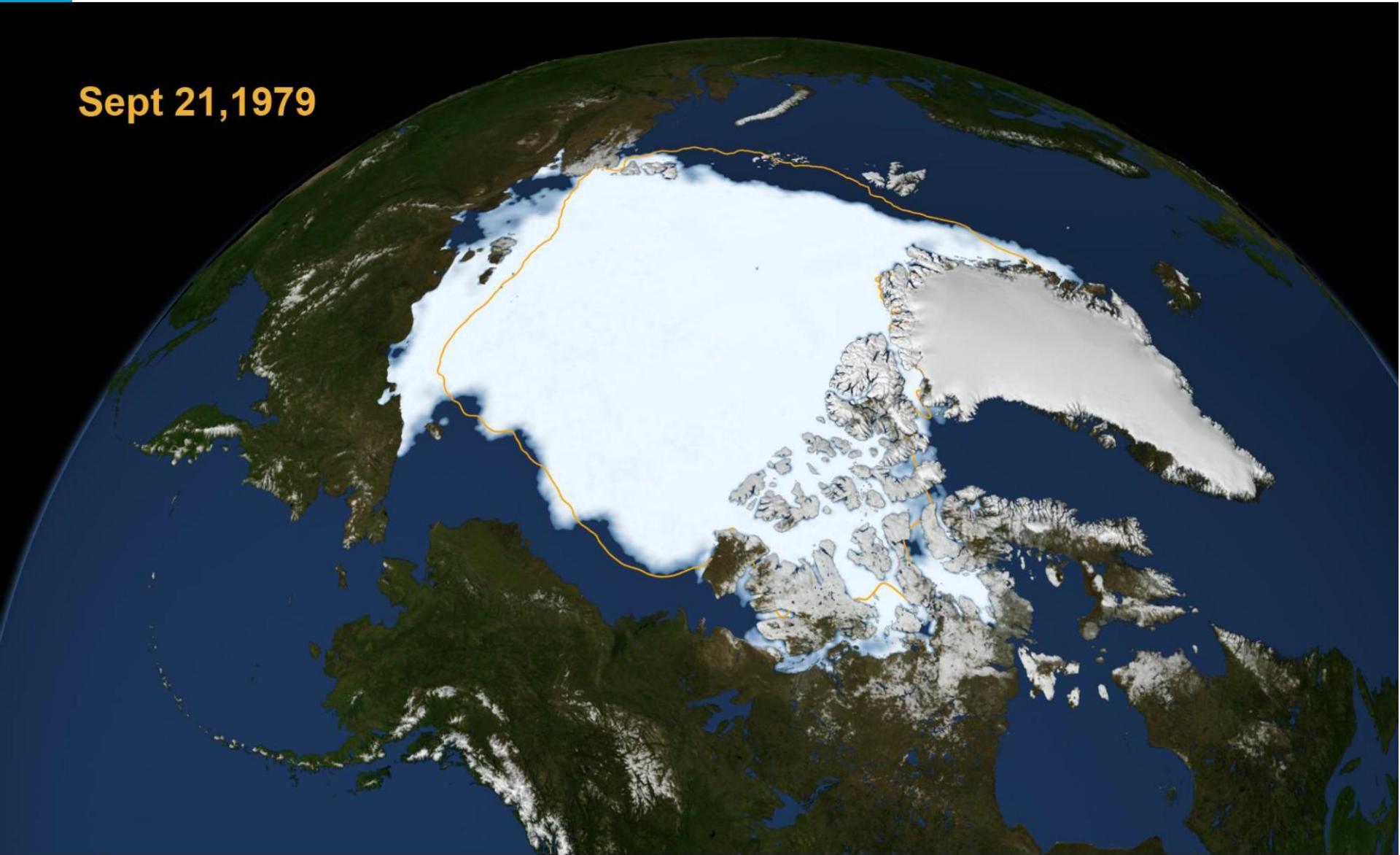


Departures in temperature in °C (from the 1961-1990 average)



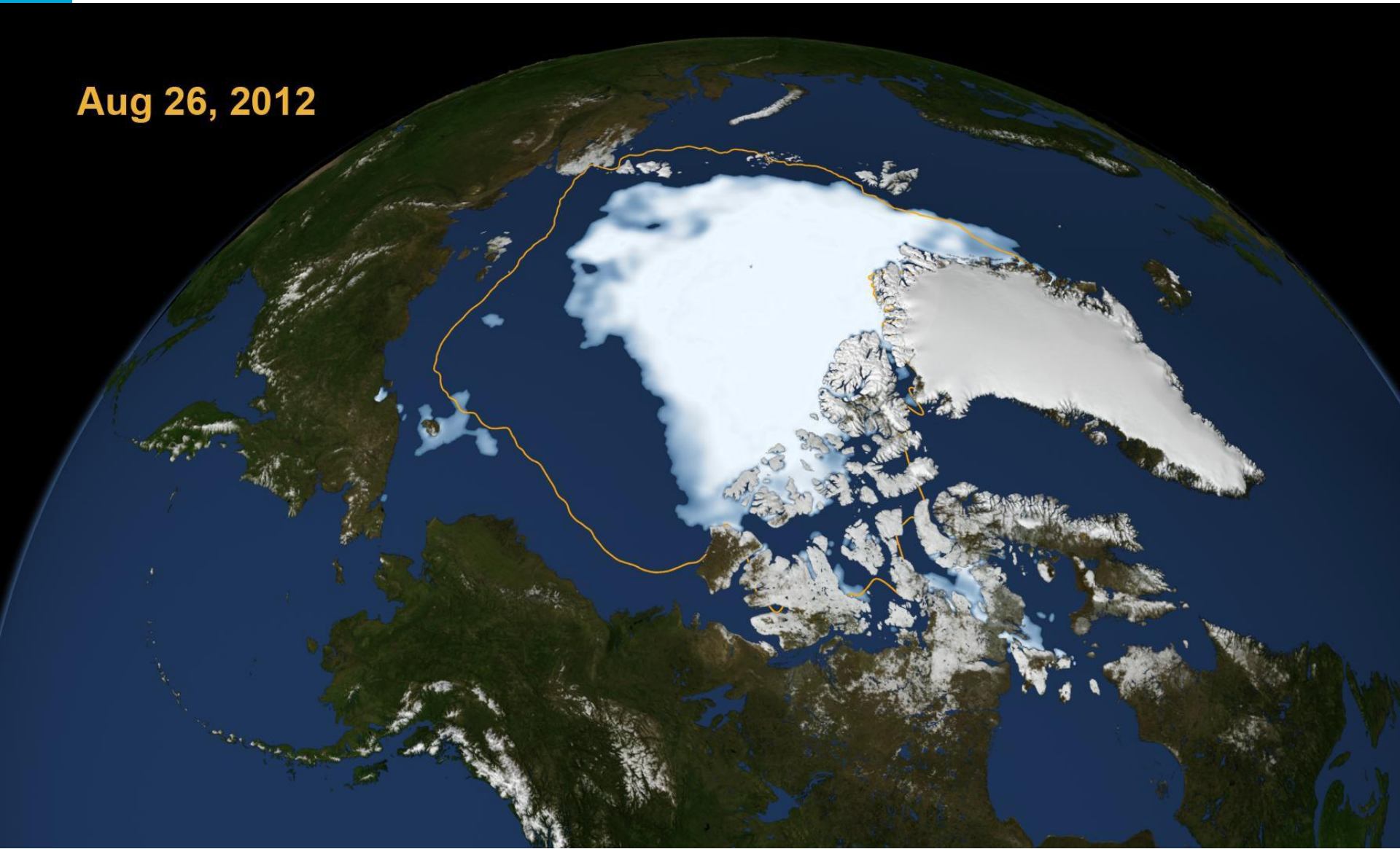
# Arctic Sea Ice - Surface area

Sept 21, 1979



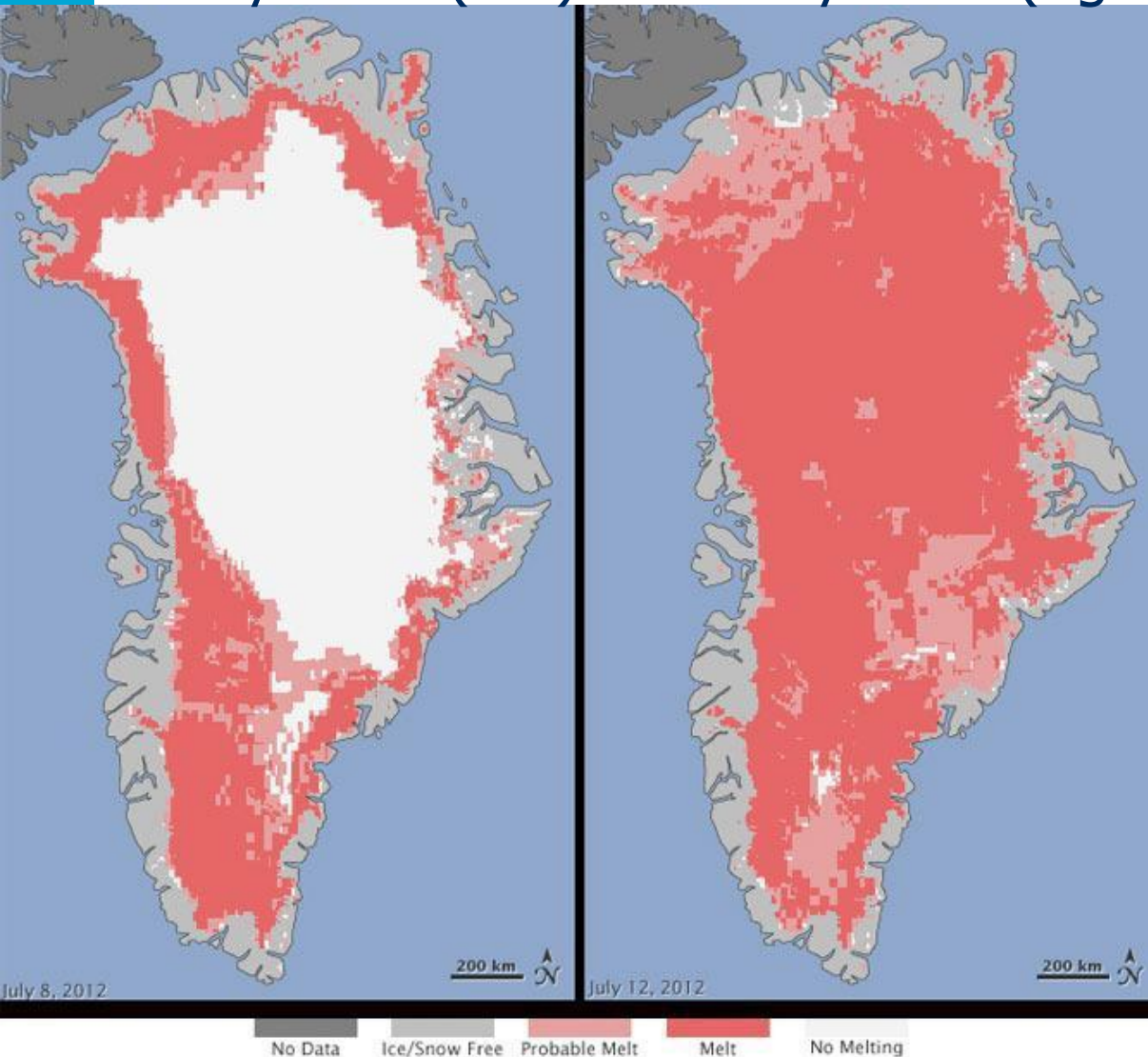
# Arctic Sea Ice - Surface area

Aug 26, 2012



# Greenland: Summer extreme melt extent:

8 July 2012 (left)      12 July 2012 (right)



Over the course of four days in July 2012 virtually the entire surface melted — an area larger than at any time in more than 30 years of satellite observations.

Even the [NOAA observatory Summit Station](#) in central Greenland—2 miles (3.2 kilometers) above sea level and near the highest point of the ice sheet, showed signs of melt. Such widespread thawing has not occurred since 1889, [according to ice-core analyses](#).

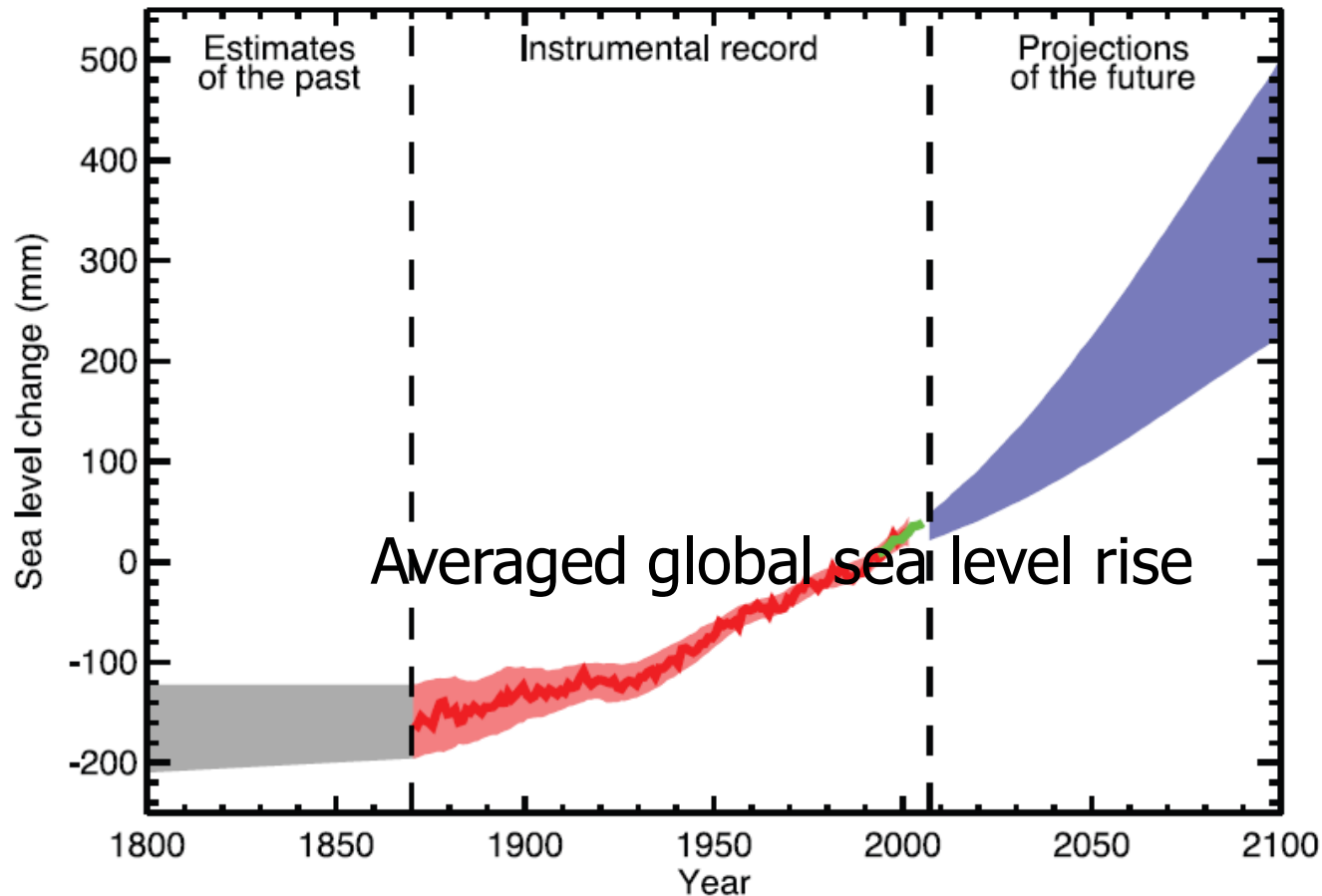
"Ice cores from Summit Station show that melting events of this type occur about once every 150 years on average. With the last one happening in 1889, this event is right on time," said [Lora Koenig](#), a Goddard glaciologist and a member of the research team analyzing the satellite data. "But if we continue to observe melting events like this in upcoming years, it will be worrisome."

