

Politicians debating Global Warming



Sculpture by Isaac Cordal (Berlin)

**'Klimaatbeleid moet om
na Parijs'**

Trouw, 14 december 2015

**Barack Obama: “We’ve got to
accelerate the transition away
from dirty energy”**

State-of-the-Union, 12 January 2016

**‘Trump begint vandaag met de
ontmanteling van Obama's
klimaatbeleid’**

Volkskrant, 28 maart 2017

Noodzaak, status en potentie van CC(U)S

***“Ruim beneden 2 °C en streven
naar maximaal 1,5 °C”***

Wat betekent dit?

Wim Turkenburg

Copernicus Institute, Utrecht University

w.c.turkenburg@uu.nl

&

*Wim Turkenburg Energy and Environmental
Consultancy, Amsterdam*

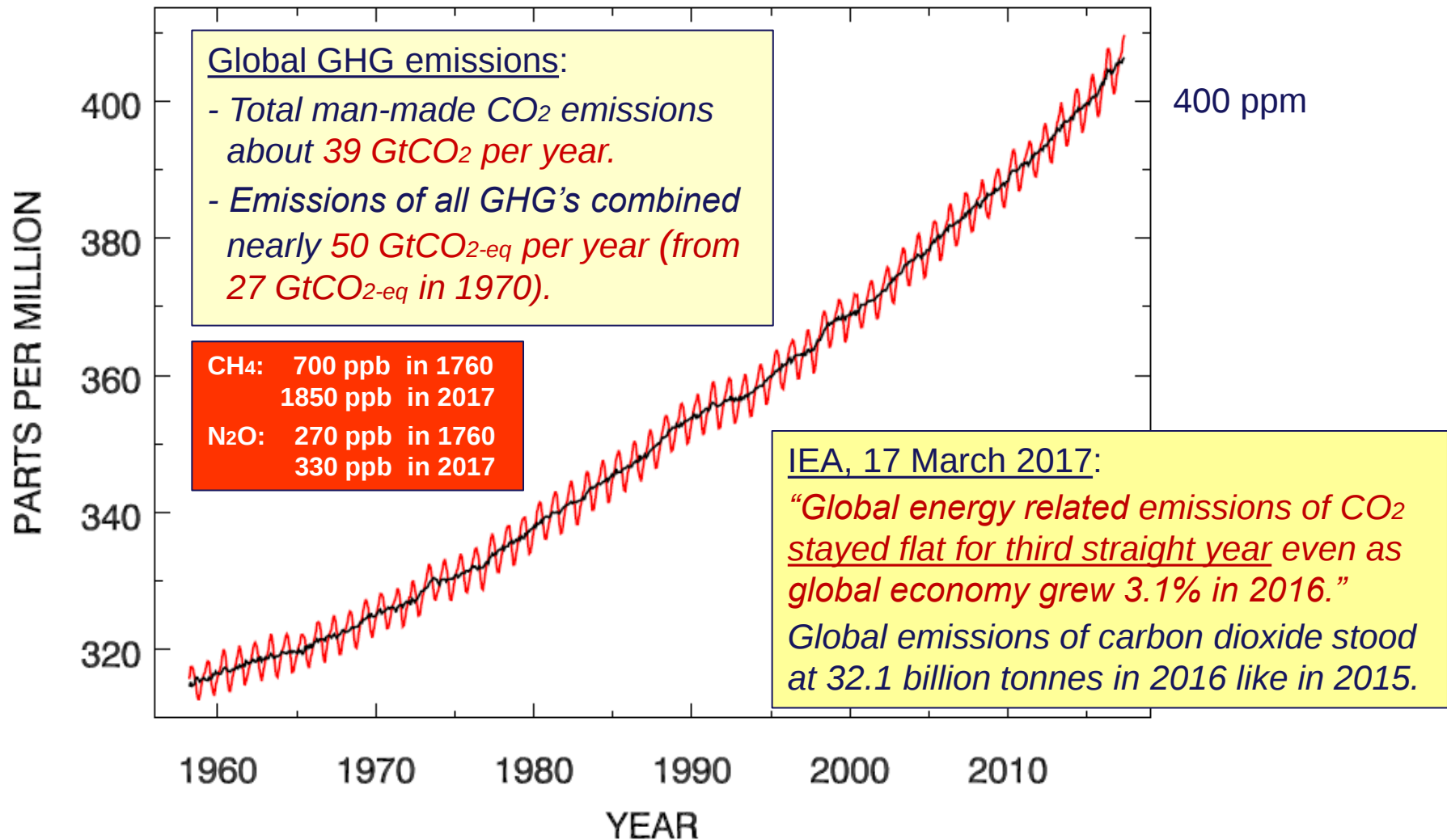
wim_turkenburg@hotmail.com

PvdA Duurzaam, sectie Energie
Utrecht - 26 september 2017

1.

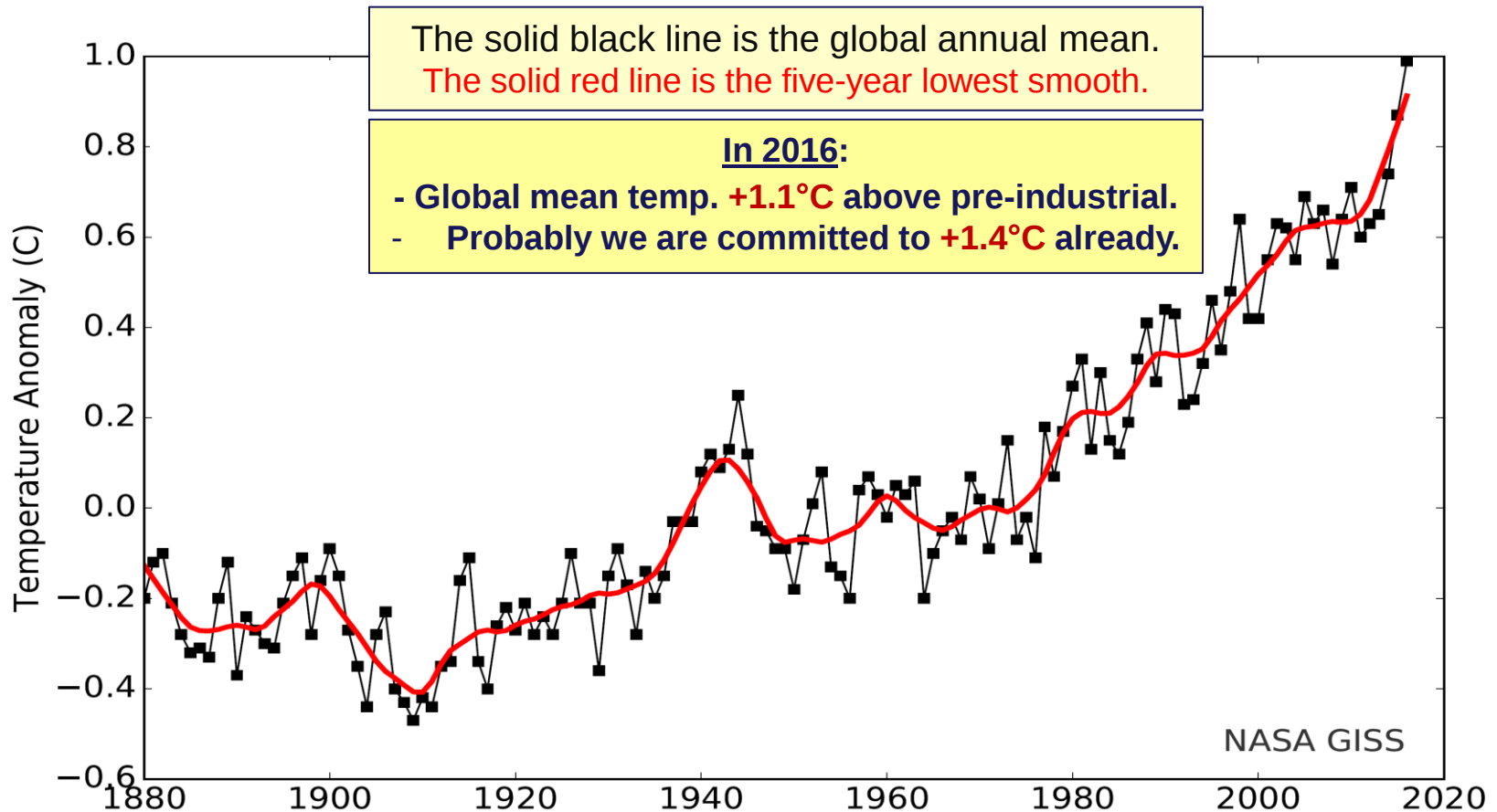
***Klimaatverandering
&
Klimaatakkoord Parijs***

Monthly average CO₂ concentration in the atmosphere at Mauna Loa Observatory (1958 – June 2017)



Land-ocean temperature index

(1880 to present, with base period 1951-1980)



NASA: “2016 marks three consecutive years of record warmth for the globe”

Sources: <https://data.giss.nasa.gov/gistemp/graphs/customize.html> & <https://www.ncdc.noaa.gov/>

Important articles from the Paris Climate Agreement

(COP21, Paris, 12 December 2015)

Article 2:

"This agreement aims to strengthen the global response to the threat of climate change (...) by:

(...) Holding the increase in the global average temperature to well below 2 °C above pre-industrial levels and to pursue efforts to limit the temperature increase to 1.5 °C above pre-industrial levels, recognizing that this would significantly reduce the risks and impacts of climate change." (...)

Article 4.1:

"Parties aim to reach global peaking of greenhouse gas emissions as soon as possible (...) and to undertake rapid reductions thereafter (...) as to achieve a balance between anthropogenic emissions by sources and removals by sinks of greenhouse gases in the second half of this century (...)"

