



Hiilidioksidin talteenotto ilmakehästä

Tero Tynjälä

apulaisprofessori, teknillinen termodynamiikka

Lappeenrannan teknillinen yliopisto

tero.tynjala@lut.fi

@TeroTynjala

Pääministerin tervehdys



Debate on the future
of Europe: answers by
Juha SIPILÄ, Finnish
Prime Minister,

31.1.2019

[2:15 – 3:15](https://bit.ly/2DSBThS)
bit.ly/2DSBThS

LAPPEENRANTA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Soletair demonstraatio



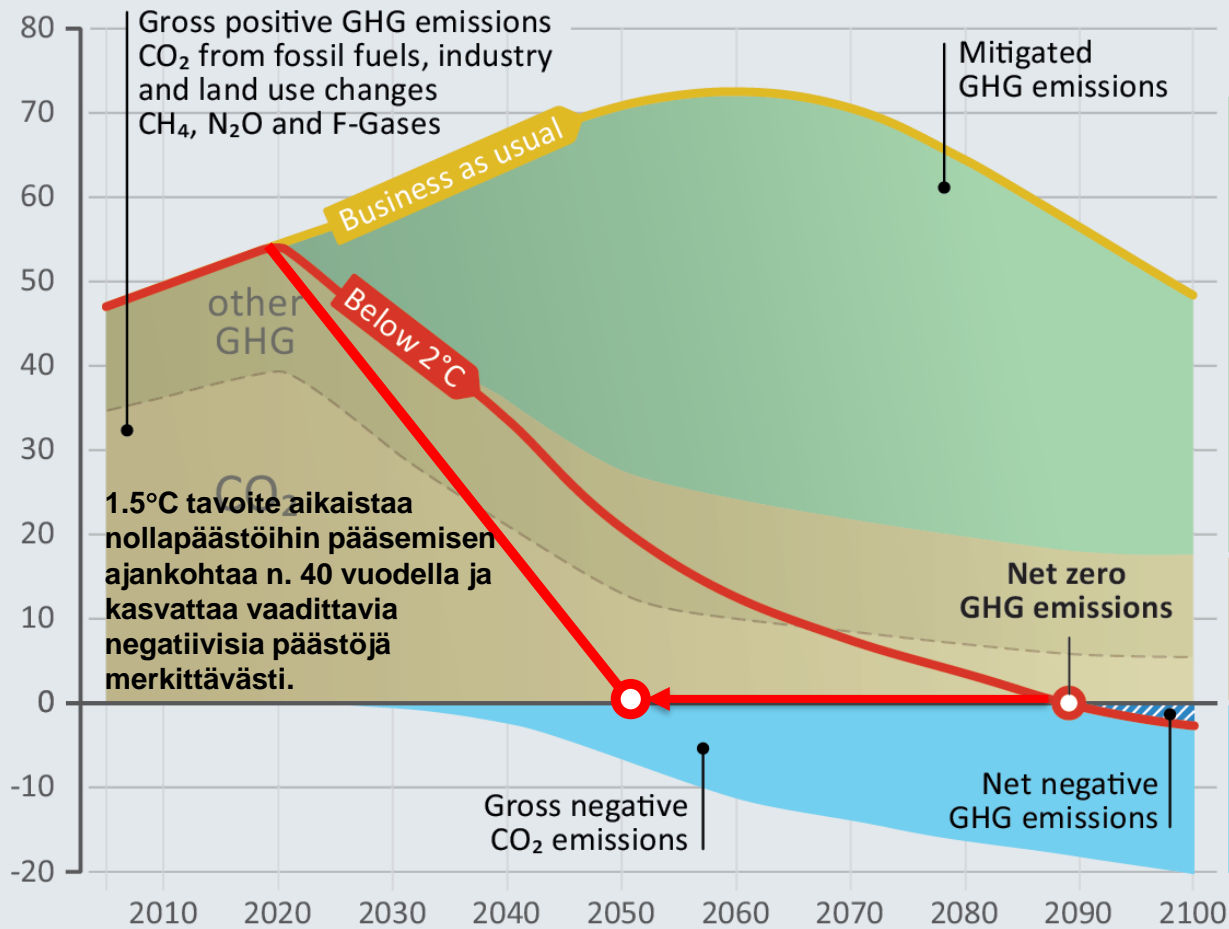
- Polttoainetta ilmasta, vedestä ja sähköstä prosessi demonstroitiin konttikoossa kesällä 2017 Lappeenrannassa osana LUT:n ja VTT:n Soletair ja NeoCarbonEnergy projekteja