Credits: Nicolo E. DiGirolamo, SSAI/NASA GSFC, and

Jesse Allen, NASA Earth Observatory;

<http://www.nasa.gov/topics/earth/features/greenland-melt.html>

# Averaged global sea level rise



Averaged global sea level rise

**In blue:** the model projections according to the A1B- IPCC scenario:  
22 – 48 cm SLR in the year 2100

# De gevolgen van klimaatverandering zijn nauwelijks te overzien ...

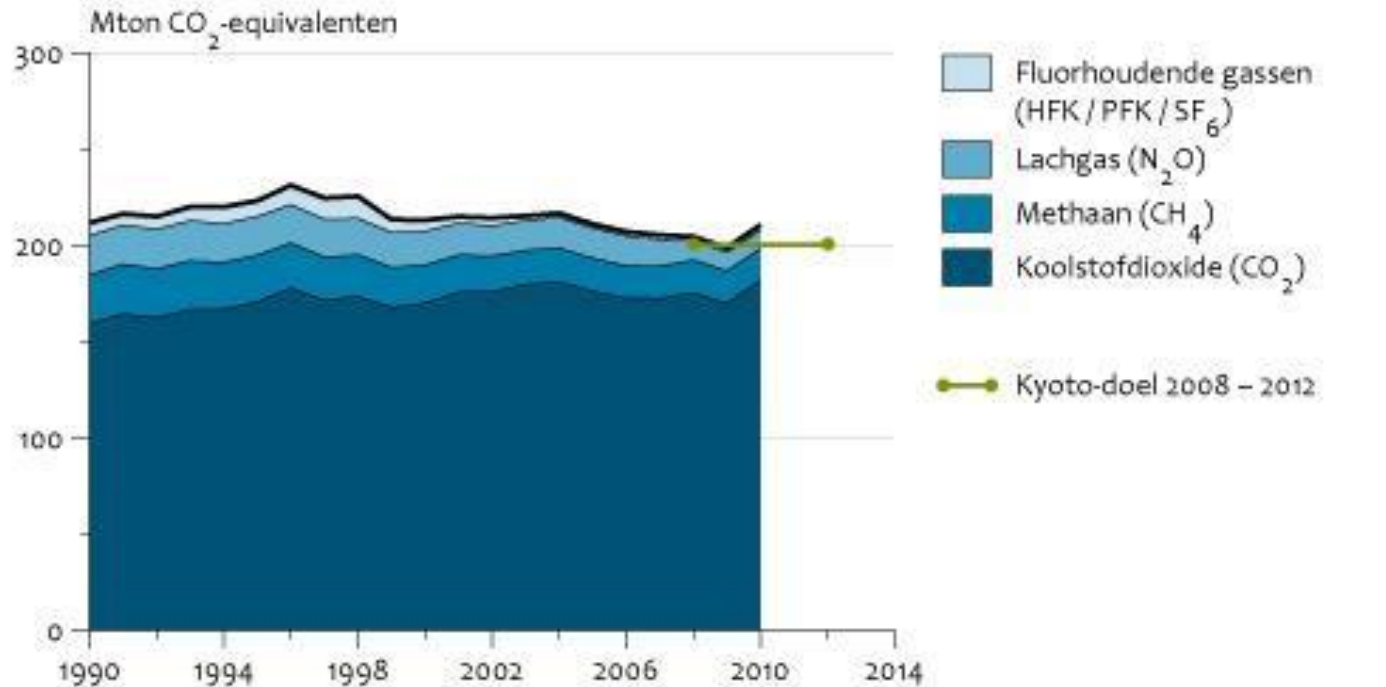
The Maldives, a string of islands off the coast of India whose highest point above sea level is eight feet, may be the first nation to drown. In Alaska, entire towns have begun to shift in the loosening permafrost. The Florida economy is highly dependent upon coastal weather patterns; the tide station at Miami Beach has registered an increase of seven inches since 1935, according to the National Oceanic and Atmospheric Administration.

..... Many climate scientists say their biggest fear is that warming could melt the Arctic permafrost—which stretches for thousands of miles across Alaska, Canada, and Siberia. There is twice as much CO<sub>2</sub> locked beneath the tundra as there is in the earth's atmosphere. Melting would release enormous stores of methane, a greenhouse gas nearly thirty times more potent than carbon dioxide. If that happens, as the hydrologist Jane C. S. Long told me when we met recently in her office at the Lawrence Livermore National Laboratory, "it's game over."



# Emissies broeikasgassen in NL

## Emissie broeikasgassen



Bron: Emissieregistratie.

PBL/aug11/0165  
www.compendiumvoordeleefomgeving.nl

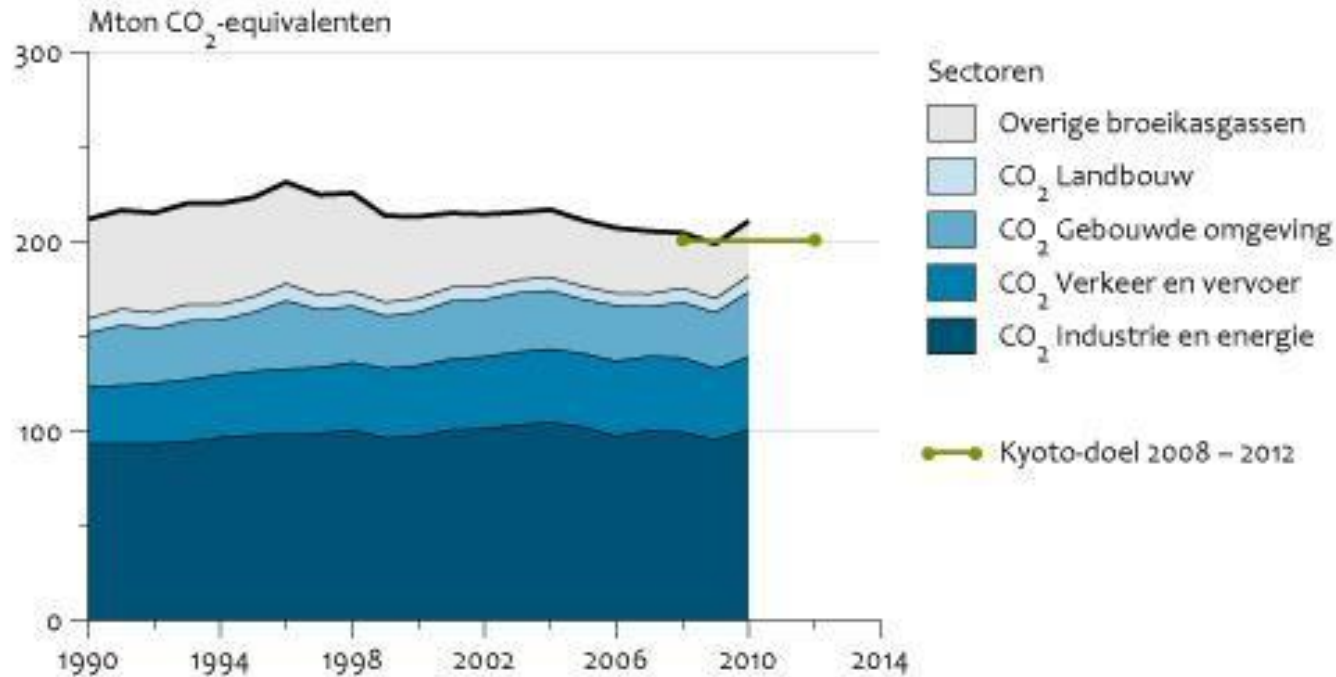
# De “andere” broeikasgassen

- CO<sub>2</sub> is het meest bekende broeikasgas. Naast CO<sub>2</sub> bestaan er ook andere broeikasgassen. Dit zijn: methaan, lachgas en de F-gassen HFKs, PFKs en SF<sub>6</sub>. Deze gassen dragen in Nederland voor circa 15% procent bij aan de uitstoot van broeikasgasemissies. De emissies zijn sinds 1990 al met circa 45% verminderd.
- De uitstoot van de andere broeikasgassen is weliswaar veel kleiner dan van CO<sub>2</sub>, maar de isolerende werking per kilogram is veel hoger. Methaan en lachgas hebben resp. een 21 en 310 maal sterkere broeikaswerking dan CO<sub>2</sub>. De meeste fluorverbindingen zijn nog vele malen sterker. Het gas SF<sub>6</sub> is zelfs 23.900 maal sterker dan CO<sub>2</sub>.
- De belangrijkste emissiebronnen van methaan zijn de spijsvertering van rundvee, mestopslagen, afvalstortplaatsen en WKK-gasmotoren. Lachgas (N<sub>2</sub>O) komt vooral vrij uit de bodem en ontstaat door gebruik van meststoffen; daarnaast komt lachgas ook vrij uit de chemische industrie. De fluorverbindingen HFK's komen in de atmosfeer door het ontsnappen van koelmiddel uit koel- en vries-installaties. De fluorverbindingen PFK's en SF<sub>6</sub> komen vooral vrij bij de productie van halfgeleiders en hoogspanningsinstallaties.

[HFKs: Fluorkoolwaterstoffen / PFKs: Perfluorkoolwaterstoffen / SF<sub>6</sub>: zwavelhexafluoride]

# Emissie broeikasgassen NL – per sector

## Emissie broeikasgassen per sector



Bron: Emissieregistratie.

PBL/aug11/0165  
www.compendiumvoordeleefomgeving.nl

# Bronnen van CO<sub>2</sub> emissies - NL

	1990	2000	2005	2010
Stationaire bronnen	128,8	132,9	137,4	143,5
Kort-cyclische CO2	5,9	7,6	10,0	12,7
Verkeer en vervoer	26,7	31,8	33,3	34,2
Zeescheepvaart	3,6	4,6	5,1	4,9
Mobiele werktuigen	2,7	3,1	2,9	2,9
Totaal feitelijke emissies	168	180	189	198

CBS/CLO/sep11/0170

# Afvangen of emissiereductie?

## Mobiele bronnen:

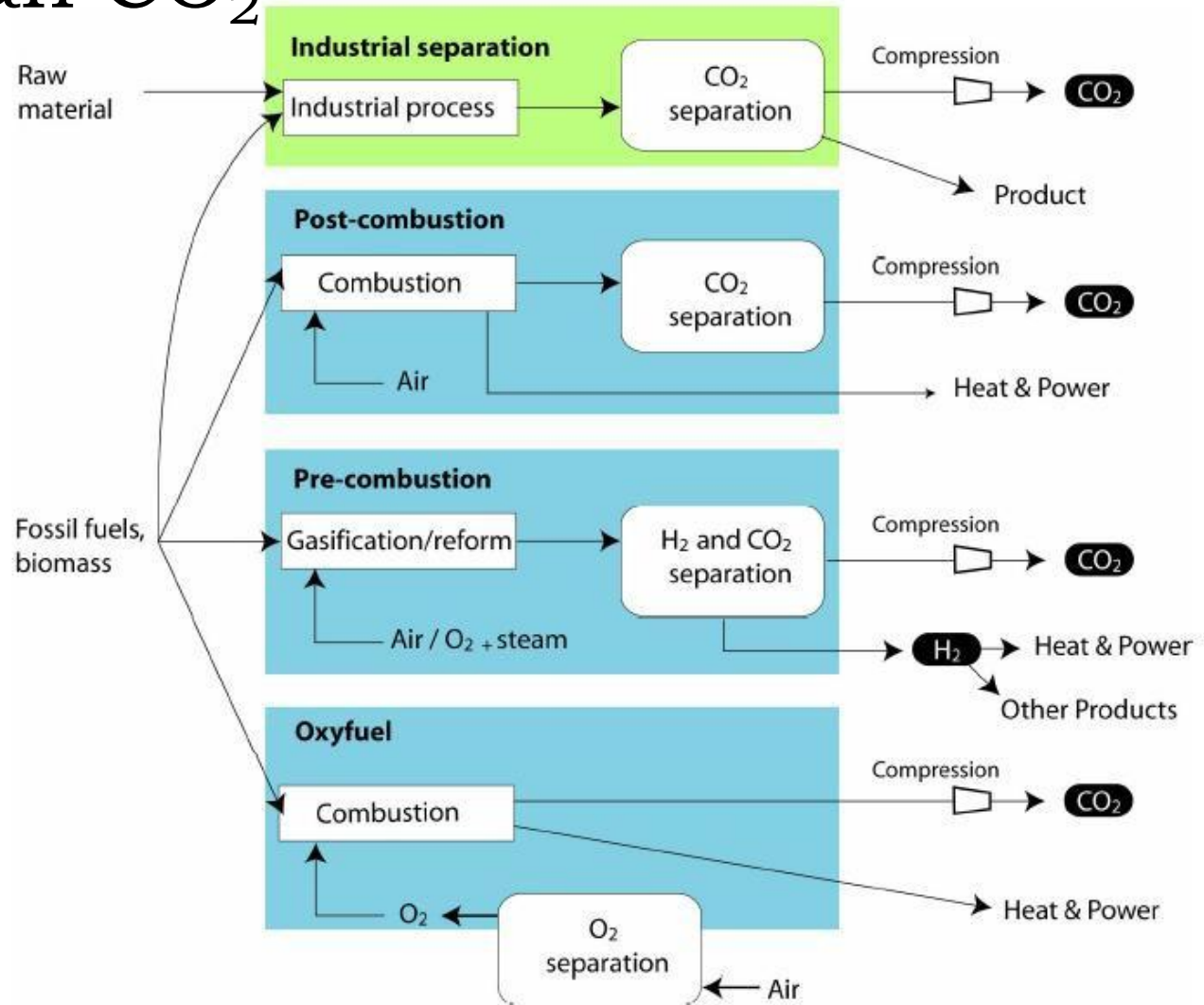
- afvangen CO<sub>2</sub> is technisch moeilijk en (dus) erg duur
- beter om emissies structureel te vermijden of te reduceren
- voorbeeld: personenauto's
  - groene brandstoffen (alleen kort-cyclische CO<sub>2</sub> emissie)
  - zuinige en schone(re) auto's stimuleren: waterstof, hybride of full-electric
  - gedragswijziging: vermindering autogebruik en meer openbaar vervoer