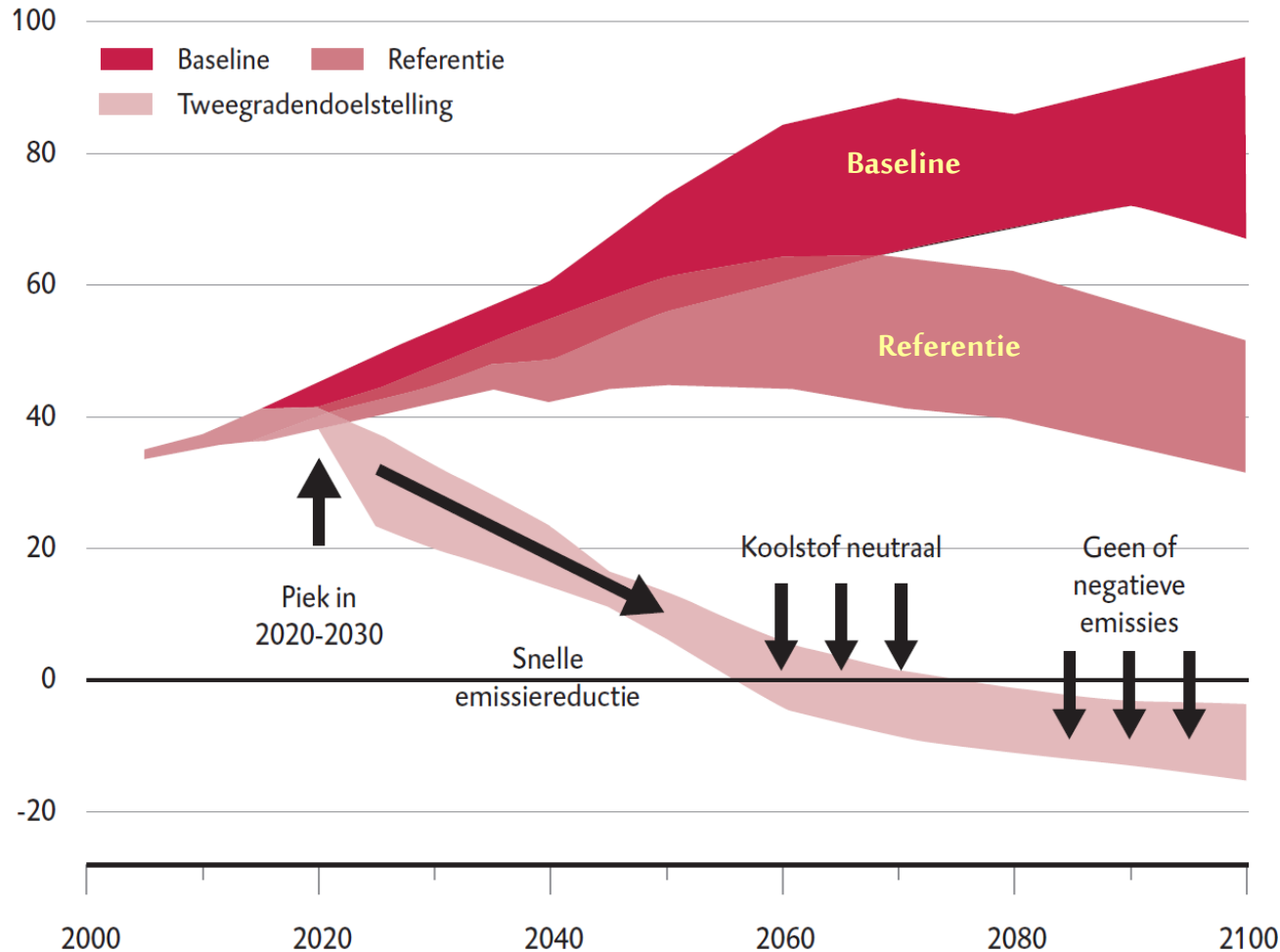
2.

***Wat is nodig voor realisatie
“ruim beneden twee graden en
streven naar niet meer dan
anderhalve graad”?***

Er is een trendbreuk nodig in mondiale broeikasgasemissies

Mondiale CO₂-emissies

Gt CO₂ per jaar

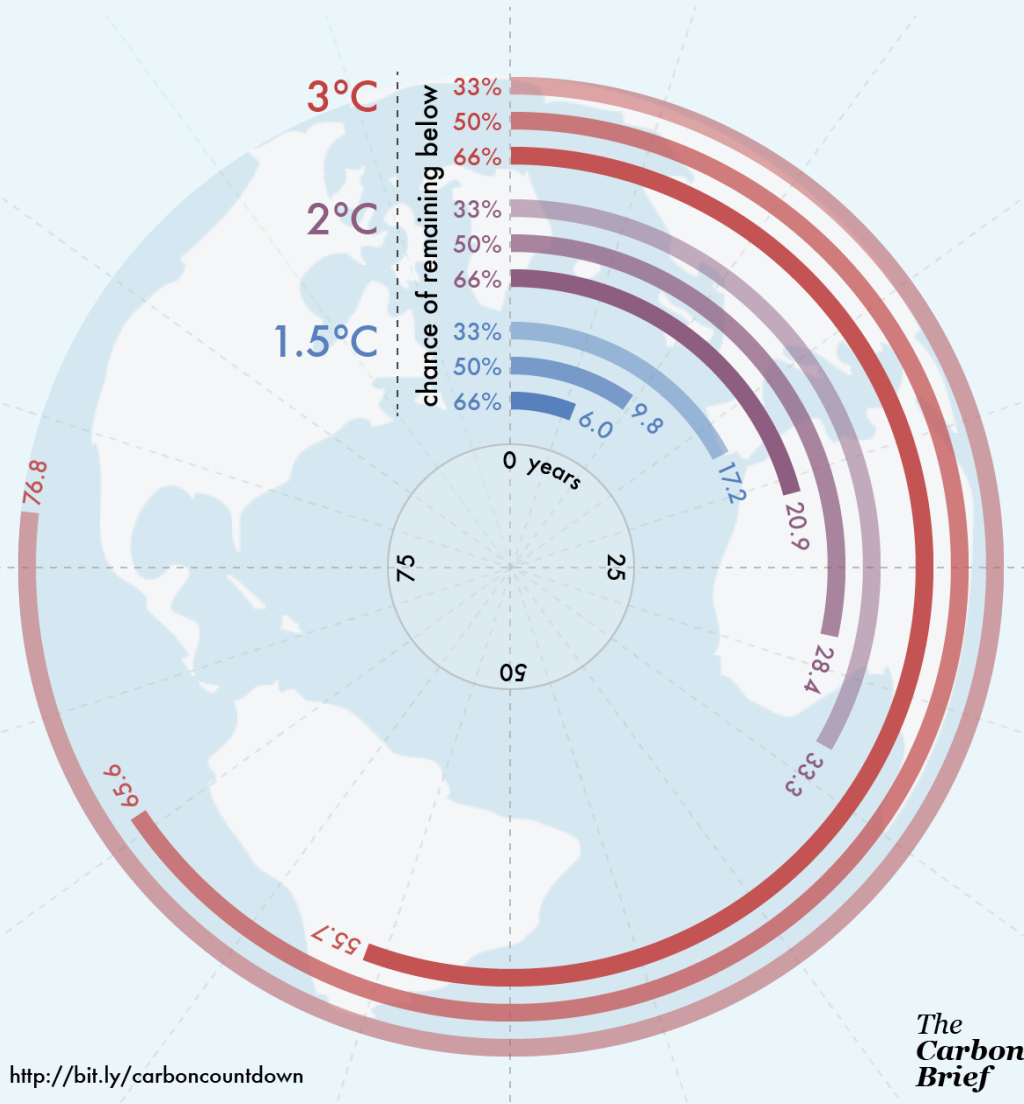


Scenario's die voldoen aan het *tweegraden doel* in vergelijking met:

- 1) Scenario's zonder klimaatbeleid ('*baseline*').
- 2) Scenario's gebaseerd op de nationale beloften voor 2020-emissies in het kader van het zgn. Kopenhagen-akkoord ('*referentie*').

Carbon Countdown

How many years of current emissions would use up the IPCC's carbon budgets for different levels of warming?



Maximaal 1,5 tot 2 graad:

*Hoeveel jaar
kunnen we de huidige
mondiale uitstoot van
CO₂ nog handhaven
voordat deze nul
moet zijn ?*