- www.soletair.fi
- www.neocarbonenergy.fi

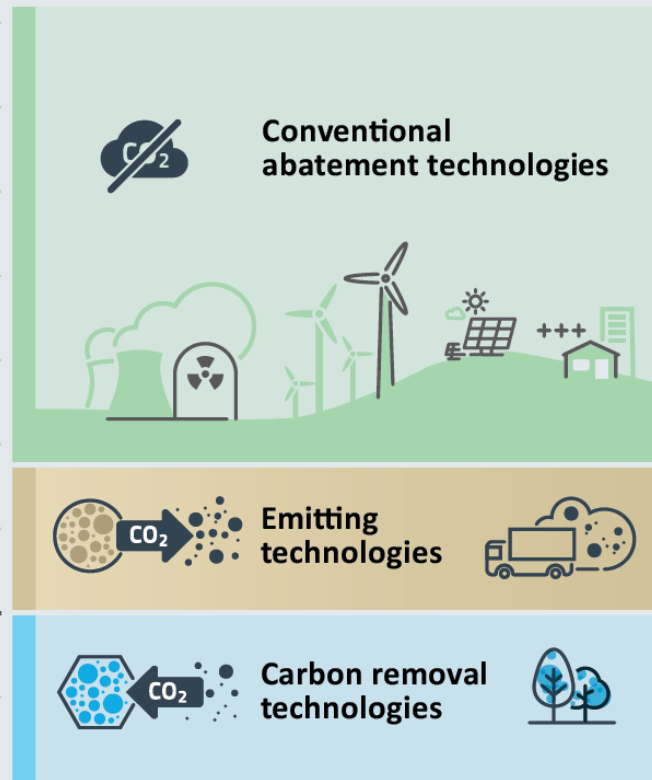


LAPPEENRANTA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

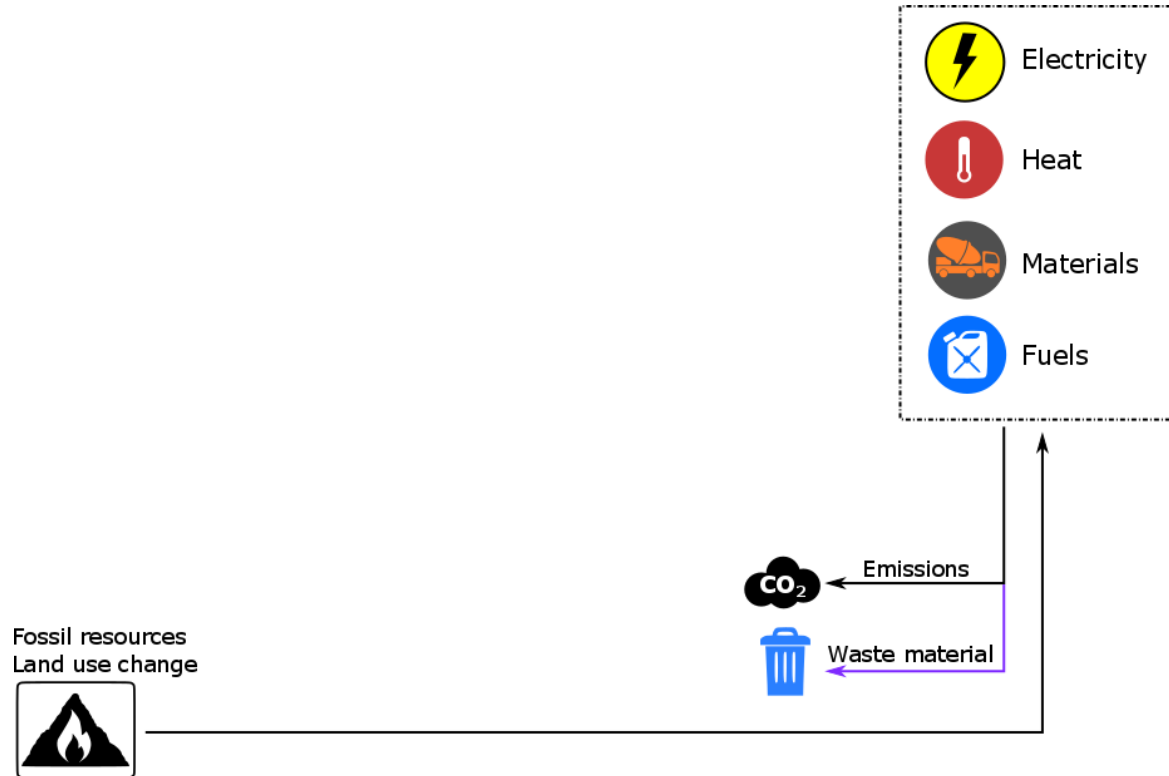
GHG emissions (GtCO₂e/year)