# Afvangen of emissiereductie?

## Stationaire bronnen:

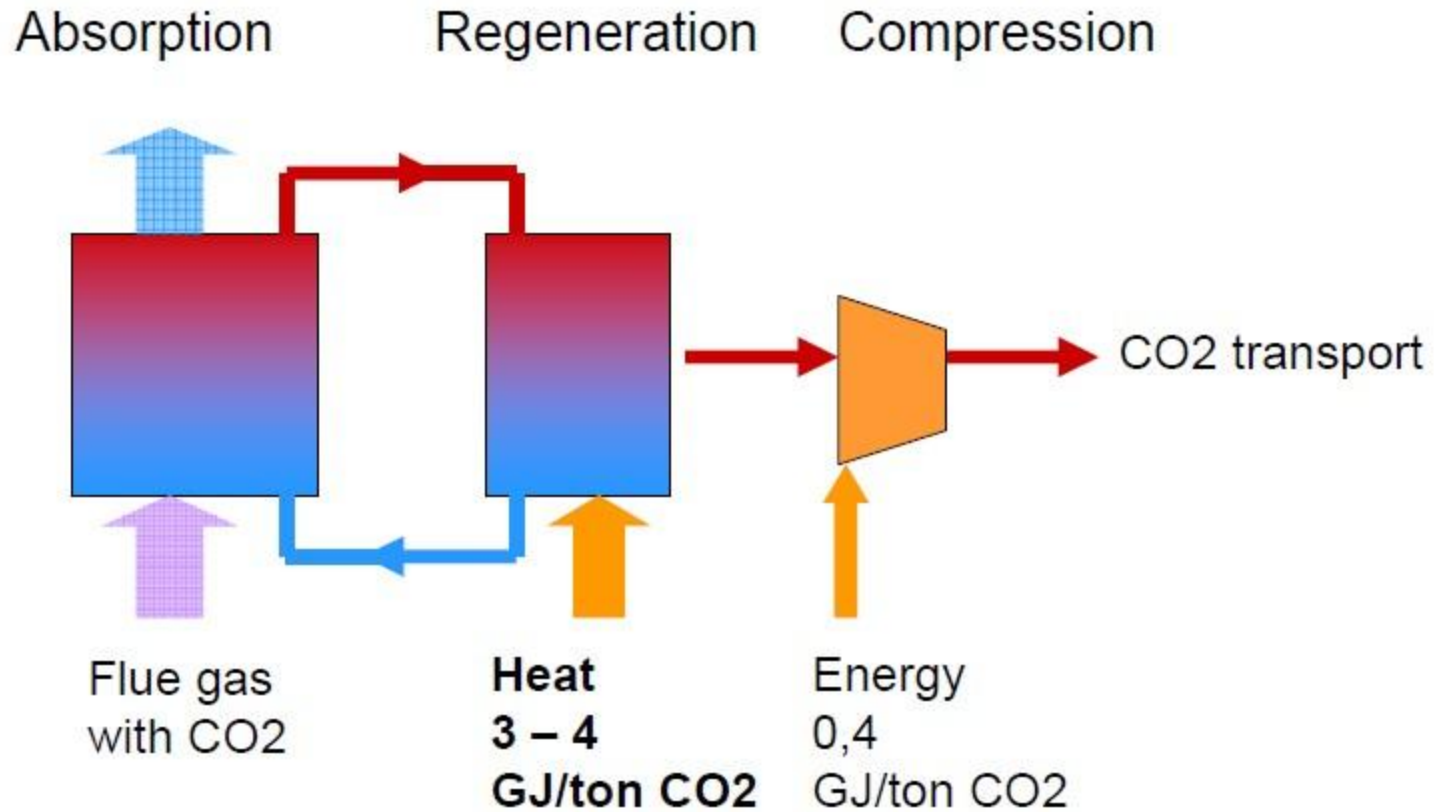
- afvangen CO<sub>2</sub> is technisch mogelijk; kosten afhankelijk van technologie en schaalgrootte
- beter om emissies structureel te vermijden of te reduceren, vooral bij kleinschalige bronnen (denk bijv. aan verwarmingsketels in huishoudens en dienstensector)
- CO<sub>2</sub> afvangen: vooral bij grote industrie en thermische (niet-nucleaire) elektriciteitscentrales

# Afvangen van CO<sub>2</sub>



17 september 2009

# Post-Combustion CO<sub>2</sub> Capture





# Post-Combustion CO<sub>2</sub> Capture

## Stand der techniek 2007

Solvent: Monoethanolamine (MEA)  
**1100 MW coal power plant**

- Flue gas flow 3 Mio. Nm<sup>3</sup>/h
- CO<sub>2</sub> emission 800 t/h
- Initial fill MEA 1800 t
- Refill MEA 1.3 t/h (2.4 t/h @ 200 mg/Nm<sup>3</sup> SO<sub>2</sub>)

Efficiency losses 12-14 Percentage points

Cooling tower 1/3 bigger

Absorber diam 32 m (!)

Investment costs 300 - 600 Mio. €

# Kosten CCS

- Kostenfactoren
  - Kapitaalslasten van investeringen
  - Operationele kosten (energie en hulpstoffen)
  - Globaal 20 - 30% hogere kosten per kWh
  - 80% afvangst / 10 % transport / 10% geologische opslag

# Kosten van CO<sub>2</sub> Capture

## Capture

Typical cost data (example)		Existing	New with CO <sub>2</sub> capture
Heat input	MW th	1350	1460
Electr output	MW e	580	490
Efficiency	%	43,0	33,6
Investment costs	MEuro/MW	1,25	2
CO <sub>2</sub> emission	kg/MWh	760	40
Cost of electricity	Euro/MWh	50	75
Cost of CO <sub>2</sub> avoided	Eur/ton	0	34,7

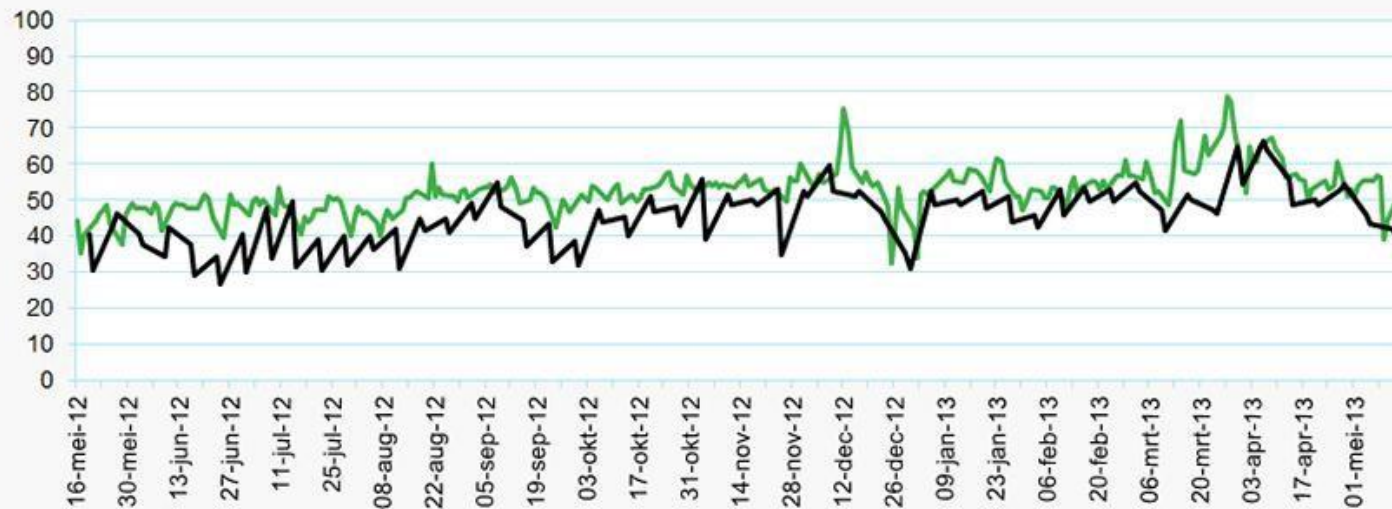
Note these numbers are based on literature averages and used for illustration only

# Bekostiging CCS

- Huidige prijs (2012) van CO<sub>2</sub> emissierechten: ca. Euro 7/ton

### APX in Euro/MWh

weekdagen weekenddagen



### CO2 in Euro/ton

dec2013 dec2014



# Wat doen we met afgevangen CO<sub>2</sub>?

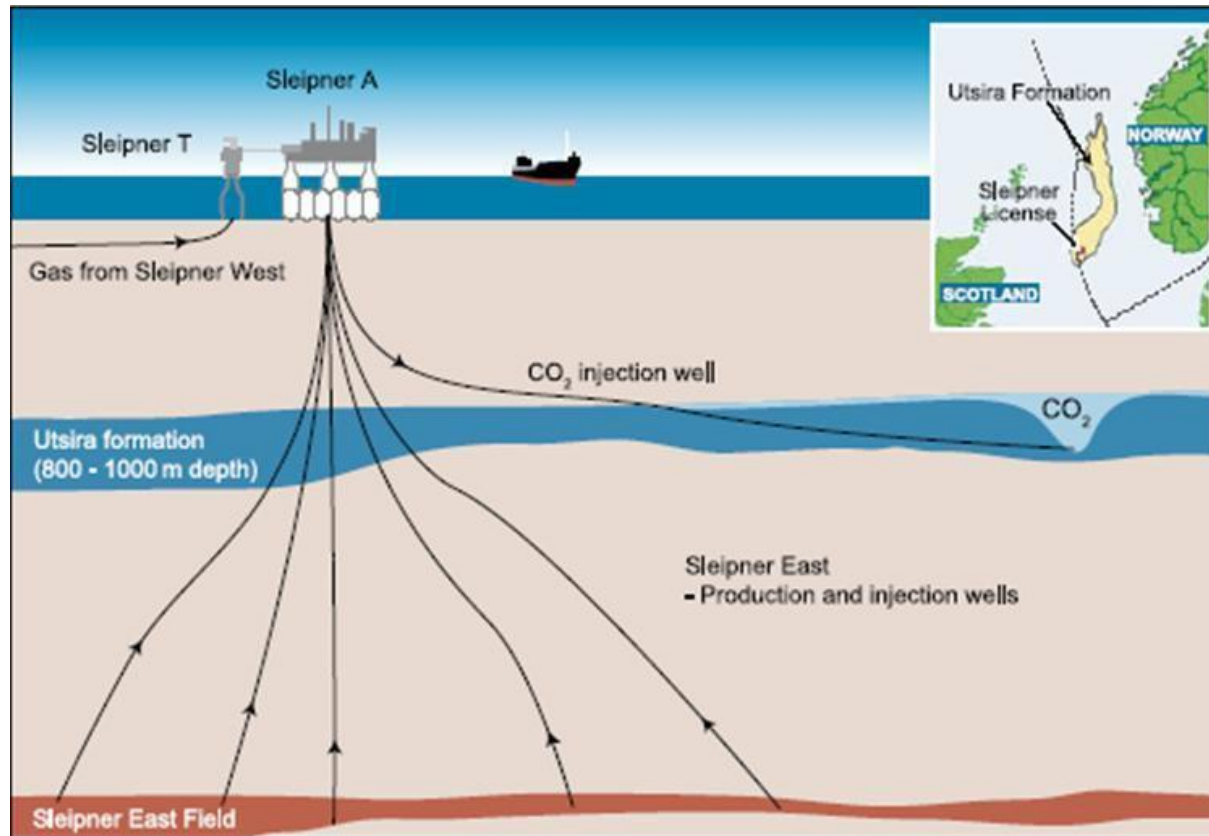
- Nuttig gebruiken:
  - als nutriënt gas
  - tbv enhanced oil/gas recovery of
  - enhanced coal bed methane recovery
- Opslaan/vastleggen (sequestratie)
  - in lege olie-/gasvelden
  - in (zoute) aquifers
  - in de diepzee
  - in minerale vorm (carbonaten)



# Opslag van CO<sub>2</sub>

## CCS in the Sleipner field:

The offshore gas field Sleipner, in the middle of the North Sea, has been injecting 1 million ton CO<sub>2</sub> per year since 1996 without leakage.



The Sleipner CO<sub>2</sub> injection project is undertaken by Statoil and the operator found that it is easier as well as more economical to separate the CO<sub>2</sub> (4 to 9.5 % in content) from the natural gas and re-inject it instead of paying a CO<sub>2</sub> tax. The removed CO<sub>2</sub> is injected into a salt water containing sand layer, called the Utsira formation, which lies 1000 meter below sea bottom. Saline formations (i.e. deep underground porous reservoir rocks saturated with brackish water or brine) can be used for storage of CO<sub>2</sub>.