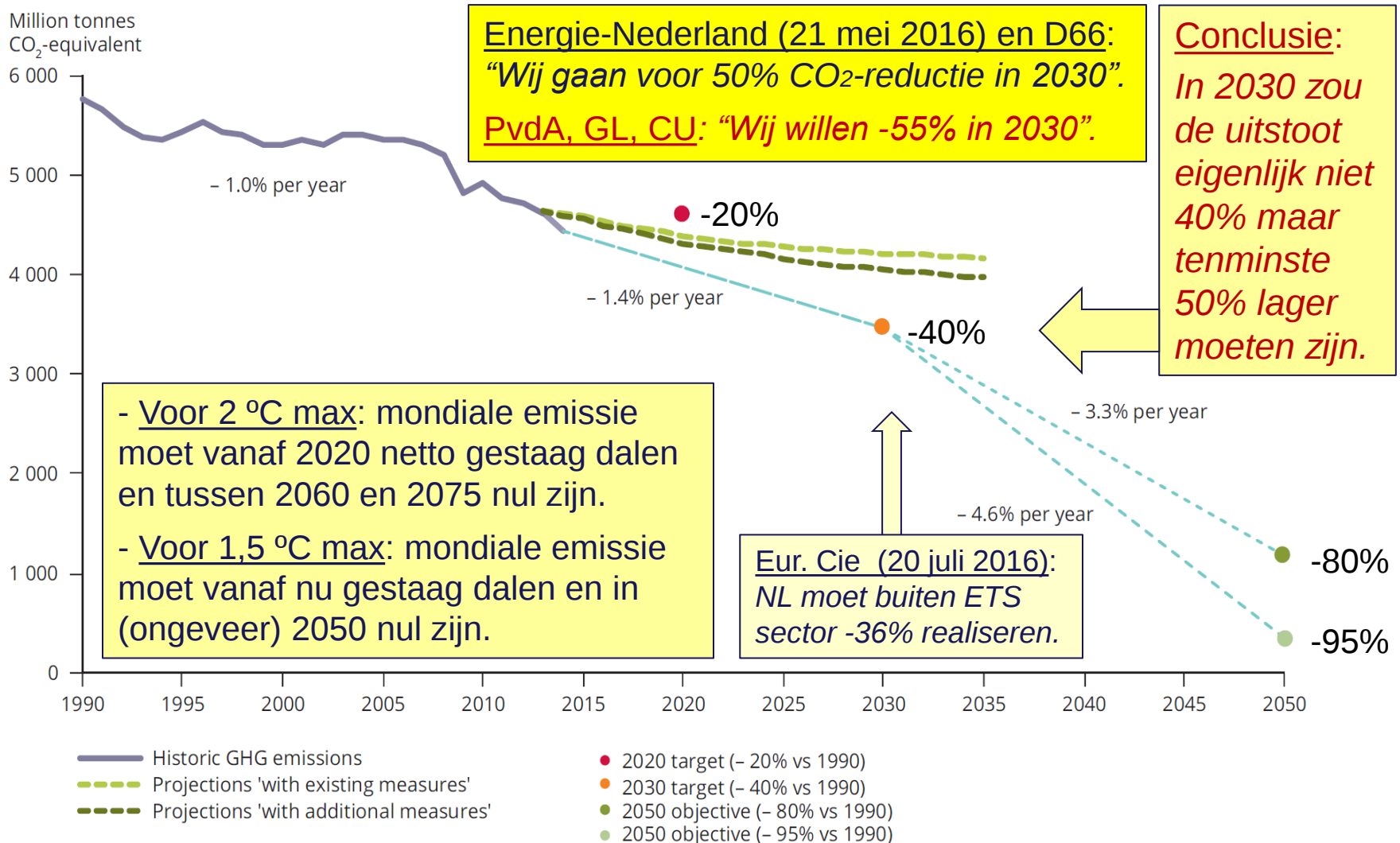
CB: 'Genoemde aantal jaren kan zowel een onderschatting als een overschatting zijn.'

Source: Carbon Brief, 10 Dec. 2015

Opm.: In september 2017 is er discussie ontstaan over de getallen van Carbon Brief; die zouden volgens sommigen te pessimistisch zijn.

Zie voor uitleg en reactie CB:
<https://www.carbonbrief.org>

EU greenhouse gas emission: trends, projections and reduction targets



3.

Potentie en tempo van
- energiebesparing
- benutting wind energie
- benutting zon-PV

Energie in Nederland in 2050 uit alleen zon en wind?

(Bruto) finale energievraag NL in 2015: ~2100 PJ. Bij groei BNP met 2% per jaar en vermindering energie-intensiteit economie met 2,5% per jaar daalt dit naar 1760 PJ in 2050. *Vraag: Is dekking uit alleen zon en wind mogelijk?*

Merk op: grote energieverliezen in zo'n energiesysteem – o.m. vanwege noodzaak energieopslag (met grote conversieverliezen). Ter compensatie meer opwekking (~30%) door zon en wind nodig – totaal **~2300 PJ/jaar** ($\approx 73.000 \text{ MWj/j} = 73 \text{ GW}$).

- Stel: In het jaar 2050 dragen wind en zon ieder voor ca. 50% bij.
Dan nodig: **~400.000 MW zon-PV en ~100.000 MW wind** (vrijwel geheel op Noordzee).
- Windvermogen in NL: we streven thans naar ~10.000 MW in 2023.
Zon-PV in NL: eind 2014 hadden we 1000 MW; in 2023 wellicht 10.000 MW.
- Potentie Zon-PV in NL: PBL en DNV-GL zeggen, op onze daken in 2050 misschien 66.000 MW te plaatsen. Daarmee is 180 PJ (50 TWh) per jaar op te wekken.
Een overgroot deel moet dus komen van PV op land (2 x opp. Prov. Utrecht) dan wel op zee en/of via import; dit lijkt in die omvang binnen 35 jaar niet haalbaar.
- Ook nodig: ~500.000 MW conversievermogen (Accu's; Power to H₂; Power to Heat);
infrastructuur voor transport en opslag energiedragers; ~ 50-100 GW back-up vermogen.

=> 100% uit alleen zon en wind in 2050 niet reëel; meer opties nodig!

Wetenschap over noodzaak inzet diverse opties

IPCC (2014) vond 10 mondiale scenario's met een emissiepiek die na 2020 optreedt en die leiden tot een kans van 66% op temp. stijging van **maximaal 2°C**

• **In al deze scenario's: (1) verbetering energie-efficiency, (2) hernieuwbare energiebronnen (incl. biomassa), (3) CCS, (4) 'negatieve emissies' (NET's).**

• **Bijdrage CCS in periode 2010-2100: 600 – 3000 Gt CO₂**

Soortgelijke scenario's voor **maximaal 1,5°C** zijn nog maar heel beperkt ontwikkeld. Voorlopige conclusies (J. Rogelj et al., 2015):

- *Er zijn nog maar heel weinig vrijheidsgraden in het te voeren energiebeleid.*
- ***Nog harder inzetten op energiebesparing en het toepassen van 'low carbon technologies', met name ook op CCS (CO₂ afvang en opslag).***
- ***Zonder negatieve emissies lukt het niet. Tussen 2010 en 2100 kan het gaan om in totaal 450 tot 1000 Gt CO₂.***
- *Na 2050 zal de netto uitstoot van CO₂ mondiaal negatief moeten zijn.*
- *Totale mitigatiekosten waarschijnlijk tenminste twee keer zo hoog als in een 2 °C scenario. Hier staan baten van minder klimaatverandering tegenover.*

Conclusie EZ in 2010 over CCS

- Als we blijven vasthouden aan de doelstelling *'maximaal 2 graden erbij'* als gevolg van uitstoot broeikasgassen door menselijk handelen
- Als we daarnaast de *betrouwbaarheid* van onze energievoorziening en de *zekerheid* van energielevering willen garanderen

Dan zullen we het gebruik van fossiele brandstof moeten combineren met CCS.

Minister Maria van der Hoeven (NL, 2010): “Without CCS no fossil fuels; without fossil fuels no energy security”.

Daarbij alvast drie opmerkingen:

1. CCS kost energie, maar maakt langer gebruik fossiele brandstof mogelijk.
2. Marktconforme toepassing van CCS vergt een CO₂-prijs van tenminste 50 Euro per ton CO₂ (is nu ca. 4 Euro/ton).
3. Speciale aandacht nodig voor *Aardgas & CCS, Biomassa & CCS, en CO₂ emissies in industriële processen & CCS.*

Statement Environmental NGO Network on CCS

'Closing the Gap on Climate – Why CCS is a vital part of the solution'

The ENGO Network on CCS comprises organizations coming together around the safe and effective deployment of CCS as a timely mitigation tool for combating climate change. Their view:

- Because urgent reductions in GHG emissions are needed to prevent dangerous climate change, a variety of innovative solutions is necessary.
- **Given the world's current and projected reliance on fossil fuels, CCS should be considered a critical mitigation technology that will provide faster and deeper emission reductions.**

The mission of the International ENGO Network on CCS is to pursue domestic and international policies, regulations and initiatives that enable CCS to deliver on its emissions reduction potential safely and effectively.

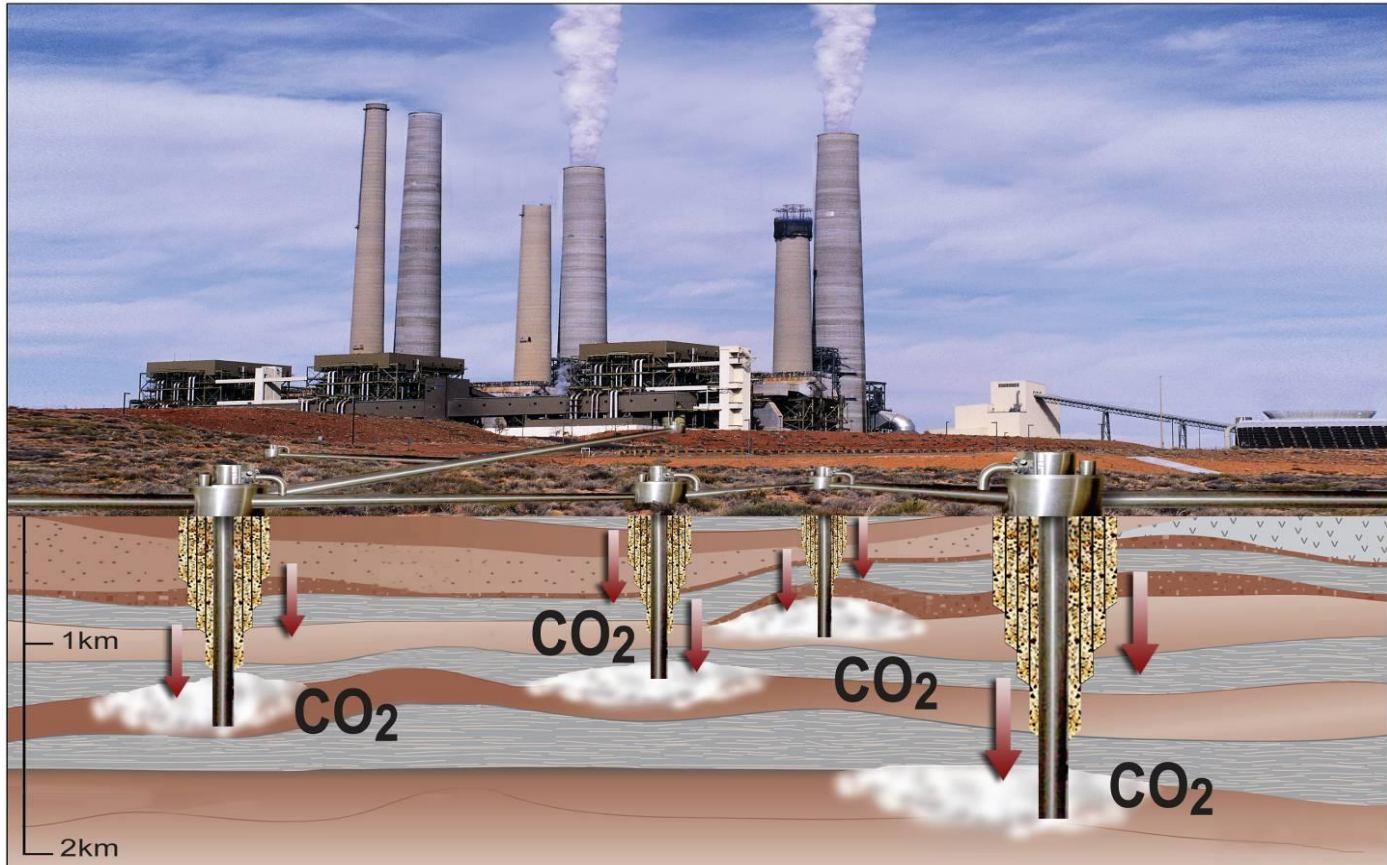
- ***The Bellona Foundation***
- ***Clean Air Task Force***
- ***The Climate Institute***
- ***E3G***
- ***Environmental Defense Fund***
- ***Green Alliance***