Examples of associated technologies



Tie negatiivisiin päästöihin

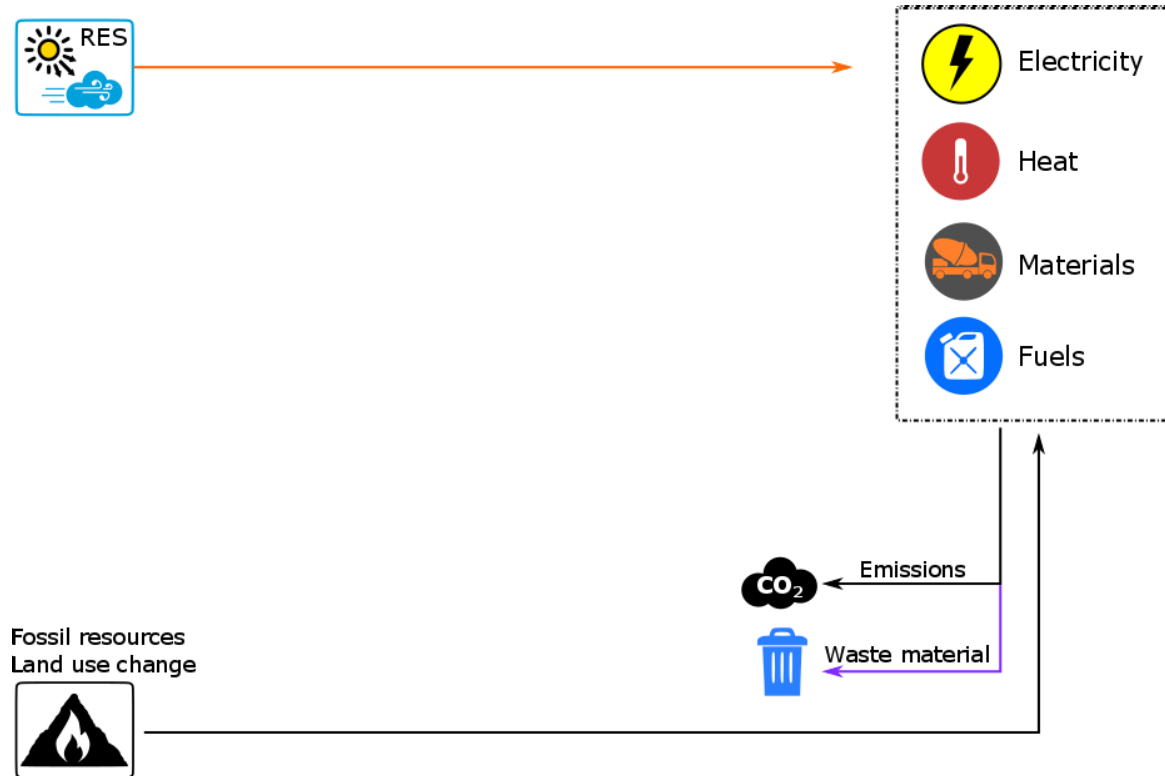


Fossiilitalous

Uusiutumattomien
luonnonvarojen käyttö
ja CO₂ päästöjen
vapauttaminen
ilmakehään.