# Sleipner field CCS project

## Technical aspects

- Gas uit het Sleipner West gasveld bevat circa 9% CO<sub>2</sub>. Door (een deel van) het CO<sub>2</sub> te verwijderen, tot een CO<sub>2</sub> gehalte van circa 2,5 %, wordt voldaan aan de specificaties van klanten (en export).
- Per jaar wordt circa 1 Mt CO<sub>2</sub> verwijderd uit het gas dat geproduceerd wordt op het Sleipne T platform. Dat gas wordt geïnjecteerd in een zoutwaterformatie boven de gashoudende gesteentelaag.
- Voorzien is een maximale injectie van 20 Mt.
- CO<sub>2</sub> wordt "gevangen" onder een ondoordringbare gesteentelaag (800 m dik).

## Key deliverables

- In 1991 introduceerde de Noorse overheid een CO<sub>2</sub> offshore belasting met de bedoeling om CO<sub>2</sub> emissies te reduceren. Dat was de stimulans voor Statoil om CCS technologie te gaan toepassen.
- Het CCS project bij het Sleipner veld is operationeel sinds Augustus 1996.
- In 2014 wordt het CCS project uitgebreid naar het Gudrun gasveld; dat betekent dat er jaarlijks 0.7 Mt CO<sub>2</sub> extra wordt afgevangen.



# Sleipner field CCS project

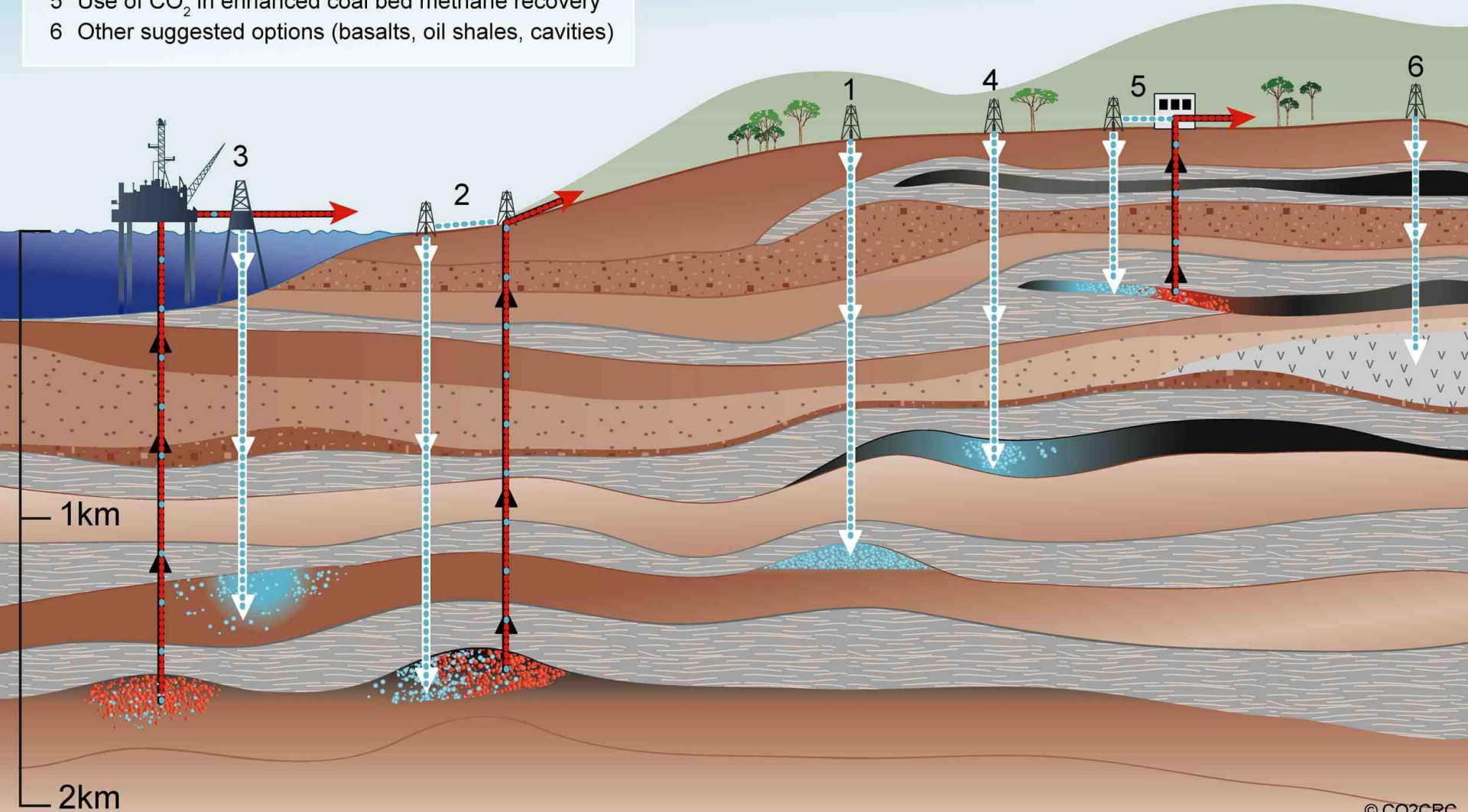


Gas produced from the Sleipner field has an unusually high concentration of CO<sub>2</sub>, so in order to conform with regulations most of it is injected back below the seabed into a saline aquifer

Had this process not been adopted, and the CO<sub>2</sub> produced been allowed to escape to the atmosphere, the licensees of the Sleipner West field would have had to pay NOK 1 million/day in Norwegian CO<sub>2</sub> taxes. Sleipner has been reinjecting one million tons of CO<sub>2</sub> gas every year since 1996.

## Geological Storage Options for CO<sub>2</sub>

- 1 Depleted oil and gas reservoirs
- 2 Use of CO<sub>2</sub> in enhanced oil recovery
- 3 Deep unused saline water-saturated reservoir rocks
- 4 Deep unmineable coal seams
- 5 Use of CO<sub>2</sub> in enhanced coal bed methane recovery
- 6 Other suggested options (basalts, oil shales, cavities)



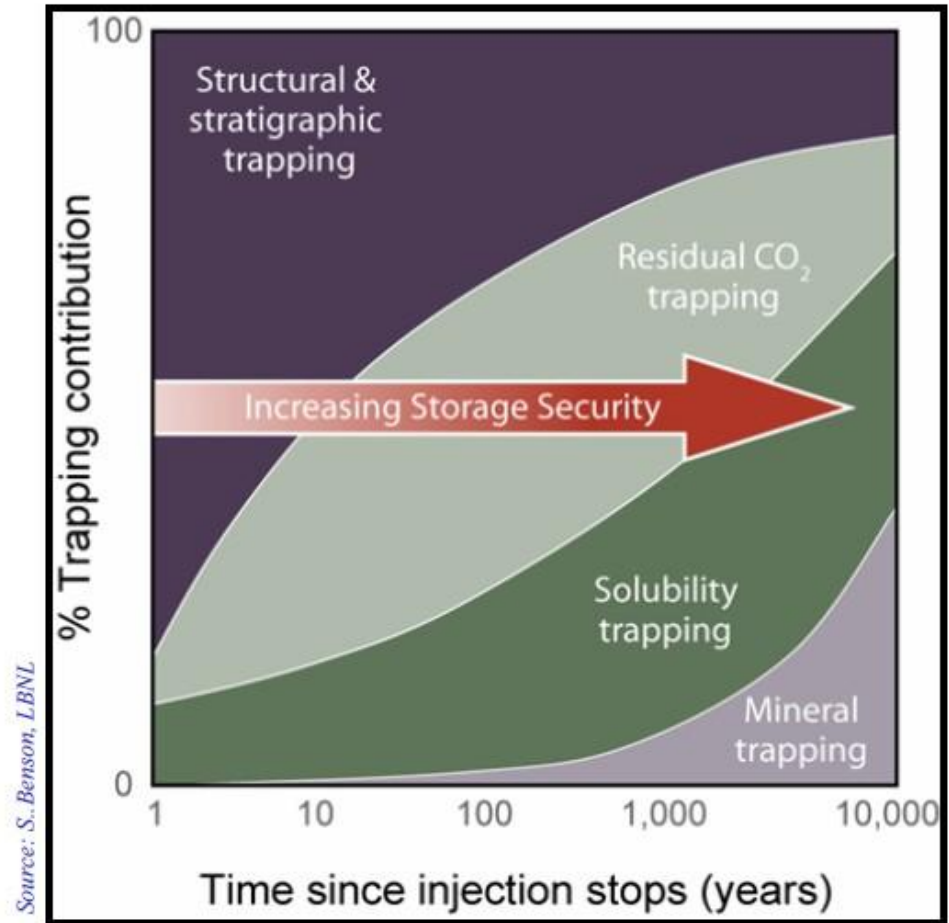
# Geologische opslag van CO<sub>2</sub>

## Natuurlijke mechanismen

- **Structural trapping** - CO<sub>2</sub> wordt onder druk geïnjecteerd in de ondergrond op de opslaglocatie, op de juiste diepte. Het gesteente van de opslagformatie werkt als een harde spons, die (vloeibaar) CO<sub>2</sub> opneemt in de poriën. CO<sub>2</sub> stijgt zover mogelijk op in de opslagformatie tot het een ondoordringbare laag bereikt die de poreuze opslagformatie afsluit en de CO<sub>2</sub> daarin gevangen houdt.
- **Residual trapping** – net zoals lucht “gevangen” zit in een spons, wordt CO<sub>2</sub> onomkeerbaar gevangen in de microscopisch kleine poriën van het formatiegesteente.
- **Dissolution and mineral trapping** – in de loop der tijd worden twee additionele mechanismen dominant: allereerst begint CO<sub>2</sub> op te lossen in het zoute water dat in het formatiegesteente aanwezig is. Op nog langere termijn gaat het CO<sub>2</sub> een permanente chemische binding aan met het formatiegesteente; er worden carbonaathoudende mineralen gevormd.

# Trapping Mechanisms Provide Increasing Storage Security with Time

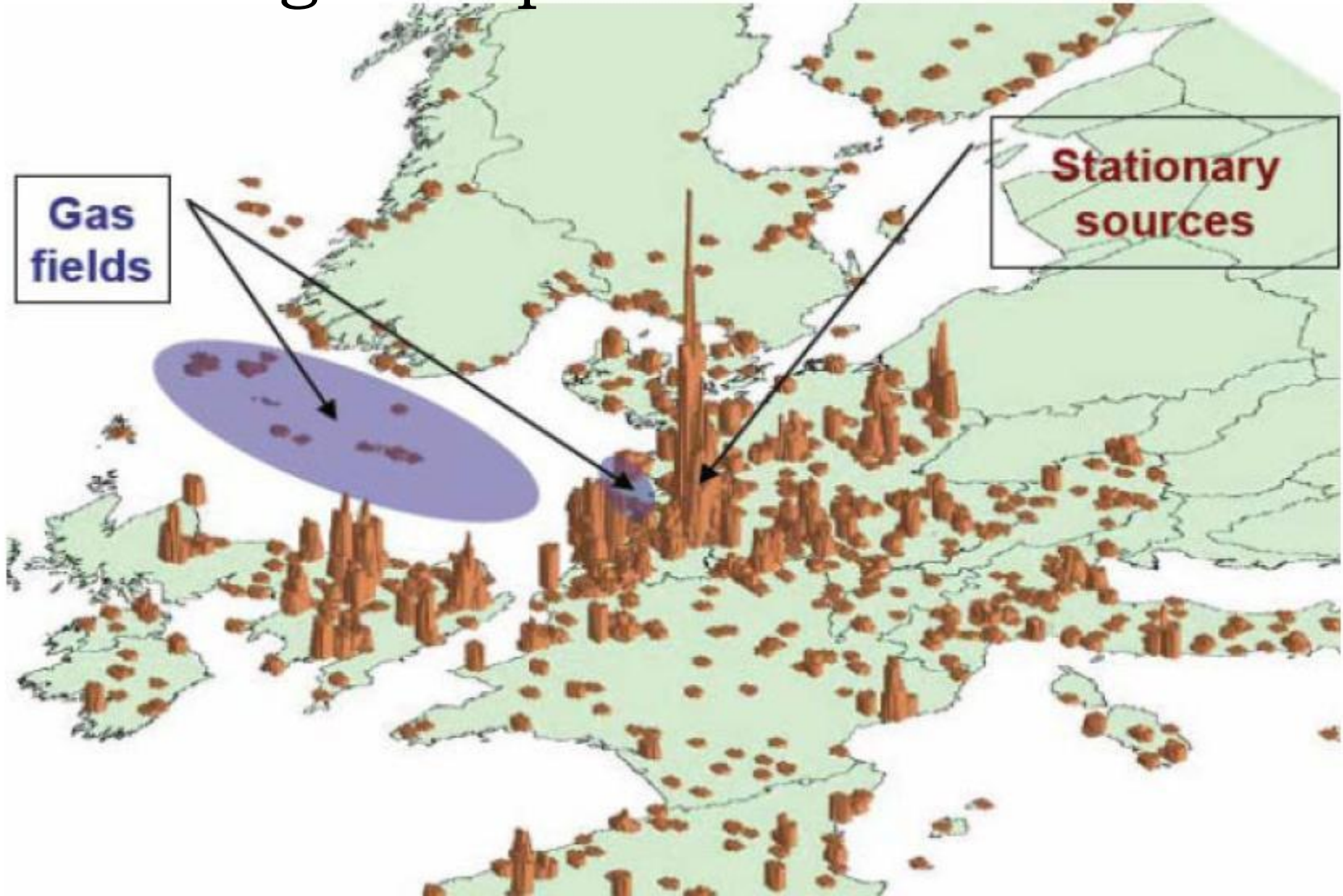
- Storage security depends on a combination of physical and geochemical trapping
- Over time, residual CO<sub>2</sub> trapping, solubility trapping and mineral trapping increase
- Appropriate site selection and management are the key to secure storage