- ***Natural Resources Defense Council***
- ***The Pembina Institute***
- ***Sandbag***
- ***World Resources Institute***
- ***Zero Emission Resource Organisation***

4.

Afvang en Opslag van CO₂
(CCS: CO₂ Capture and Storage)

Emissions of CO₂, the most important long-lived anthropogenic greenhouse gas, can be reduced by CCS



Capture



Compression



Pipeline
Transport



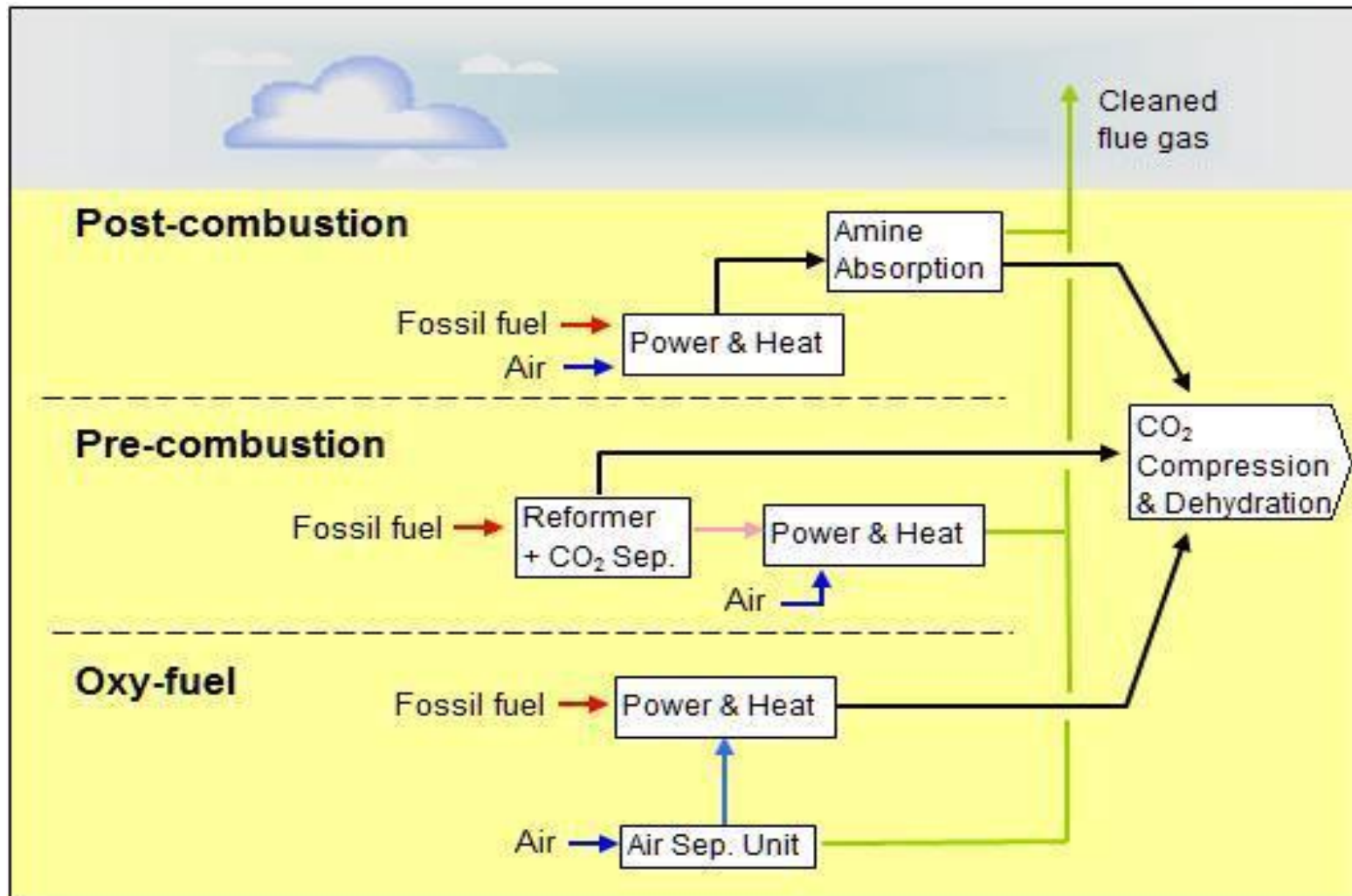
Geological
Sequestration

CO₂ Capture and Storage (CCS)

- **CO₂ capture (from static sources):**
 - Industry: *natural gas sweetening (> 50 Mt CO₂/year)*
 - Industry: *refineries, ammonia, steel, ...*
 - Power plants: *coal, oil, gas, biomass*
 - Others: *hydrogen plants, ...*
- **Transport of CO₂:** by pipeline or tanker.
- **Storage/disposal of CO₂:**
 - (Depleted) oil or gas fields (*with EOR / EGR*)
 - Deep saline aquifers
 - Deep unminable coal beds (*with ECBM*)
 - Mineral carbonation (*probably costly*)

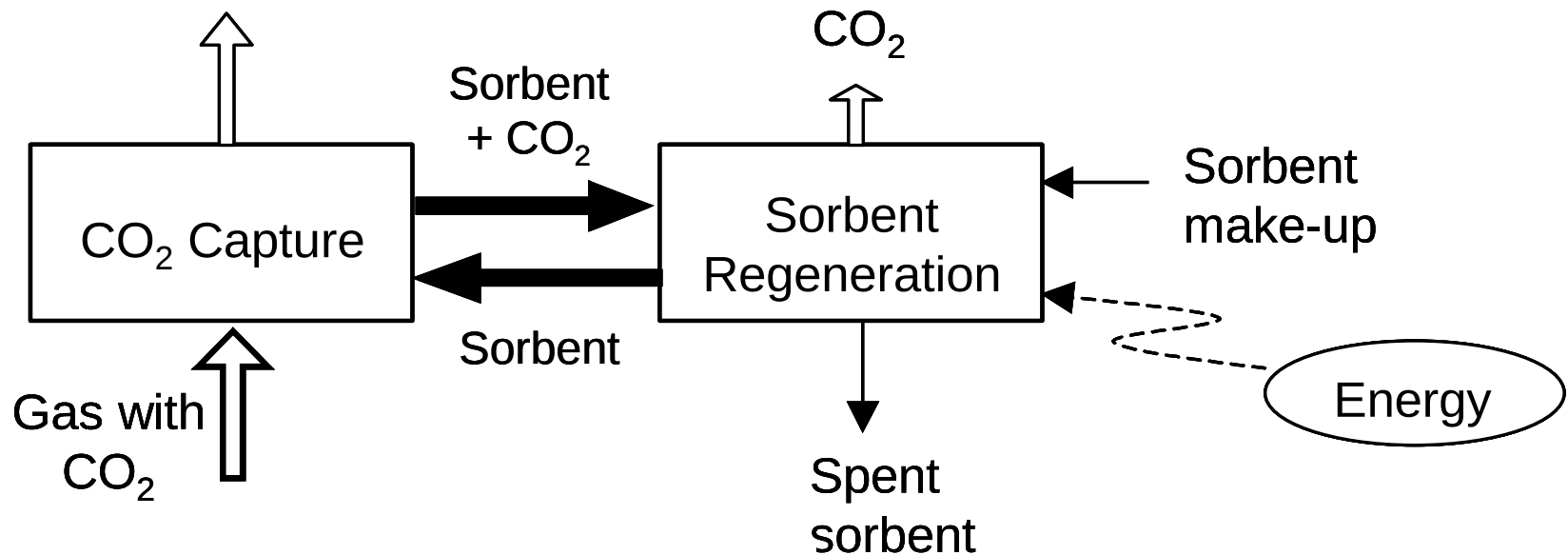
'Sweetening' = removing CO₂ from natural gas exploited from resources; EOR = Enhanced Oil Recovery; EGR = Enhanced Gas Recovery; ECBM = Enhanced Coal Bed Methane production