# CO<sub>2</sub> opslagpotentieel in Nederland

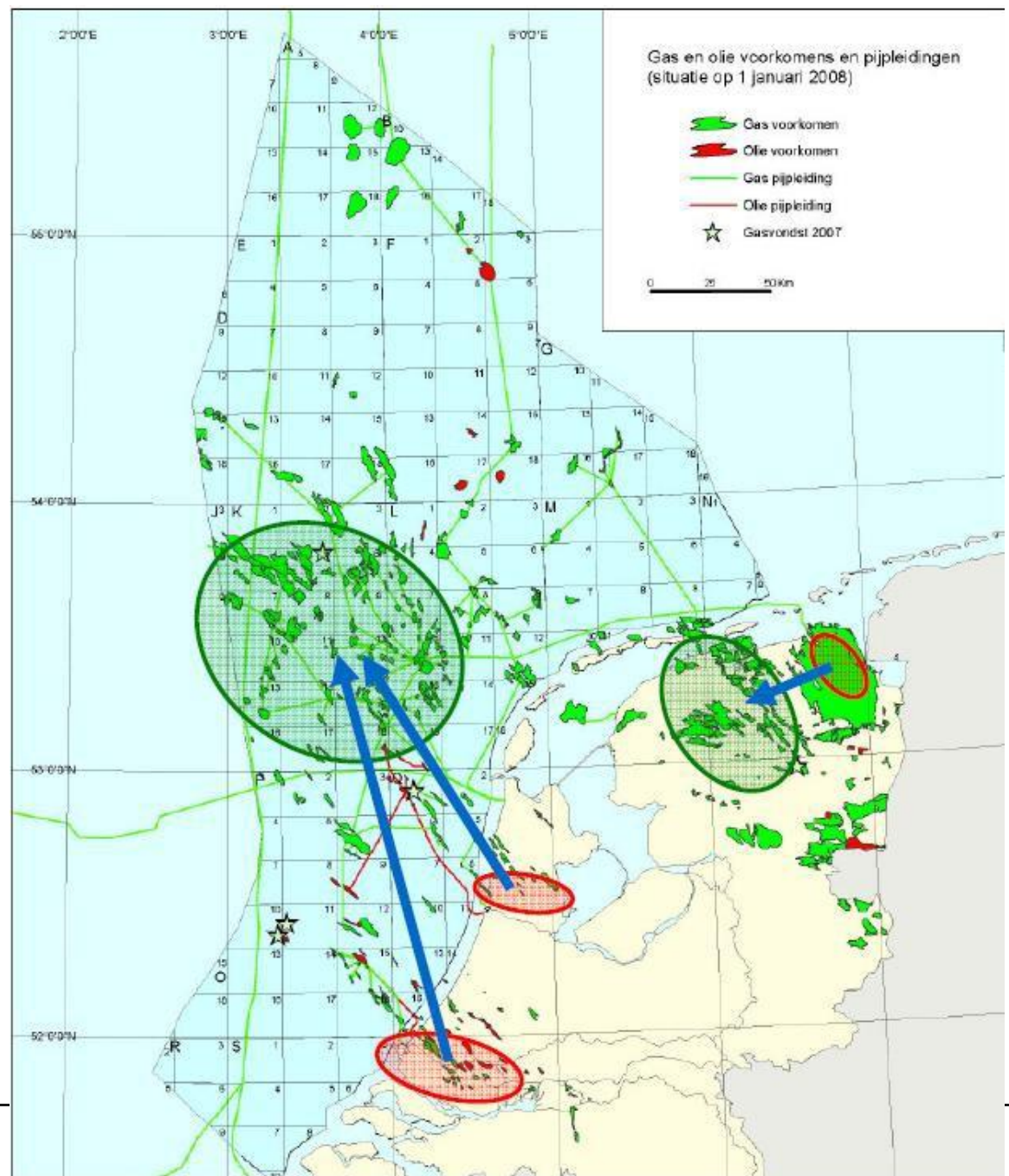
Lege gasvelden		Overig	
<b>Groningen:</b>	<b>&gt; 2040</b>	<b>7 350 Mton</b>	<b>Lege olievelden:</b> <b>40 Mton</b>
<b>Onshore:</b>	<b>&gt; 2020</b>	<b>1 600 Mton</b>	<b>Steenkoollagen:</b> <b>400 Mton</b>
<b>Offshore:</b>	<b>&gt; 2020</b>	<b>1 150 Mton</b>	<b>Aquifers:</b> <b>715 Mton</b>
Totaal kleine velden:		2 750 Mton	Totaal overig:
Totaal:		10 000 Mton	1 150 Mton
Bronnen			
<b>5 nieuwe kolencentrales 2010 - 2015 (capture ready):</b>		<b>25 Mton CO<sub>2</sub> per jaar</b>	
<b>5 Mton CO<sub>2</sub> per jaar per centrale</b>			
<b>Allocatie emissiehandel industriële bronnen:</b>		<b>100 Mton CO<sub>2</sub> per jaar</b>	
Capaciteit opvang <u>totaal theoretisch</u>			
<b>Kleine velden:</b>	<b>100 jaar voor 5 kolencentrales</b>	<b>/</b>	<b>25 jaar voor allocatie industrie</b>
<b>Groningen:</b>	<b>400 jaar voor 5 kolencentrales</b>	<b>/</b>	<b>100 jaar voor allocatie industrie</b>

# NL – logische plek voor CCS?



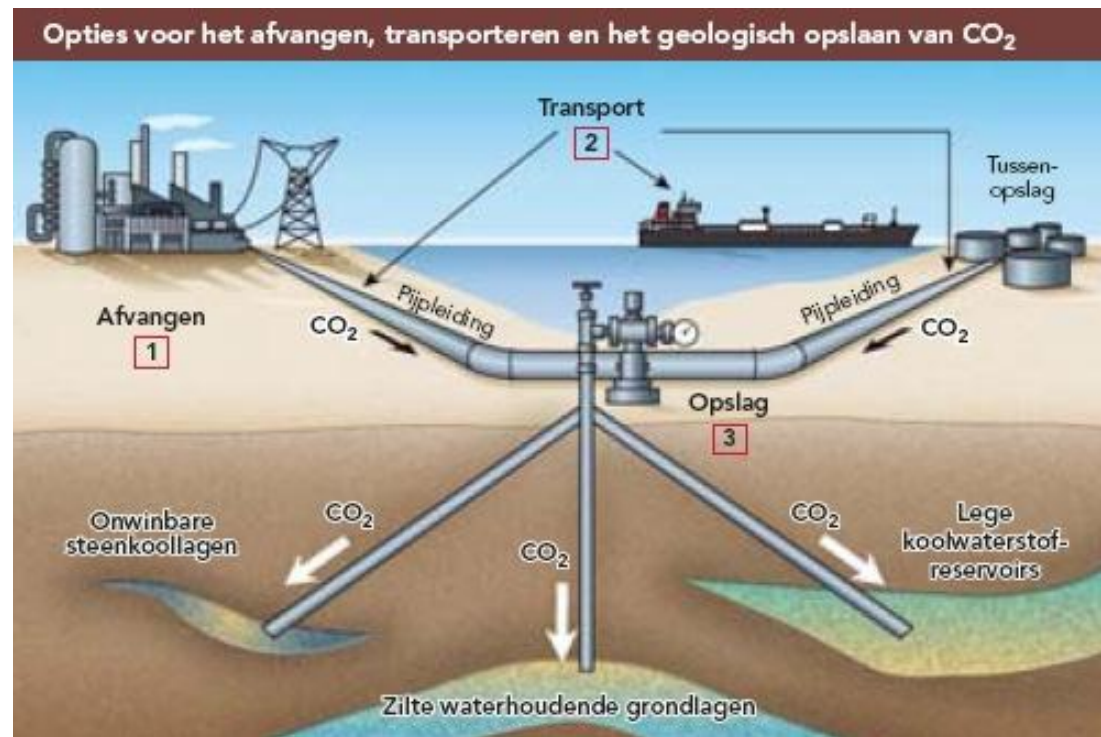
## Matchen

- Bronnen (centrales en industrie)
- Opslagen (lege gasvelden)
- Bestaande mijnbouwinstallaties en leidingen



# CO<sub>2</sub> transport

Om de afstand tussen CO<sub>2</sub> sources en sinks te overbruggen is er transportinfrastructuur nodig





# Emergent CO<sub>2</sub> infrastructure in NL

## OCAP-project

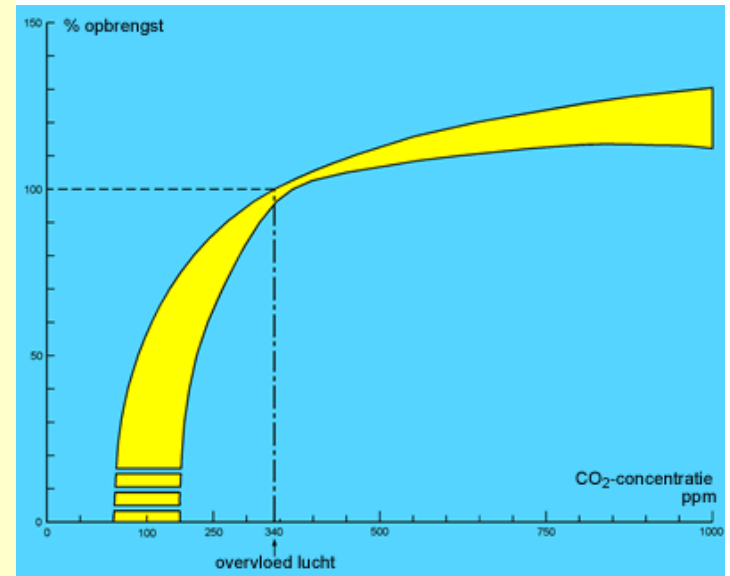
- Pipeline from R'dam
- CO<sub>2</sub> (170 ktpa) from
- JV VolkerWessels/HoekLoos
- Supply to greenhouses in Westland (1500 ha greenhouse culture; saves 95 Mm<sup>3</sup> natural gas annually)



# Plan CO<sub>2</sub>-opslag in Barendrecht

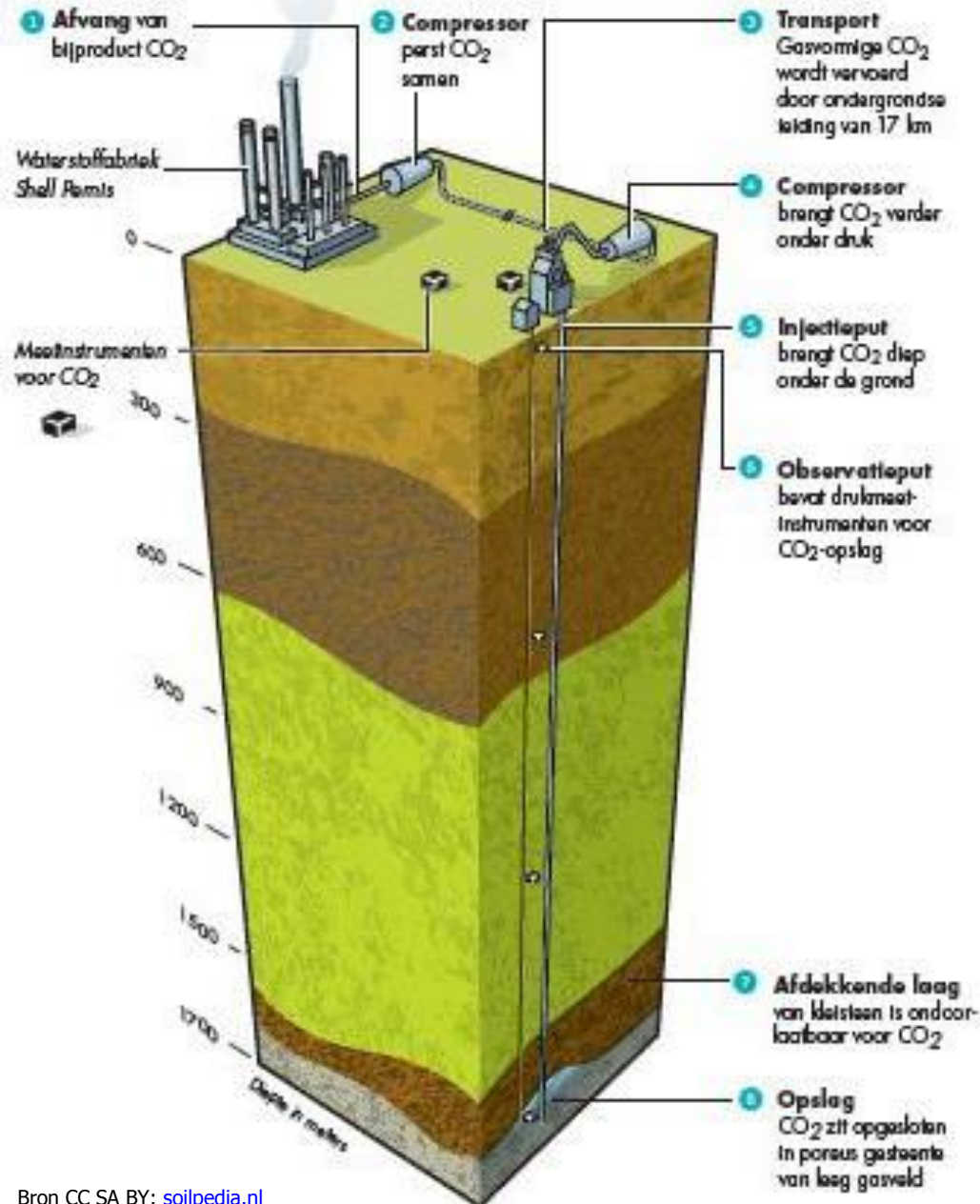


In tuinbouwkassen is overdag toevoer van CO<sub>2</sub> nodig voor de plantengroei. De planten nemen, bij voldoende licht, de CO<sub>2</sub> op uit de lucht en als er geen aanvulling komt, stagneert de groei. Het is mogelijk om de groei te bevorderen door een wat hogere concentratie aan te houden dan die in de buitenlucht. In de glastuinbouw gebruikt men de rookgassen van de verwarmingsketel om de benodigde CO<sub>2</sub> toe te voeren. De rookgassen bevatten veel CO<sub>2</sub>, maar een probleem is dat bij veel zonlicht er geen behoefte aan warmte is, maar juist een maximale behoefte aan CO<sub>2</sub>. Dat probleem wordt ondervangen door warmteopslag en door vloeibare CO<sub>2</sub> in te kopen. Dat laatste is duur en er moeten tankauto's voor rondrijden.



Het OCAP-project behelst de opvang van CO<sub>2</sub> (uit industriële bronnen en de ROCA centrale) en de plaatsing van compressoren om dit gas naar tuinders te transporteren. Hiervoor wordt gebruik gemaakt van een oude olieleiding tussen Rotterdam en Amsterdam, die al jarenlang buiten gebruik was. **De leiding wordt ook gebruik als gasopslag. In de nachturen, als er geen behoefte aan CO<sub>2</sub> is, wordt de leiding volgepompt tot een druk van 30 bar. In de daguren daalt de druk weer**

# CO<sub>2</sub>-opslag Barendrecht



Shell refinery, Pernis, produces 0.95 Mtpa pure CO<sub>2</sub>

Three outlets:

- 150 ktpa to soft drink industry
- 400 ktpa to greenhouse horticulture (summertime)
- 400 ktpa to be injected in empty gas field, Barendrecht

The plan was rejected by the Barendrecht town council.

# CO<sub>2</sub> infrastructuur in Rotterdam - 2011



2011

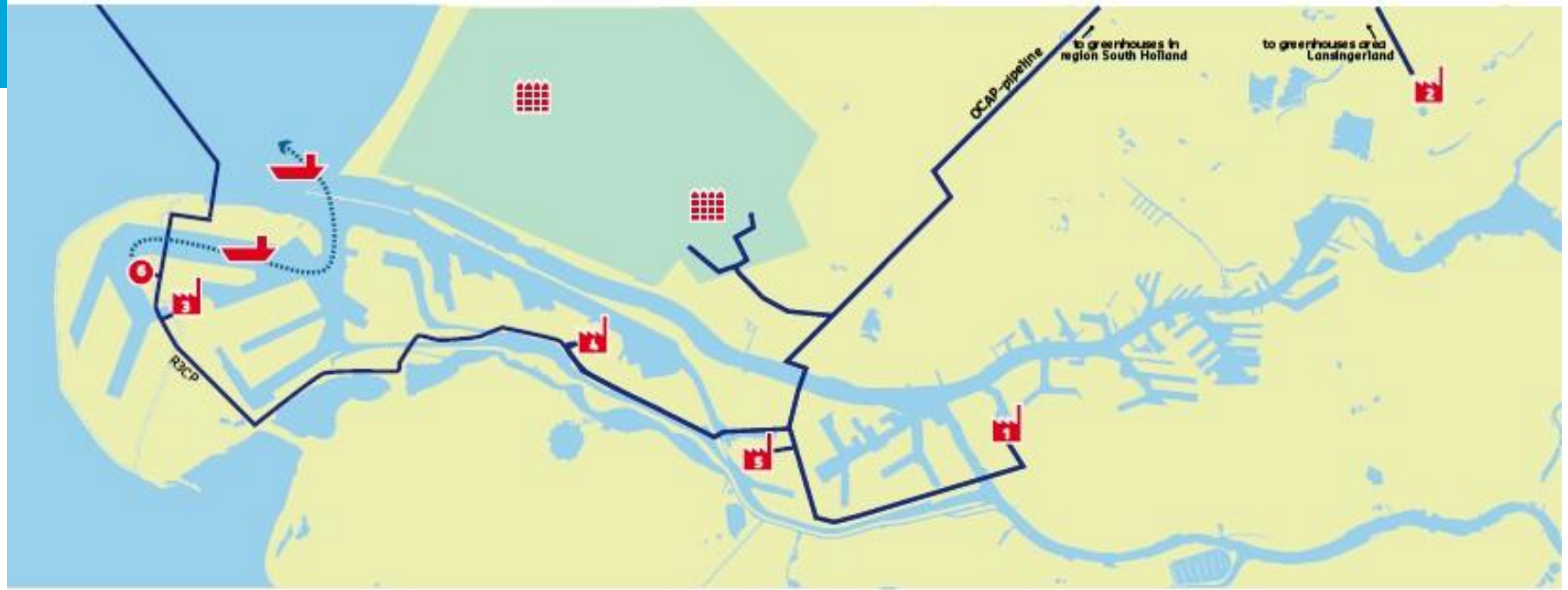
- Maasvlakte II, under construction
- Transport by pipeline
- Transport by ship
- CO<sub>2</sub> capture
- Green houses
- Energy intensive industry
- CO<sub>2</sub> Hub

- 1 Shell Pernis
- 2 E.ON-ROCA
- 3 E.ON CO<sub>2</sub>-Catcher (CATO-2 pilot project)
- 4 Abengoa

2011



# CO<sub>2</sub> infrastructuur in Rotterdam - 2015



- Transport by pipeline
- Transport by ship
- CO<sub>2</sub> capture
- Green houses
- Energy intensive industry
- CO<sub>2</sub> Hub

## 2015

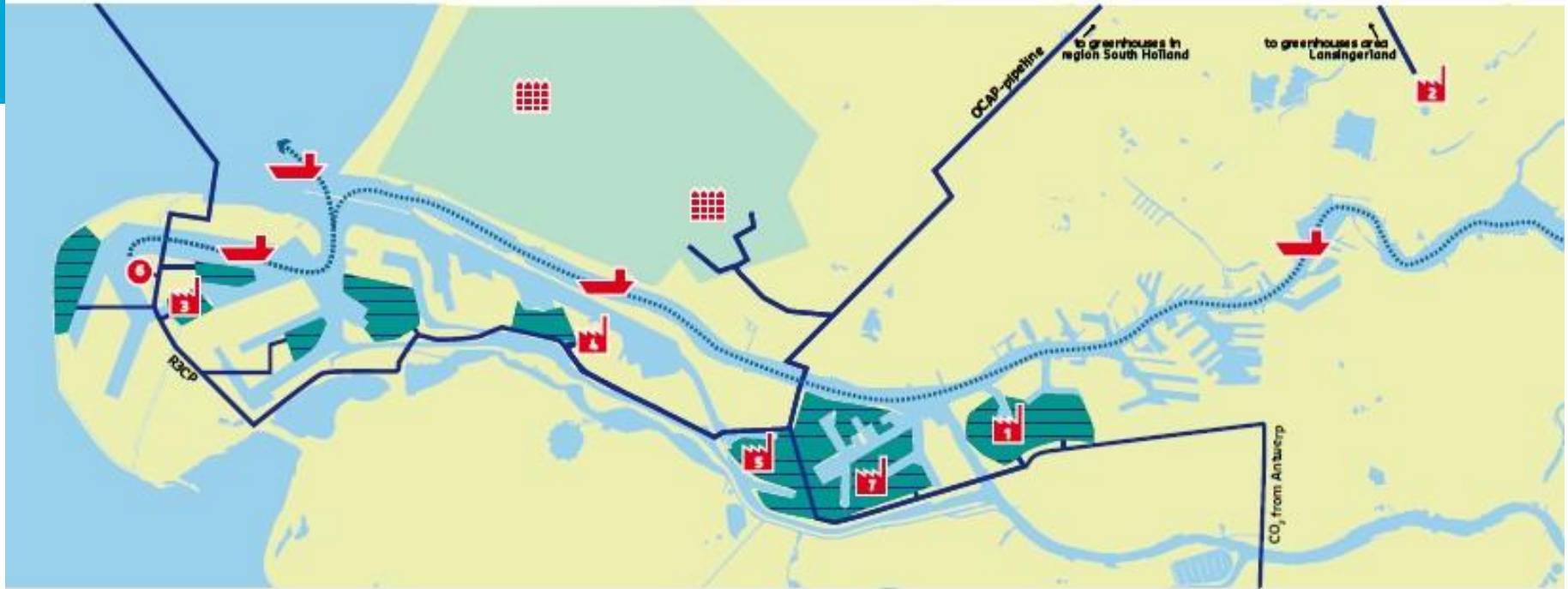
- 1 Shell Pernis
- 2 E.ON-ROCA
- 3 ROAD
- 4 Abengoa
- 5 Air Liquide
- 6 CO<sub>2</sub> Hub CINTRA

Pegasus: location not yet determined

2015



# CO<sub>2</sub> infrastructuur in Rotterdam - 2025



- Transport by pipeline
- Transport by ship
- CO<sub>2</sub> capture
- Green houses
- Energy intensive industry
- CO<sub>2</sub> Hub

## 2025

- 1 Shell Pernis
  - 2 E.ON-ROCA
  - 3 ROAD
  - 4 Abengoa
  - 5 Air Liquide
  - 6 CO<sub>2</sub> Hub CINTRA
  - 7 Air Products
- Connecting industry to CCS network (not just large scale dem's)

Pegasus: location not yet determined

2025

# Multi-source inzameling en transport van CO<sub>2</sub>

- Inzamelen CO<sub>2</sub> (post- en pre-combustion) van meerdere (kleinere) industriële bronnen
- Transport (via gedeelde infrastructuur) naar opslaglocatie(s) en/of gebruikslocatie(s)

## COCATE-project onderzoekt de alternatieven:

- Lage druk transportnetwerk voor vloeibaar CO<sub>2</sub> (Ile Havre)
- Hoge druk transportnetwerk voor gasvormig CO<sub>2</sub> (Rotterdam)
- Transport naar offshore opslaglocaties per boot of pijpleiding



# CO<sub>2</sub> Pipelines (for EOR Projects)



# Transport van CO<sub>2</sub>

## Transport per pijpleiding:

In het Westen van de USA bestaat al een CO<sub>2</sub>-leidingnetwerk met een lengte van meer dan 2500 km, waardoorheen meer dan 50 miljoen ton CO<sub>2</sub> per jaar stroomt ten behoeve van de aardolie-industrie (EOR). Het gas wordt op een druk van 120-180 bar gebracht, en op druk gehouden door tussenliggende pompstations wanneer grote afstanden overbrugd worden. De samenstelling van het gas dient aan bepaalde specificaties te voldoen om corrosie te vermijden.

## Transport per schip:

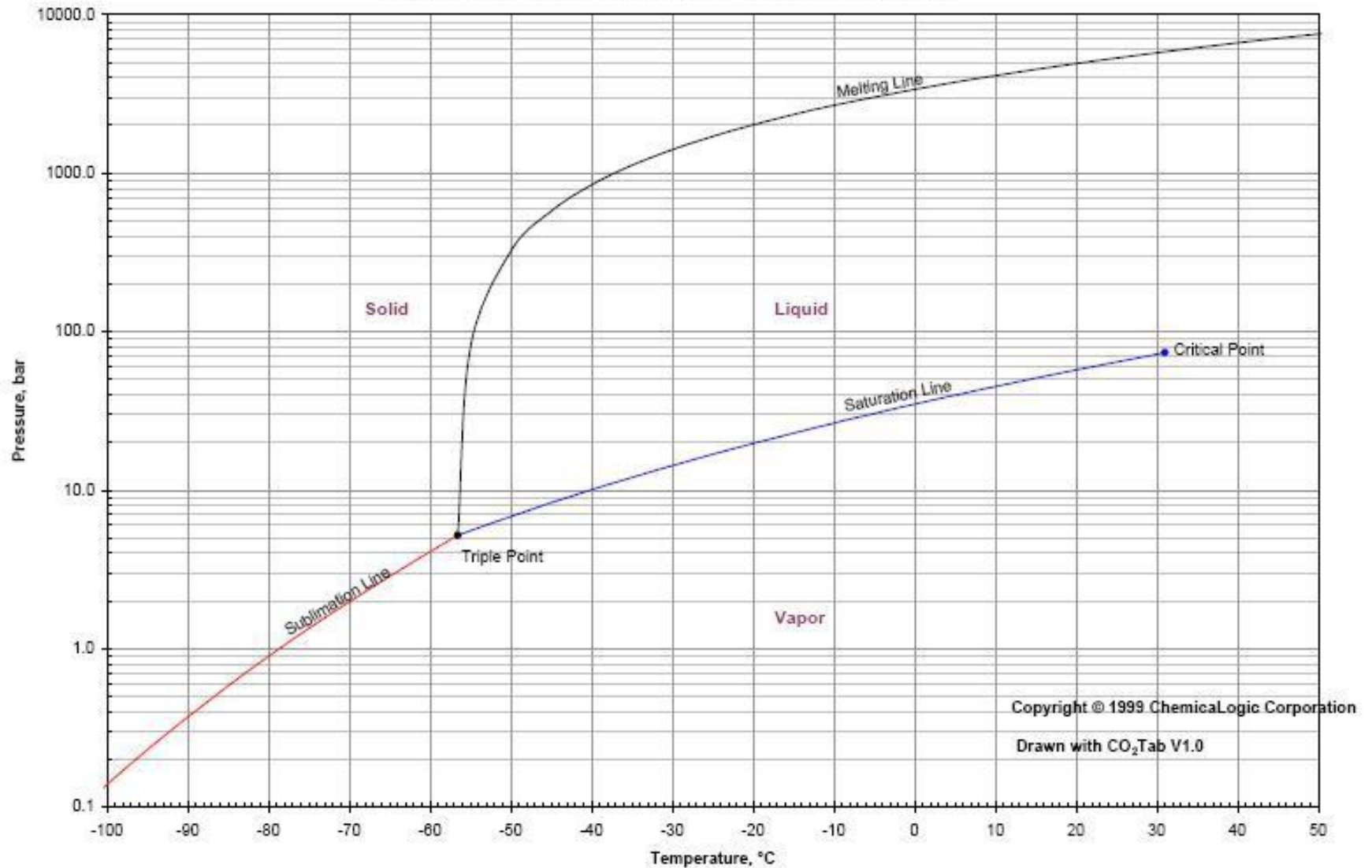
Door de afgevangen CO<sub>2</sub> samen te persen tot 6 bar, en daarna af te koelen tot -55°C wordt het gas vloeibaar, en stijgt de dichtheid ervan tot 1.200 kg/m<sup>3</sup>. De vloeibare CO<sub>2</sub> kan vervoerd worden in schepen.