Carbon capture technologies



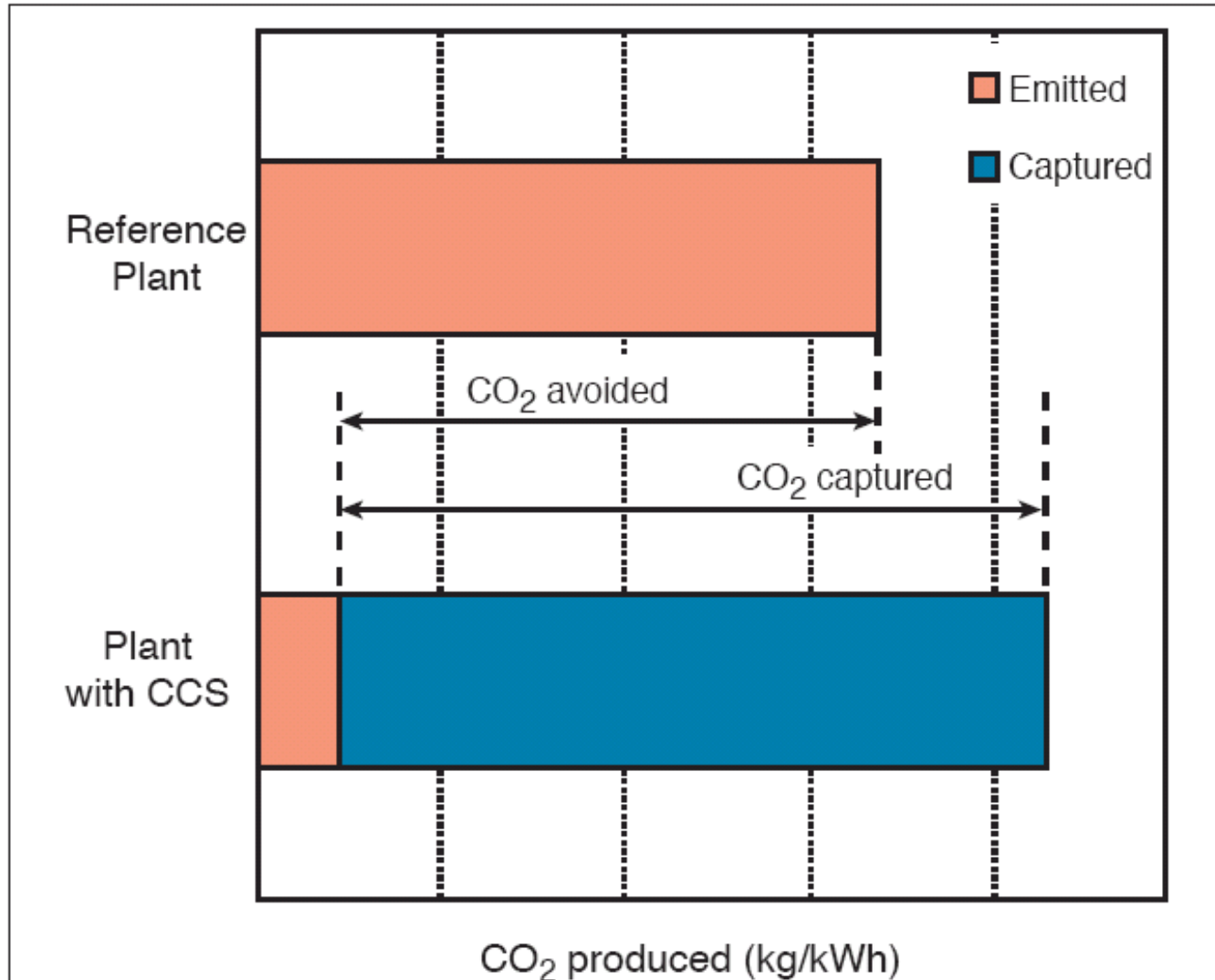
ZEP Platform Europe: “All technologies need to be addressed”

Separation with sorbents / solvents



CO₂ has been captured from industrial process streams since 80 years.
It is a proven technology.

Energy penalty & CO₂ captured – CO₂ avoided



Performance new power plants *)

	New NGCC		New PC		New IGCC	
	Without capture	With capture	Without capture	With capture	Without capture	With capture
Capital Costs (US\$/kW)	570 (961)	1000 (1715)	1290 (2161)	2100 (3808)	1330 (2586)	1830 (3714)
Plant efficiency	 (48.4%)	45-50 % (40.1%)	 (41.4%)	30-35 % (30.9%)	 (40.6%)	31-40 % (33.1%)
COE (US\$/MWh)	31-50 (77)	43-72 (102)	43-52 (66)	62-86 (107)	41-61 (75)	54-79 (104)
Cost per ton CO ₂ avoided (US\$) **)		37-74 (80)		29-51 (58)		13-37 (43)

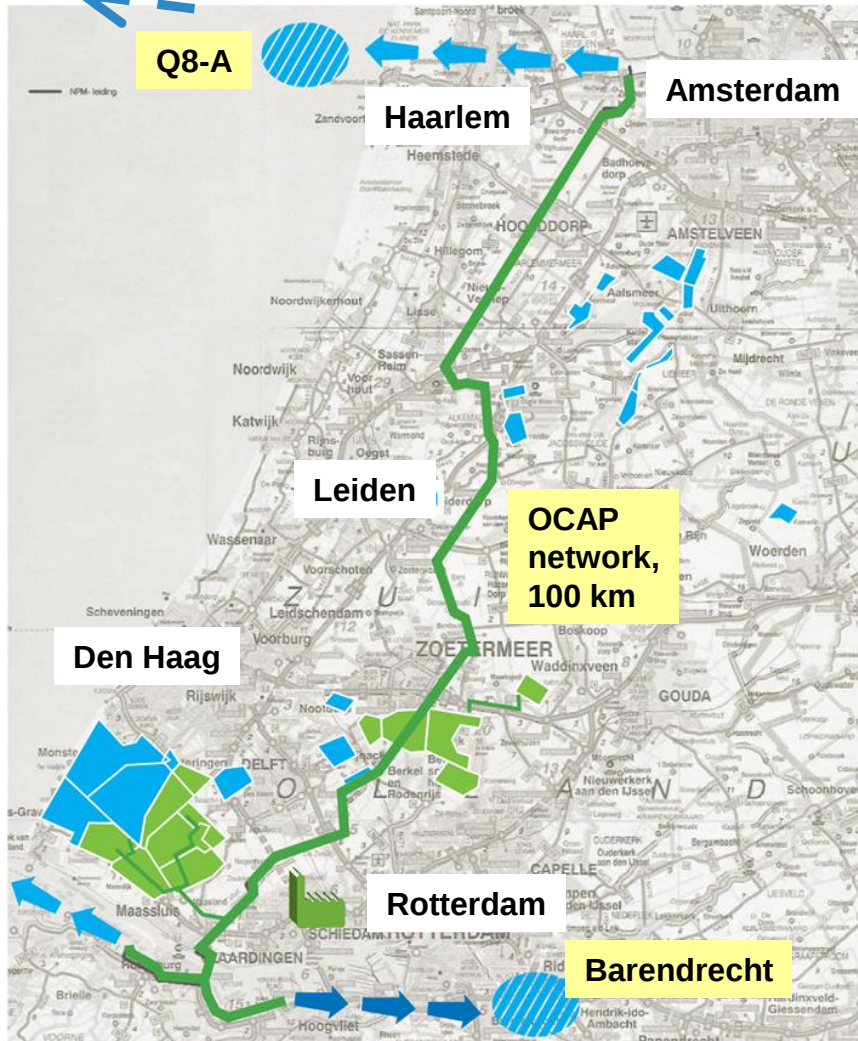
*) Black figures from *IPCC report* (2005); Red figures from *IEA report* (2011).

**) Excl. transport & storage.

First steps for a CO₂ infrastructure in NL

(as foreseen in 2008; 1-5 Mton/yr)

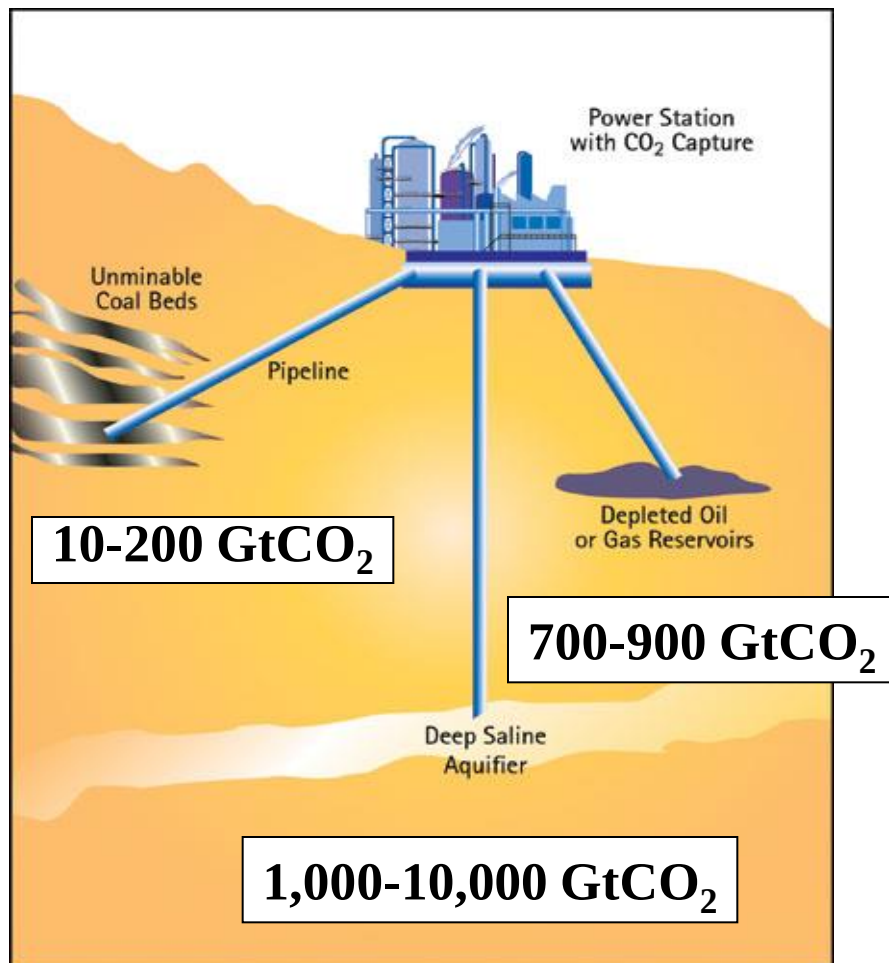
Other gas fields ←



CO₂ Infrastructure

-  Existing CO₂ network OCAP
-  New network to offshore gas fields (2008-2010-2015)
-  New network to onshore gas field (2008-2012))
-  Connected greenhouses
-  Potential connection greenhouses
-  CO₂ emitters
-  Storage in gas fields (10.000 ha)