# Fysische eigenschappen CO<sub>2</sub>

Kooldioxide is als gas onder atmosferische omstandigheden ongeveer 1,5 maal zo zwaar als lucht. Daarom stroomt CO<sub>2</sub> hoofdzakelijk naar beneden, en kan het zich in besloten ruimten zoals kelderruimtes, tanks of lager gelegen terreingedeelten ophopen. Bij weinig of geen ventilatie of luchtbeweging kunnen dergelijke CO<sub>2</sub>-concentraties urenlang blijven hangen.

- CO<sub>2</sub> is onder atmosferische omstandigheden gasvormig.
- Bij temperaturen tussen  $-56,6^{\circ}\text{C}$  en  $+31,1^{\circ}\text{C}$  en een druk hoger dan 5,2 bar kan CO<sub>2</sub> in vloeibare vorm voorkomen.
- Bij atmosferische druk (1 bar) kan CO<sub>2</sub> niet vloeibaar zijn.
- Bij temperaturen onder de  $-56,6^{\circ}\text{C}$  kan CO<sub>2</sub> in vaste toestand voorkomen.
- Uitsluitend op het zogenaamde **tripelpunt** ( $-56,6^{\circ}\text{C}$  en 5,2 bar) zijn alle drie de aggregatietoestanden (gas, vast en vloeibaar) mogelijk.

## Carbon Dioxide: Temperature - Pressure Diagram

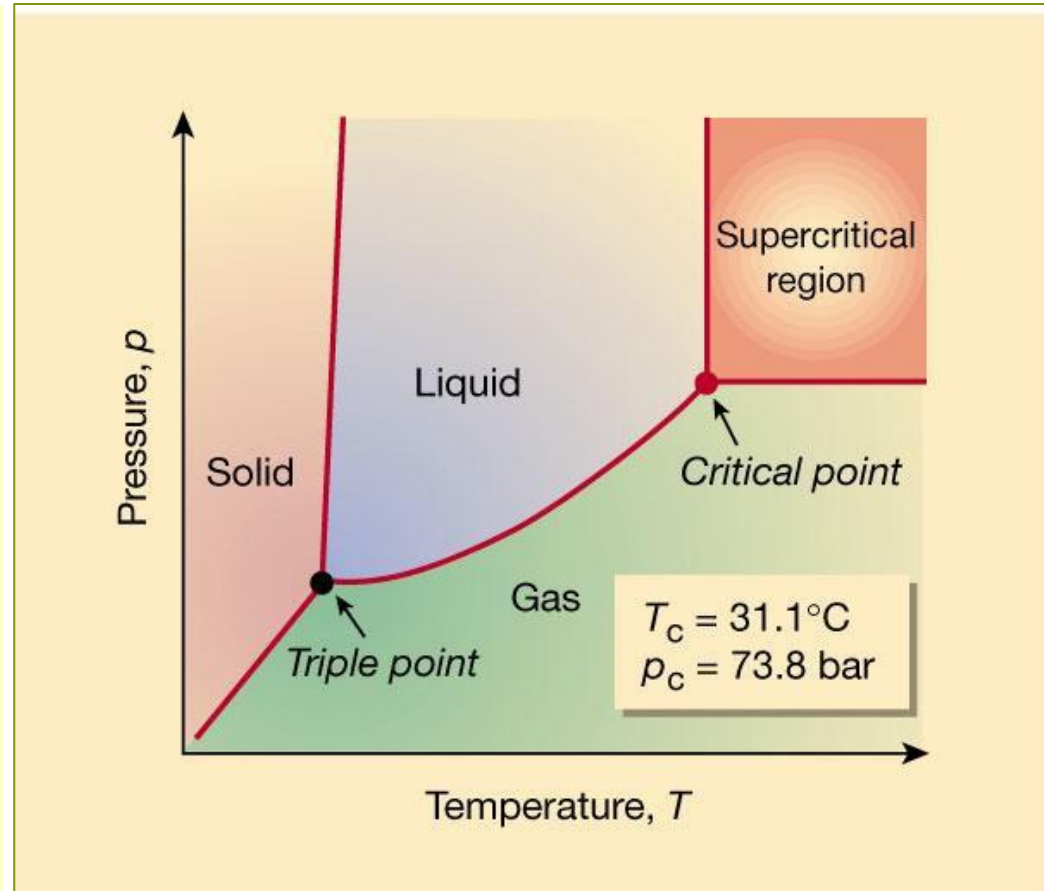


Het tripelpunt van CO<sub>2</sub> ligt bij -56,6°C en 5,185 bar

# Superkritisich CO<sub>2</sub>

De kritische temperatuur van CO<sub>2</sub> is 31.1 °C bij een kritische druk van 73.825 bar (kritische dichtheid 464 kg/m<sup>3</sup>). Ter vergelijking: voor water bedraagt de kritische temperatuur 374.4 °C bij een kritische druk van 226.8 bar

Fysisch-chemische eigenschappen kunnen sterk veranderen op het moment dat een stof superkritisich wordt. Zo heeft superkritisich CO<sub>2</sub> (afgekort als scCO<sub>2</sub>) de **fysische eigenschappen van gasvormig CO<sub>2</sub>** (hoge diffusiviteit, lage viscositeit, geen oppervlaktespanning) en de **chemische eigenschappen van vloeibaar CO<sub>2</sub>** (hoge dichtheid en groot oplossend vermogen). Deze fysisch-chemische eigenschappen kunnen worden gewijzigd door het aanpassen van druk en/of temperatuur



# Transport van CO<sub>2</sub>

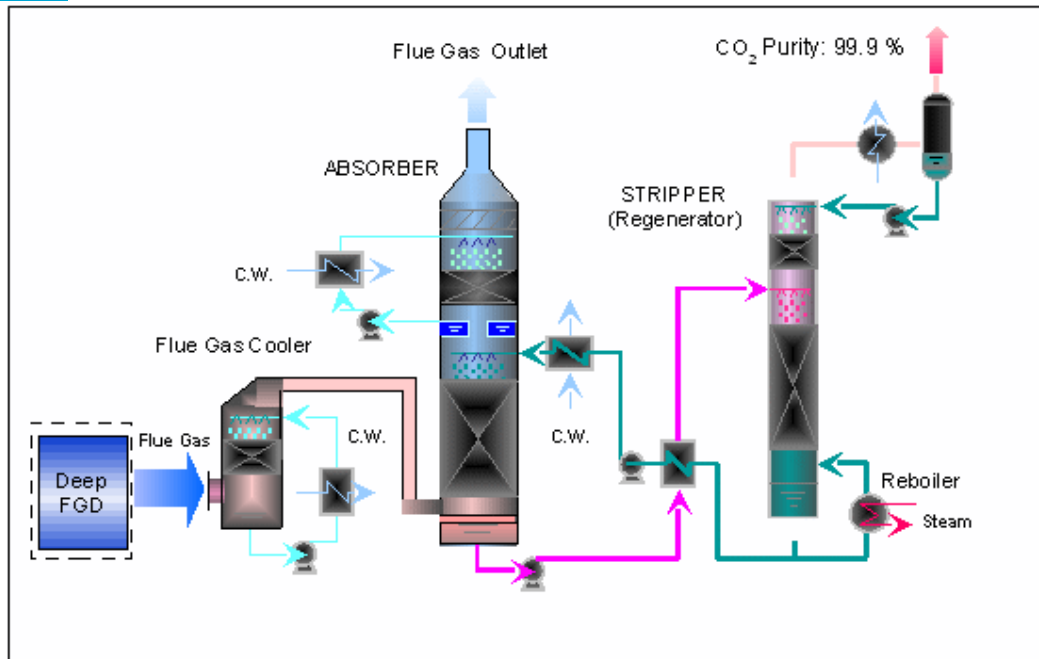
CO<sub>2</sub> neemt onder atmosferische druk zeer grote volumes in (de dichtheid is dan 2 kg/m<sup>3</sup>, ongeveer 1.5 maal zo zwaar als lucht), en het transport onder die omstandigheden zou zeer omvangrijke installaties vergen. Wanneer men het samendrukt wordt het volume veel kleiner (denk aan een fietspomp), en kan gemakkelijker vervoerd worden via pijpleidingen.

Wanneer men de druk verhoogt tot boven 74 bar (critical point op het fasendiagram) wordt CO<sub>2</sub> zelfs "vloeibaar" (en blijft het vloeibaar bij alle temperaturen boven -55°C), en heeft het een dichtheid van ongeveer 800 – 900 kg/m<sup>3</sup>. Het kan dan gemakkelijk getransporteerd worden via pijpleidingen. Een andere manier om CO<sub>2</sub> vloeibaar te maken bestaat erin het af te koelen en samen te drukken tot juist boven het zgn. "tripel point" (-56.6 °C, 5.2 bara) op het fasendiagram, ervoor zorgend in het "vloeibare" gebied te blijven (cryogene manier). De dichtheid ligt dan zelfs rond 1200 kg/m<sup>3</sup>. Leidingen en vaten moeten voldoende thermisch geïsoleerd worden, en de materialen moeten die lage temperaturen kunnen verdragen. Dit is de aangewezen manier voor vervoer per schip.

# Wat hebben we vandaag geleerd?

- Afvangen (capture) van CO<sub>2</sub> is vooralsnog beperkt tot grootschalige industriële bronnen en elektriciteitscentrales; voor kleinschalige bronnen ligt inzameling en centrale “zuivering” meer voor de hand.
- Er zijn verschillende procesroutes voor CO<sub>2</sub> capture; gegeven de levensduur van elektriciteitscentrales zal er de komende jaren veel behoefte zijn aan post-combustion capture technologie.
- Nuttige toepassingsmogelijkheden voor CO<sub>2</sub> betreffen vooral Enhanced Oil & Gas Recovery; bij toepassing als meststof gelden hoge eisen aan kwaliteit en leverbetrouwbaarheid.
- De veiligheid van geologische CO<sub>2</sub> opslag berust op een aantal “trapping” mechanismen; welke zijn dat?
- Wat zijn de veiligheidsrisico's bij transport van CO<sub>2</sub>?
- Waarom wordt CO<sub>2</sub> bij langeafstandstransport door pijpleidingen meestal in superkritische toestand vervoerd? Welke bijzondere eigenschappen heeft superkritisch CO<sub>2</sub>?
- Bij transport per schip wordt CO<sub>2</sub> meestal gekoeld in vloeibare toestand vervoerd; wat is het belangrijkste verschil met LNG tankers?

# Post-combustion carbon capture: MHI process



Mitsubishi's carbon capture technology

The most common type of amine solvent used in the commercial market place is **monoethanol-amine (MEA)**. The main concerns with MEA and other amine solvents are high levels of **corrosion and degradation** in the presence of O<sub>2</sub> and other impurities, excessive solvent degradation rates following reaction with SO<sub>x</sub> and NO<sub>x</sub> and the large **energy consumption requirements needed for regeneration**. These factors contribute to the use of large equipment, high solvent consumption and large energy losses leading to increased operating costs.

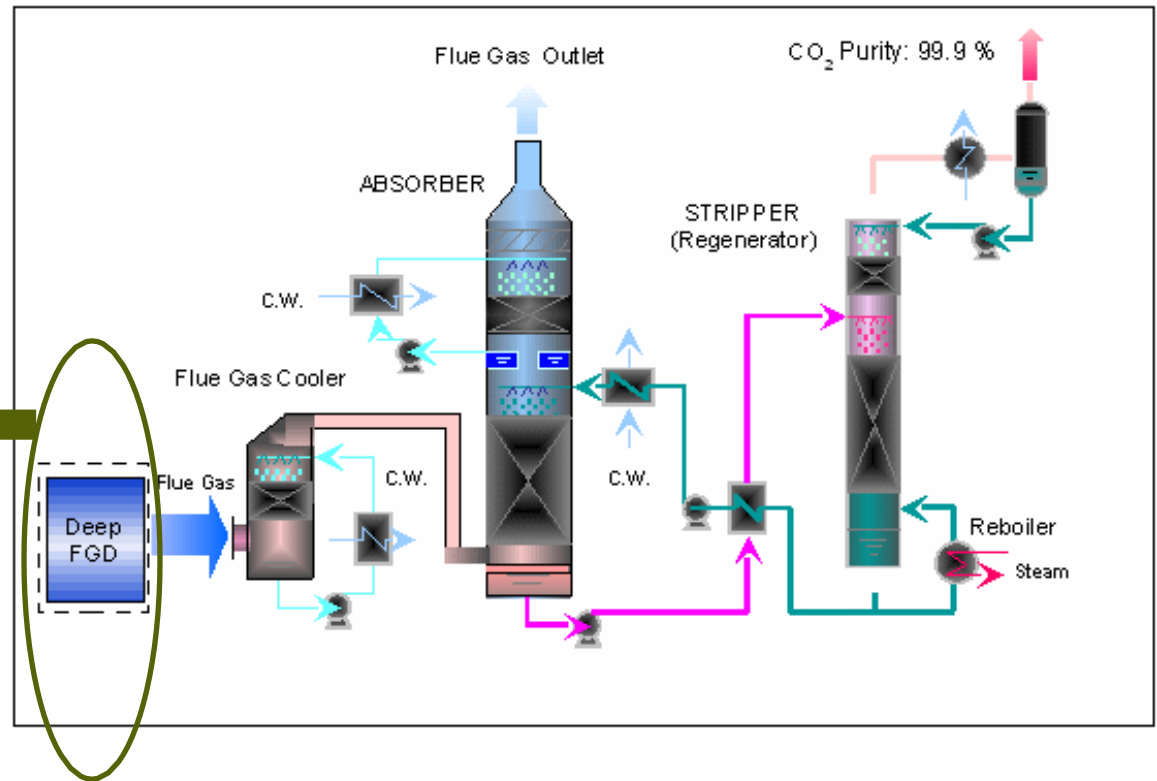
MHI developed a proprietary solvent, KS-1(TM), with an exceptionally low corrosive nature which, unlike MEA, does not require a corrosion inhibitor. This factor means carbon steel can be used for the majority of construction within the CO<sub>2</sub> capture plant. Furthermore, the process operates at atmospheric pressure (ensuring a safe work environment), has few exotic materials and a simple configuration.