CO₂ geological storage capacity



Source: IPCC, SR-CCS, 2005

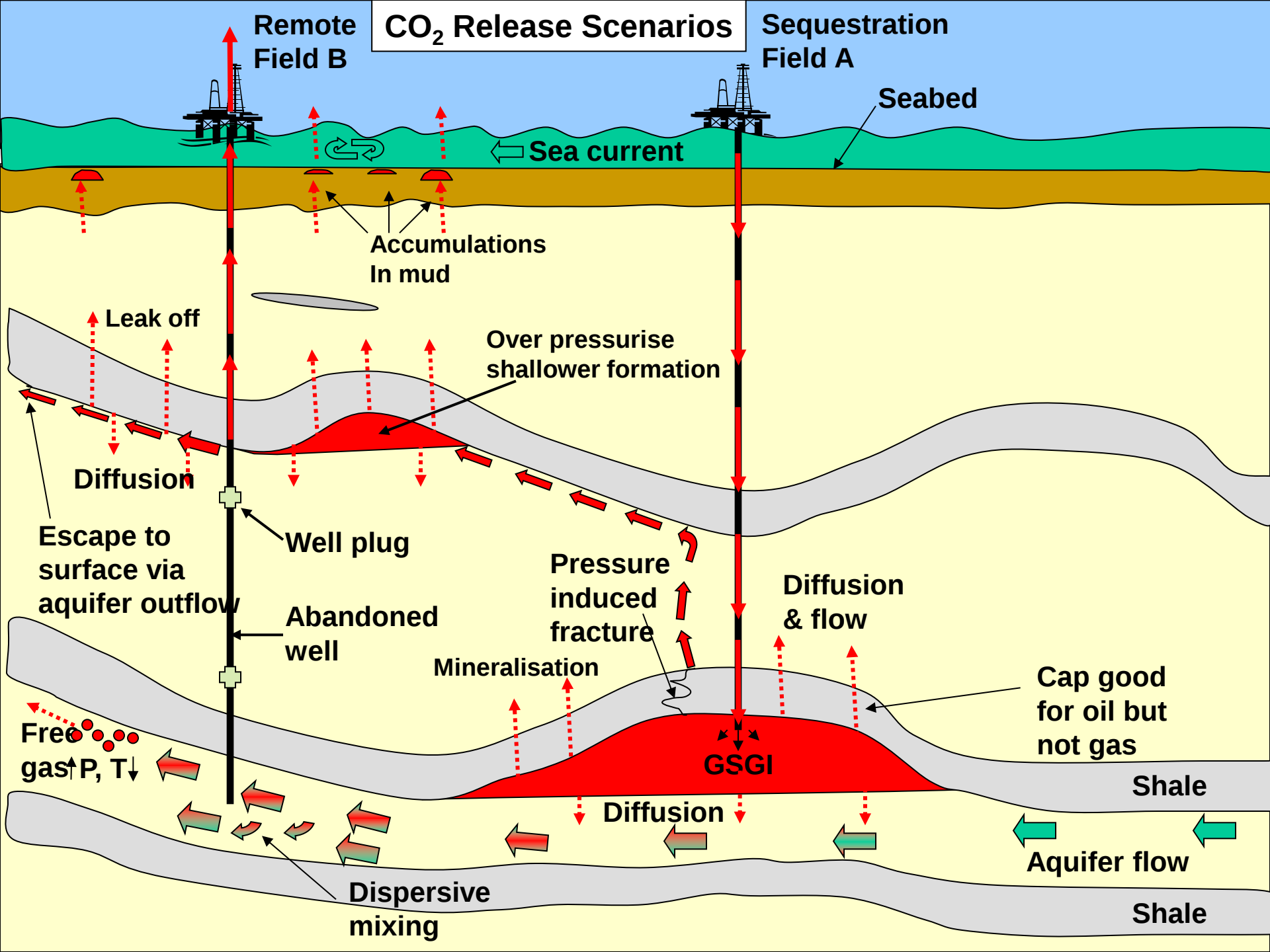
IPCC, SR-CCS, 2005:

Global capacity is estimated at least at 2,000 GtCO₂ (80 x CO₂ emissions in 2005 from fossil fuel use).

Country studies, 2010:

- oil and gas formations:
1,000 - 1,150 GtCO₂
- saline aquifers:
5,900 – 16,000 GtCO₂
- coal beds:
210 – 240 GtCO₂

Source: Sally Benson et al., GEA-2012, chapter 13



Risk and uncertainty geological storage CO₂

“Observations from **commercial storage projects**, engineered and natural **analogues** as well as **theoretical considerations**, models and **laboratory experiments** suggest that:

*Appropriately selected and managed geological storage reservoirs are **very likely to retain nearly all the injected CO₂ for very long times, more than long enough to provide benefits for the intended purpose of CCS**”*

*Sally Benson et al.,
‘CO₂ Capture and Storage’,
GEA-2012, chapter 13.*

- **CCS: a proven technology that today securely stores ~30 Mt CO₂ per year.**
- ***At present there are 17 large-scale projects in operation and 5 under construction. Together, these projects will have the capacity to capture up to ~40 Mt CO₂ per year.***
- ***A further 17 are in earlier stages of development globally, with around half of those projects located in China.***
- **Global potential for safe storage: 2.000 - 10.000 GtCO₂.**



Industry CCS

CCS now deployed in:

1. Natural gas upgrading

- *Sleipner and Snøhvit project (Norway), Gorgon project (Australia) , ... mostly amine based capture technology.*
- *Game changer: membrane technology for Lula offshore natural gas separation project of Petrobras (Brazil).*

2. Hydrogen refining/upgrading

- *Quest project Shell (Canada): solvent based capture technology.*
- *Air Products project (Texas): PSA to separate CO₂ and H₂ from SMR*
- *(Steam Methane Reformer).*

3. Steel sector

- *Emirates Steel project (Abu Dhabi): amine based capture technology.*

Removal of CO₂ from power plants

Boundary Dam CCS project (Canada)

- Retrofit of existing coal fired unit.
- Operational for more than 1,5 year.
- CanSolv amine based PCC technology.
- 110 MWe.
- 95% capture.
- More than 1 Mt per year.
- CO₂ sold for EOR.



Aerial Photo of SaskPower's Boundary Dam Project near Estevan, Saskatchewan

Parish CCS project (Texas, USA)

- Retrofit of existing coal fired unit.
- Operational in late 2016.
- MHI amine based PCC technology.
- 250 MW slip stream.
- 90% capture.
- About 1 Mt per year.
- CO₂ sold for EOR.



NRG Parish project, USA

Some recent developments

China, March 2017:

Yanchang Integrated CCS project was launched into construction. This is the first large-scale CCS project in construction in Asia. CO₂ capture will take place at two separate *coal gasification facilities* in central China (0.41 Mton per year in total) before transport to CO₂-EOR systems.

Japan, March 2017:

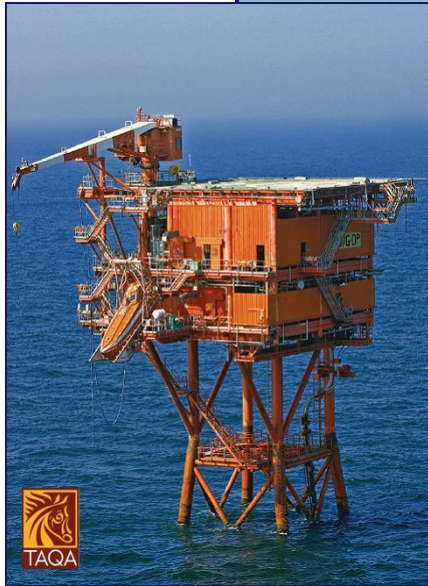
Osaki CoolGen Corporation, announced the beginning of demonstration testing on the *166 Megawatt (MW) oxygen-blown Integrated Gasification Combined Cycle (IGCC) system* built at the Osaki power plant, Hiroshima Prefecture, Japan. This is the first stage of the project. The second stage, planned for later in the decade, involves the addition of CO₂ separation and capture technology to the IGCC plant.

USA, April 2017:

The world's first *large-scale bio-energy-with-CCS project* was launched into operation in Illinois. This facility can capture and store approximately 1 Mton of CO₂ per year. It is operated by Archer Daniels Midland (ADM). This is the first CCS facility in the US storing CO₂ in a dedicated geological formation at large-scale.

ROAD: EERP Demo project MPP3 - Rotterdam (NL)

CCS: 1.1 Mt/yr



P18-A
TAQA

STORAGE SITE CO₂

25 KM, 16"

e-on

Electrabel
GDF SUEZ

TAQA

Note WCT (March 2017):

- Adaptations in set-up seem to have solved the financial problems.
- Realization of the project depends a.o. on political decisionmaking NL.

Latest news (June 27, 2017)

- Uniper and Engie have decided to withdraw from the ROAD project.
- Rotterdam harbour will look for another CCS project.
- Nuon is developing a plan for CCS at their NGCC plant in Eemshaven.

ROAD = Rotterdam Opslag and Afvang
Demonstratieproject

EERP = European Economic Recovery Plan

MPP3 = Maasvlakte Power Plant 3

POWER PLANT MPP3

EON

EBL



MPP3 + CCS

Indicatieve kosten van vermeden CO₂ emissies voor typische industriële installaties en energiecentrales

Sector	Proces	Kosten per vermeden ton CO ₂ (EUR 2015)*
Raffinage	Waterstofproductie	33 (23 - 42)
	Process heaters	79 (42 - 126)
	Kraker (Fluid catalytic cracking)	99 (79 - 126)
	Warmte-krachtproductie	104 (42 - 126)
IJzer en staal	Hoogoven	53 (30 - 79)
	Hot stoves, power/steam plant	71 (71 - 85)
	Cokes oven	83 (83 - 92)
Chemie	Ethyleenoxide	15
	Waterstof (ammoniak/methanol)	34 (18 - 43)
	Ethyleen/propyleen	71
	Process heaters / Warmte-krachtproductie	101 (41 - 126)
Gasbehandeling	Gasbehandeling	12
Pulp en papier	Kraft-proces	67 (34 - 69)
Cement	Precalculator	37 (21 - 50)
	Volledige installatie	61 (35 - 111)
Biobrandstoffen	Ethanol	15
Aluminium	Aluminium smelter	15
Elektriciteit	Kolen (post-combustion)	57
	Kolen (pre-combustion)	43
	Kolen (oxyfuel-combustion)	51
	Gas (post-combustion)	79

Exclusief kosten voor transport en opslag CO₂

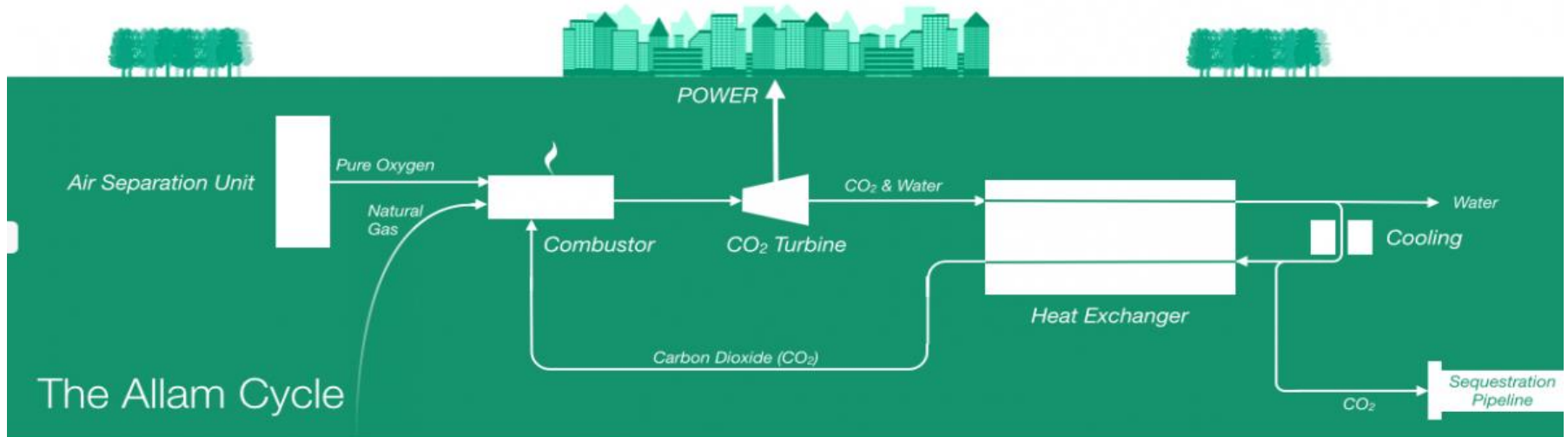
Bronnen:
- IEA, 'Technology Roadmap CCS', 2013;
- Hendriks et al., 'CCS position paper', Ecofys, 2015 (i.o.v. CATO)

* Kosten zijn gecorrigeerd voor inflatie en wisselkoers (dollar/euro) per 1 juli 2015

PBL & ECN (2017): Overzicht van enkele maatregelen met groot emissiereductiepotentieel in 2030

	Emissiereductie [Mton CO ₂]	Nationale kosten [mld € per jaar]	Kosteneffectiviteit [€/ton CO ₂]
Electriciteit en gas			
- <i>Wind op zee</i>	4 – 20,3	0,4 – 3,6	100 – 180
- <i>Zon-PV</i>	3,2	0,4	130
- <i>CCS kolen</i>	16 – 22	0,4 – 0,6	25
- <i>CCS gas</i>	6 – 8	0,5 – 0,6	75
- <i>Europese vervanging kolen door gas</i>	12,7 (6)	0,8 (0,6)	65 (100)
- <i>Kernenergie</i>	4,9	0,5	95
- <i>Groen gas</i>	1,8	0,6	330
Industrie			
- <i>Biomassa</i>	7,4	1,0	140
- <i>CCS procesemissies en staalproductie</i>	5 – 9	0 – 0,4	0 – 50
- <i>CCS raffinaderijen</i>	4 – 8	0,2 – 0,7	50 – 90
- <i>Recycling</i>	2,2	-0,3	-130
- <i>Procesefficiency</i>	5 – 9	-0,5 – +0.2	-110 – +50

Onderzoek naar nieuwe CCS techniek



Futurism – 25 May 2017 (based on: Science – 24 May 2017):

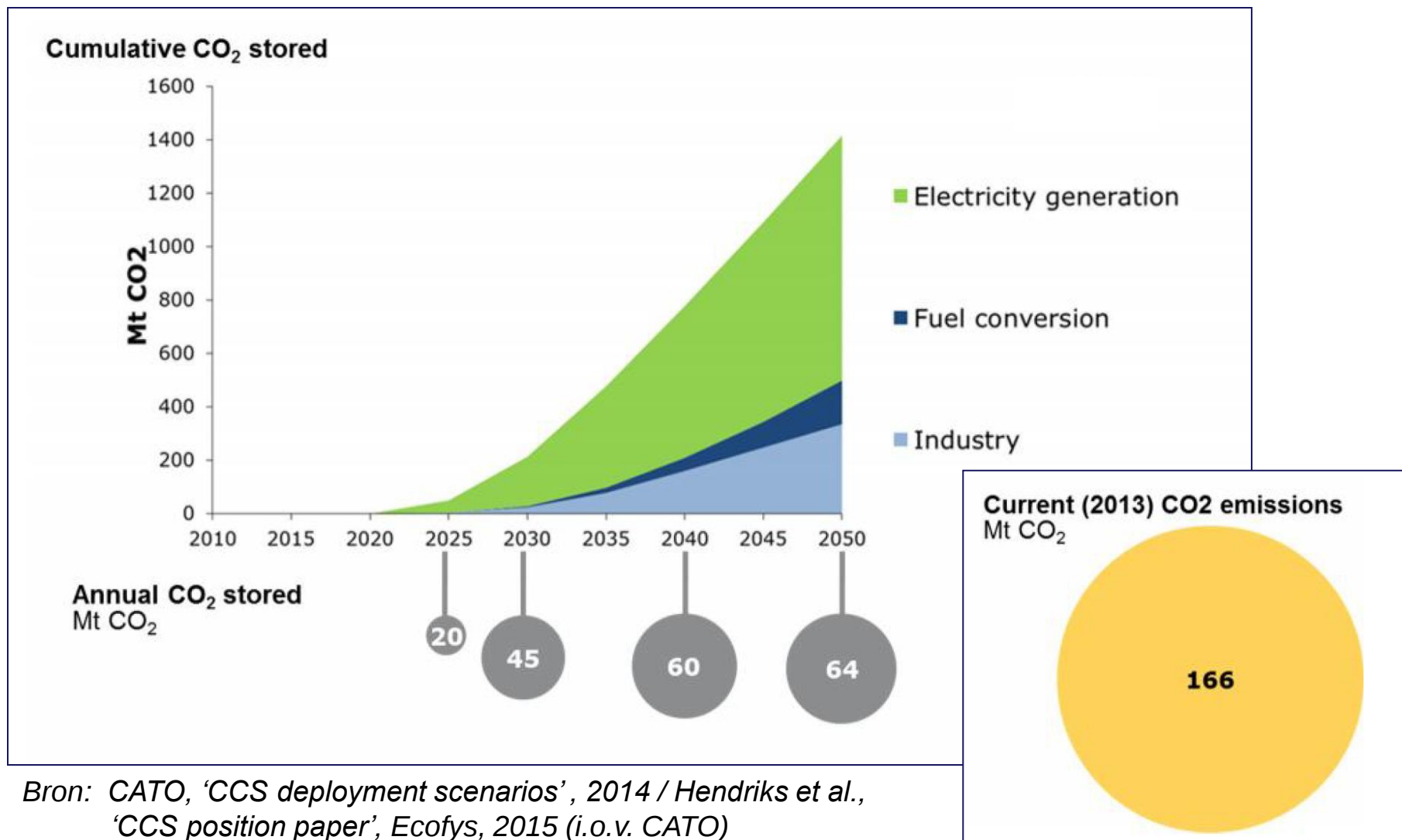
New Design Power Plant to Burn Fossil Fuels Without Carbon Emissions

- The prototype plant utilizes a new thermodynamic cycle — dubbed the **Allam cycle** — that eliminates the need for smokestacks altogether. **The Allam Cycle uses a high-pressure, highly recuperative, oxyfuel, supercritical CO₂ cycle** that makes carbon capture part of the core power generation process, rather than an afterthought.
- We should know soon if the system lives up to its promise as NET Power's 25-megawatt demonstration plant in Houston will become operational later this year. If the prototype power plant works as hoped, **the next step would be to open a \$300 million full-scale 300 MW plant by 2021 .**

Futurism: ***"This is a game-changer if they achieve 100 percent of their goals."***

Cumulatief en jaarlijks (zie bollen) opgeslagen CO₂ in Nederland volgens basisscenario CCS Roadmap (CATO, 2014)

(voor drie sectoren: elektriciteitsopwekking, industrie en transportbrandstoffen)



Bron: CATO, 'CCS deployment scenarios', 2014 / Hendriks et al., 'CCS position paper', Ecofys, 2015 (i.o.v. CATO)