# Post-combustion carbon capture: MHI process

## Deep Flue Gas Desulfurization:

Flue gas produced from the combustion of coal for power generation must first pass through a deep flue gas desulphurization (FGD) unit, which lowers the sulphur dioxide (SO<sub>2</sub>) levels and cools the gas stream, prior to entering the CO<sub>2</sub> capture plant. If the flue gas is from a natural gas fired application an FGD may not be required as the SO<sub>2</sub> content in the gas stream is minimal. Therefore, depending on the fuel type, a Deep FGD process may or may not be necessary.



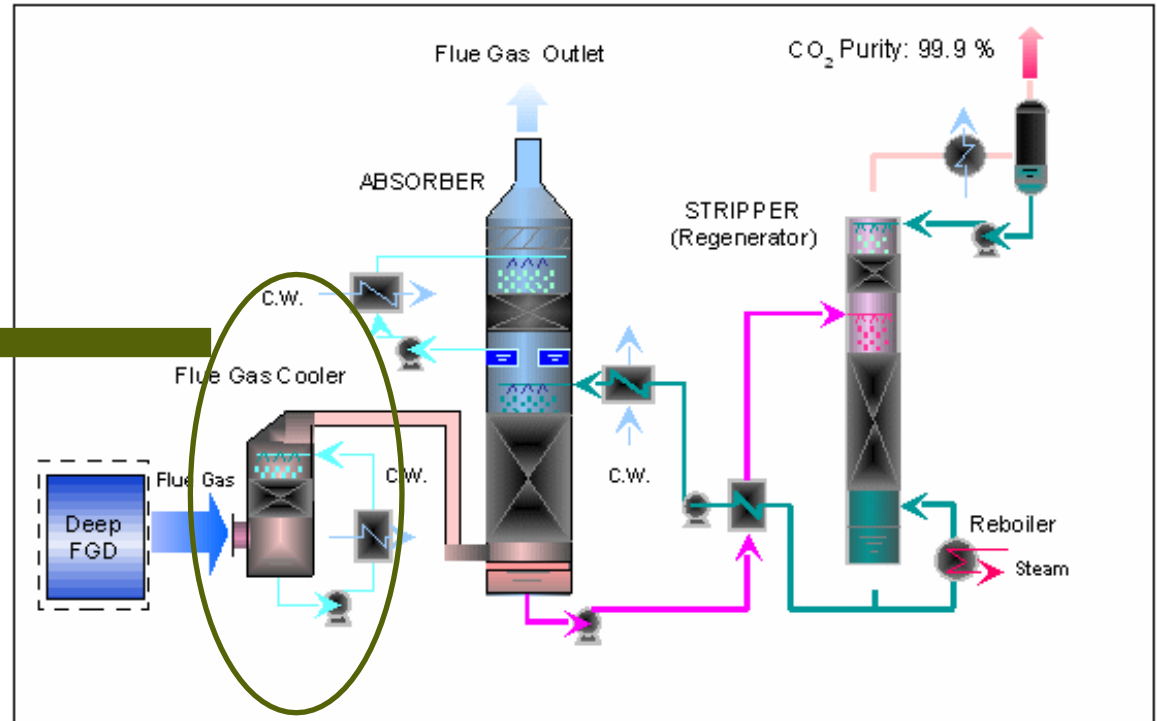
# Post-combustion carbon capture: MHI process

The primary objective of the **Flue Gas Water Cooler (FGWC)** is to further cool the flue gas prior to entering the CO<sub>2</sub> absorber

The lower flue gas temperature increases the efficiency of the exothermic CO<sub>2</sub> absorption reaction and minimizes KS-1 (TM) solvent loss due to gas phase equilibrium increases.

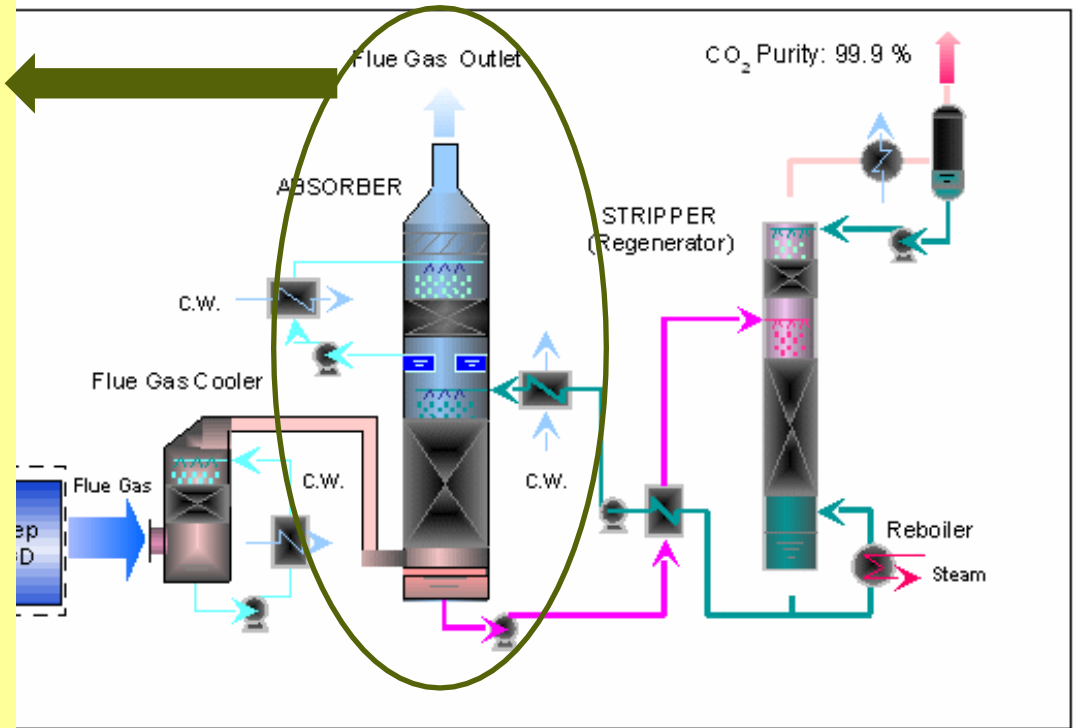
The optimum temperature range for CO<sub>2</sub> recovery is 35-45°C, however this is flexible in consideration of other factors such as water utility requirements and availability.

The FGWC is designed and constructed to not only to cool the flue gas, but to also further remove various impurities such as SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub>, dust and suspended particulate matter



# Post-combustion carbon capture: MHI process

The CO<sub>2</sub> Absorber has two main sections, the **CO<sub>2</sub> absorption section** (bottom section), and the treated flue gas washing section (top section). The conditioned flue gas from the FGWC flows upward through structured, stainless steel packing material while the CO<sub>2</sub> lean KS-1 (TM) solvent is distributed evenly from the top of the absorption section onto the packing material. The flue gas comes into direct contact with the KS-1 (TM) solvent and CO<sub>2</sub> in the flue gas is absorbed. The CO<sub>2</sub> rich KS-1 (TM) solvent (rich solvent) is pumped to the CO<sub>2</sub> Regeneration unit for steam stripping. The clean flue gas then moves up into the **treated flue gas washing** section of the absorber. This section is where vaporized KS-1 (TM) solvent is removed and recycled and the flue gas is again cooled to maintain water balance within the system (the absorption of CO<sub>2</sub> in the KS-1 (TM) solvent produces some rise in temperature). The clean flue gas then exits the top section of the CO<sub>2</sub> Absorber

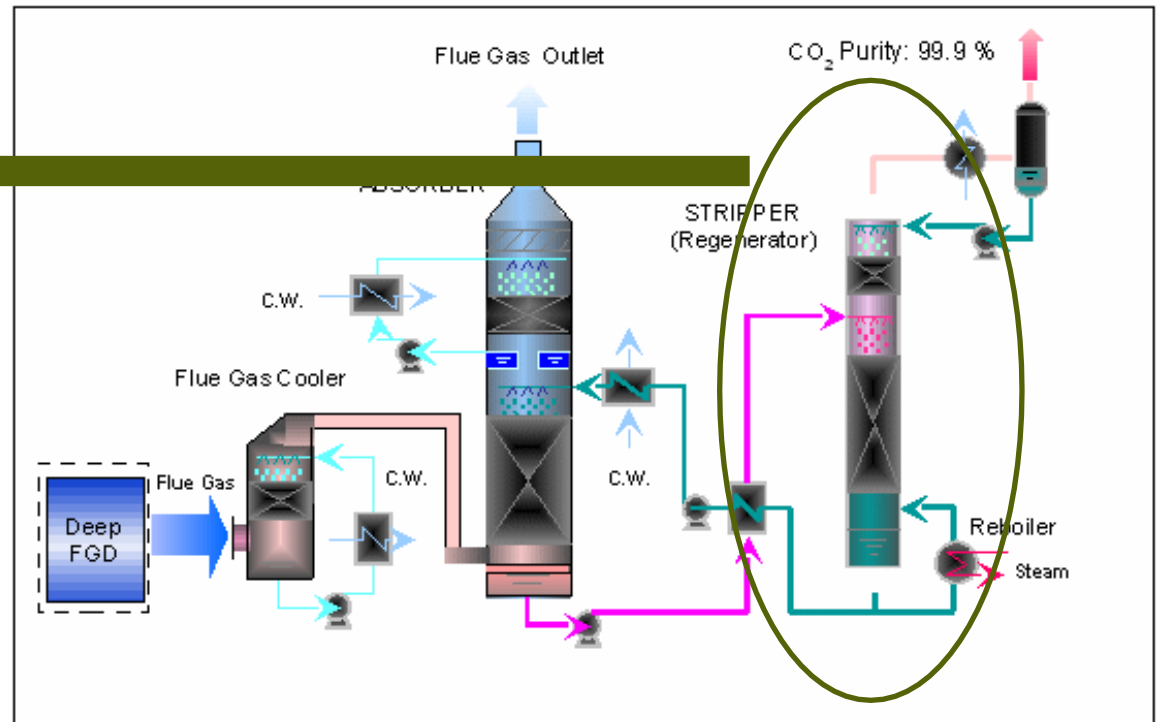


# Post-combustion carbon capture: MHI process

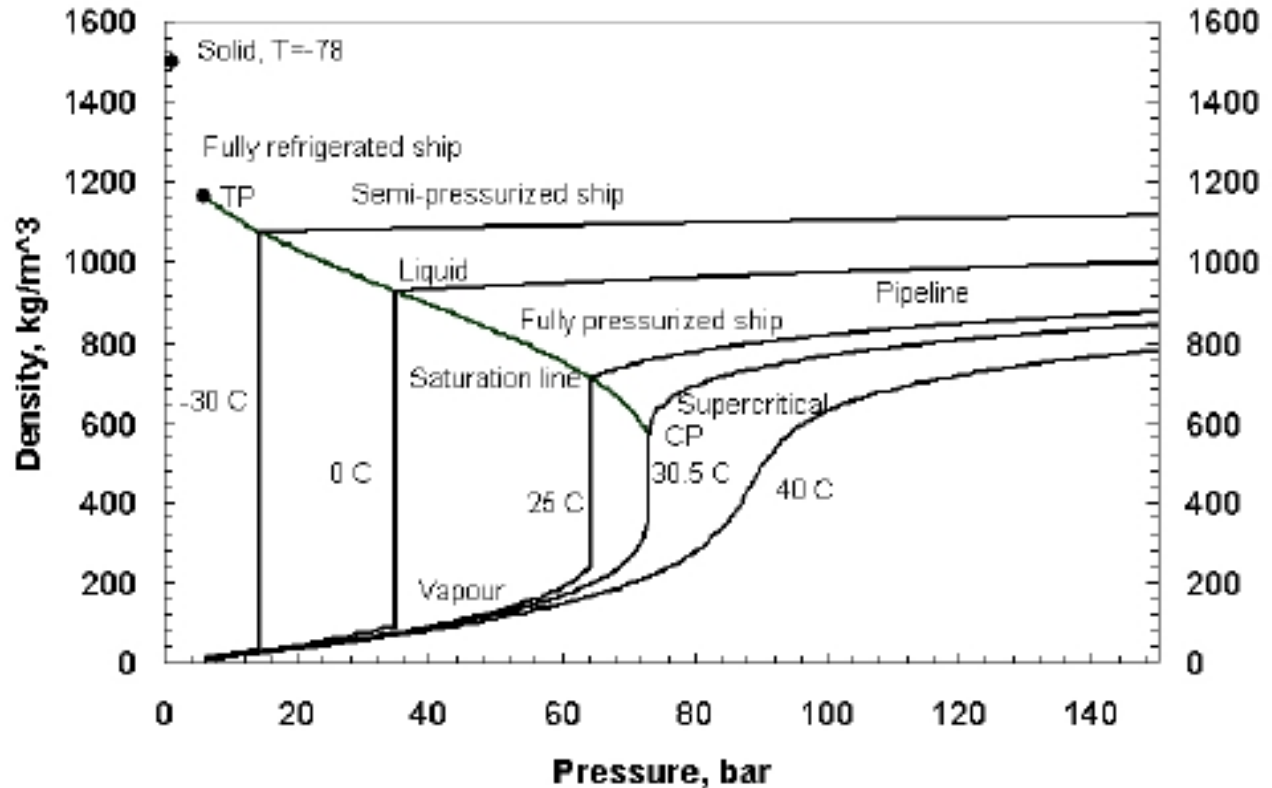
The rich solvent is pre-heated in a heat exchanger using heat from the hot lean solvent coming from the bottom of the **CO<sub>2</sub> Stripper**.

The heated rich solvent is then introduced into the upper section of the CO<sub>2</sub> Stripper, where it will come into contact with stripping steam of around 120°C. The rich solvent is then stripped of its CO<sub>2</sub> content and converted back into lean solvent.

The high purity CO<sub>2</sub> (>99.9%) exits the top of the stripper vessel and is compressed and dehydrated, prior to transportation. Once stripped, the now lean solvent is cooled to the optimum reaction temperature of approx. 40°C before being reintroduced to the top of the absorption section of the CO<sub>2</sub> Absorber unit.



# Transport van CO<sub>2</sub>



Optimale druk voor transport van CO<sub>2</sub> in relatie tot transportmodaliteit

A. Aspelund, T.E. Sandvik, H. Krogstad, and G. De Koeijer, LIQUEFACTION OF CAPTURED CO<sub>2</sub> FOR SHIP-BASED TRANSPORT