Misunderstandings about re-utilization of CO₂

- Re-utilization of captured CO₂ from fossil fuel power plants is or has been promoted (*by e.g.: VNCI / TKI-Gas / Stedin / The CO₂ Forum*).
- **However: As a follow-up of the Paris Climate Agreement the emission of CO₂ to the air should be reduced, and about 30 years from now completely avoided. (Thereafter CO₂ emissions should become even negative!)**

Consequently:

- Re-utilization of fossil CO₂: *only when the CO₂ is captured for many hundreds or even several thousands year!*
- Re-utilization of CO₂: *no problem with CO₂ from sust. biomass, but to achieve negative emissions this CO₂ probably has to be stored!*
- Re-utilization of fossil CO₂ in horticultures: *first reduction step, but not a permanent solution when striving for zero GHG emissions.*
- Massive methanation of H₂ from solar-PV: *only with air capture of CO₂. Cost of this CO₂: \$500-600/tCO₂ (Source: Am. Phys. Soc., 2011).*

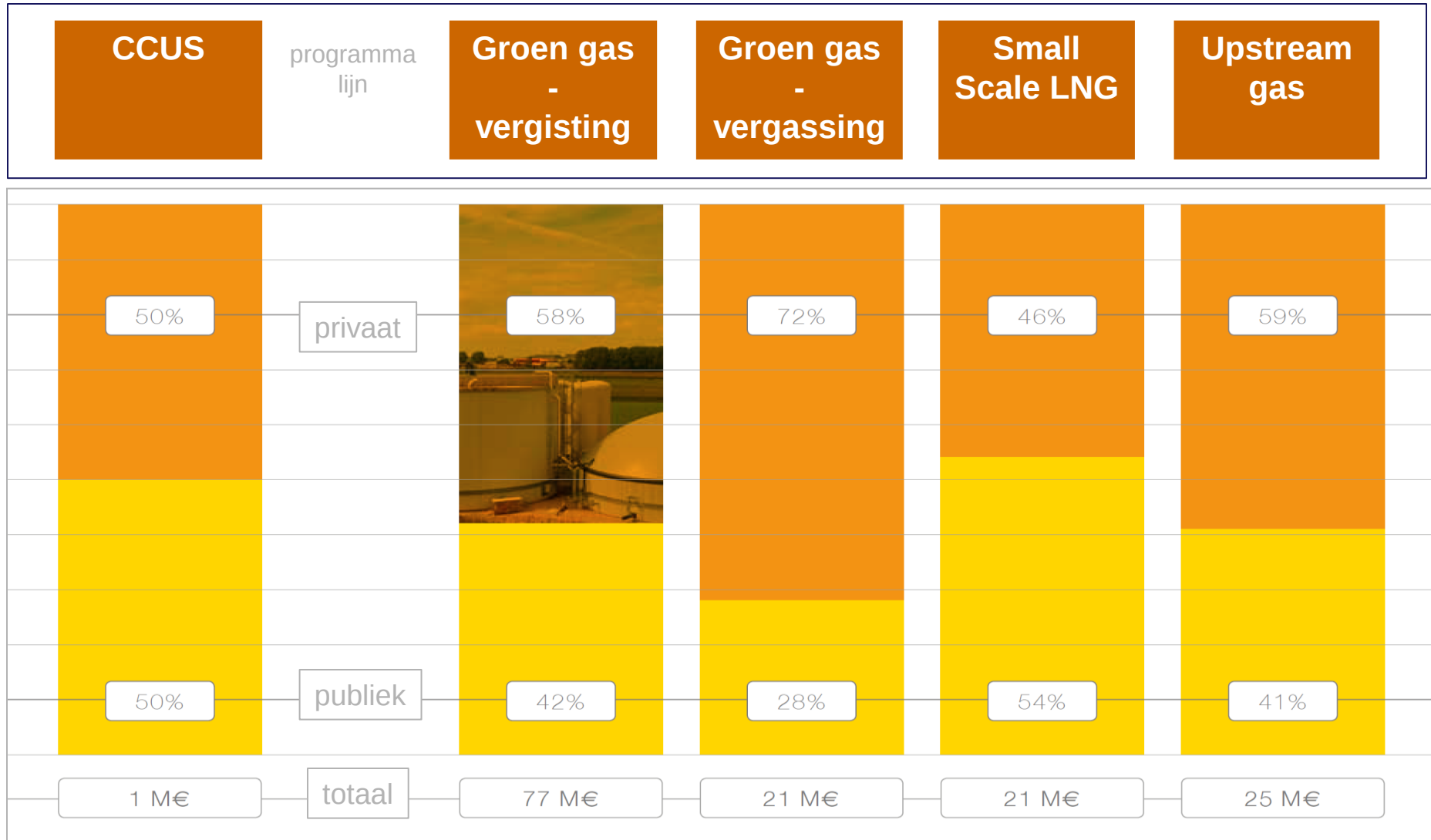
Tweede Kamer wil dat er serieus werk gemaakt wordt van CO₂-afvang en -opslag

- Op 24 mei 2016 heeft de Tweede Kamer een motie van Jan Vos (PvdA) aangenomen die de regering vraagt meer werk te maken van het *afvangen en opslaan van CO₂* én van het *actief verwijderen van CO₂ uit de lucht*.
- Vóór de motie stemden de fracties van de PvdA, D66, VVD, CDA, SGP, 50 PLUS, Houwers, de Groep Kuzu/Öztürk, Klein en Van Vliet.

Reactie (Wim Turkenburg):

- Voor aanpak klimaatvraagstuk hebben we **deze opties hard nodig**.
- Deze heldere uitspraak is een **belangrijke stap voorwaarts** en moet mede richting geven aan het te voeren beleid.
- **Topsector Energie** moet serieuze aandacht aan deze opties geven.
- Met alle betrokkenen nu werken aan een **Road Map CCS voor Nederland**.
- Ook een ambitieus **RD&D programma nodig voor realisatie CCS bij de industrie**, waaronder energiecentrales, vooral ook bij inzet van aardgas en bioenergie.
- NWO én de Topsector Energie moeten ook werken aan een **nieuw nationaal RD&D programma 'negatieve emissie van CO₂'** (bijv.: 5 jaar; 3 miljoen per jaar).

TKI Gas (2012-2016): Verhoudingen investering per programmaliijn



Bron: TKI Gas, 'Terugblik op 4 jaar TKI gas, 2012-2016', 20 sept. 2016

**CC(U)S: slechts 1 miljoen
euro, voor 4 jaar!**

Pleidooi voor CCUS vanuit Nederlandse industrie

“Neem CCUS volwaardig mee in innovatie- en kennisagenda, veranker CCUS in beleidsagenda voor de komende jaren, ontwikkel een Plan van Aanpak voor de implementatie van CCUS in Nederland”

Ondertekenaars: Gasunie, Gastera, Groningen Seaport, Havenbedrijf Rotterdam, NAM, Maasvlakte CCS (ROAD), Shell, RWE, Siemens, TKI-Gas.

- CCS nodig om klimaatverandering binnen acceptabele grenzen te houden.
- Nederland is uitstekend gepositioneerd voor CCUS.
- CCS vraagt om een onmiddellijk, doelgericht, langdurig en stabiel beleid.
- Industrie en overheid moeten gezamenlijk optrekken.
- Oproep tot onmiddellijke gezamenlijk actie:
 - *Ontwikkel Roadmap voor de implementatie van CCUS in Nederland.*
 - *Creëer draagvlak in de samenleving, communiceer met alle belanghebbenden.*
 - *Neem maatregelen zodat CCUS zich tot een volwaardige techniek kan ontwikkelen.*
 - *Faciliteer nationale of regionale transport en opslagbedrijven ('Market makers').*
 - *Zorg dat binnen afzienbare tijd de eerste CCUS-proefprojecten kunnen draaien.*
 - *Maak geologische en geografische data over CO₂ opslagpotentieel openbaar.*

Bedankt!

Wim Turkenburg

*Aanvullende informatie in de discussienotitie
“De klimaatdoelstelling van Parijs” van Wim Turkenburg,
Sible Schöne, Bert Metz en Leo Meyer (15 maart 2016).*

Deze notitie is te vinden op:

<https://hier.nu/klimaatbureau/pagina/publicaties>

Appendix: kort CV Prof. Dr Wim C. Turkenburg

Enkele huidige functies en activiteiten:

- Emeritus hoogleraar 'Science, Technology & Society', Universiteit Utrecht
- Consultant op het gebied van energie- en milieuvraagstukken.
- Lid RvT van de Stichting Voorbereiding Pallasreactor.
- Lid programmaraad TKI-BBE (Biobased Economy).
- Contactpersoon NOS en BNR voor kernenergie en voor vraagstuk energie-en-klimaat.

Opleiding:

- Studeerde Experimentele Natuurkunde (Universiteit Leiden en Universiteit van A'dam).
- Deed als promovendus onderzoek bij het FOM Instituut voor Atoom- en Molecuulfysica (AMOLF) in Amsterdam.
- Promoveerde in 1976 te A'dam tot doctor in de Wiskunde en Natuurwetenschappen.

Enkele vroegere functies en activiteiten:

- Directeur van het Copernicus Instituut voor Duurzame Ontwikkeling en Innovatie (UU).
- Wetenschappelijk directeur van het Utrecht Centrum voor Energieonderzoek (UCE).
- Voorzitter van de energielcommissie van de VN (UN-CENRD).
- Lid van de Algemene Energieraad (AER) en van de VROM-raad.
- Voorzitter van de Bezinningsgroep Energie.
- Initiator en voorzitter onderzoeksprogramma CATO (CO₂ Afvang, Transport en Opslag).
- Lead Author (LA) bij het Second Assessment Report van het IPCC (SAR, 1995).
- Een van de initiatoren en bestuursleden van de World Energy Assessment (WEA, 2000) en de Global Energy Assessment (GEA, 2012).
- Hoofdauteur van het hoofdstuk over hernieuwbare energie van zowel WEA als GEA.