Aikasempi ja edelleen
vallitseva reitti.

Tie negatiivisiin päästöihin



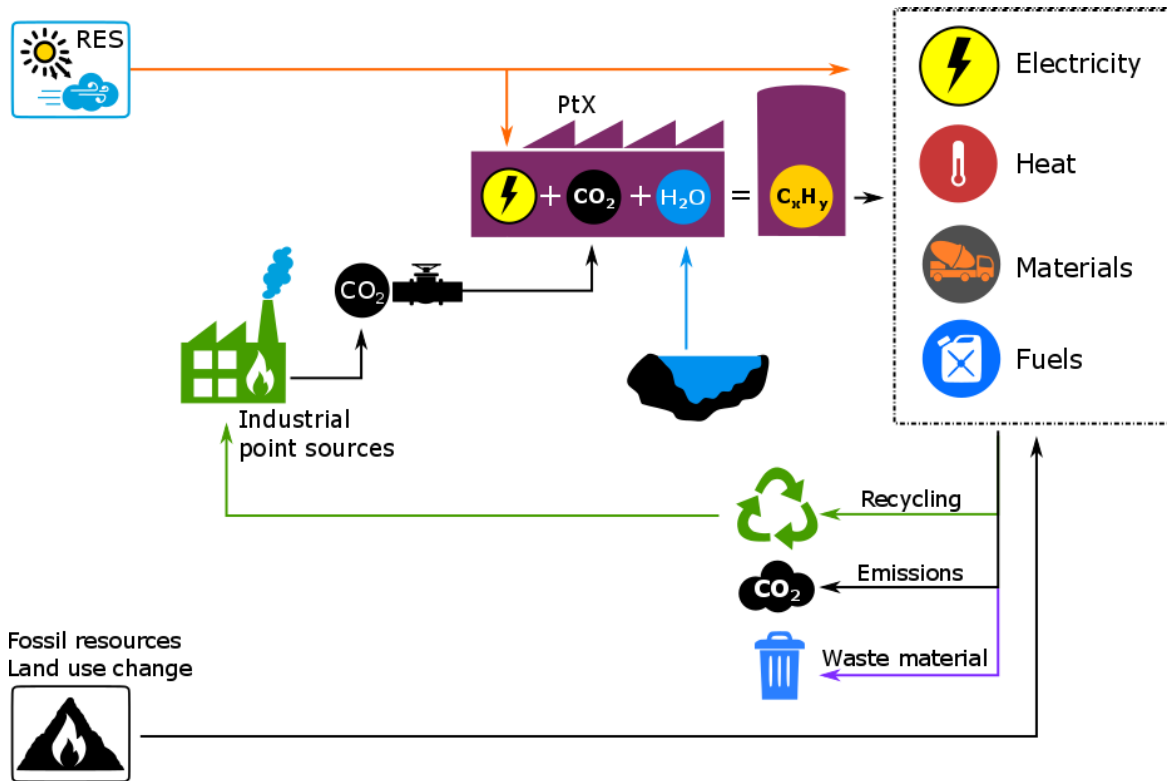
Uusiutuva sähkö

Sähköä tuotetaan suuressa mittakaavassa uusiutuvalla energialla (tuuli, aurinko).

Fossiilisilla raaka-aineilla edelleen merkittävä rooli polttoaineiden, kemikaalien ja materiaalien tuotannossa.

Muutos tähän suuntaan meneillään.

Tie negatiivisiin päästöihin

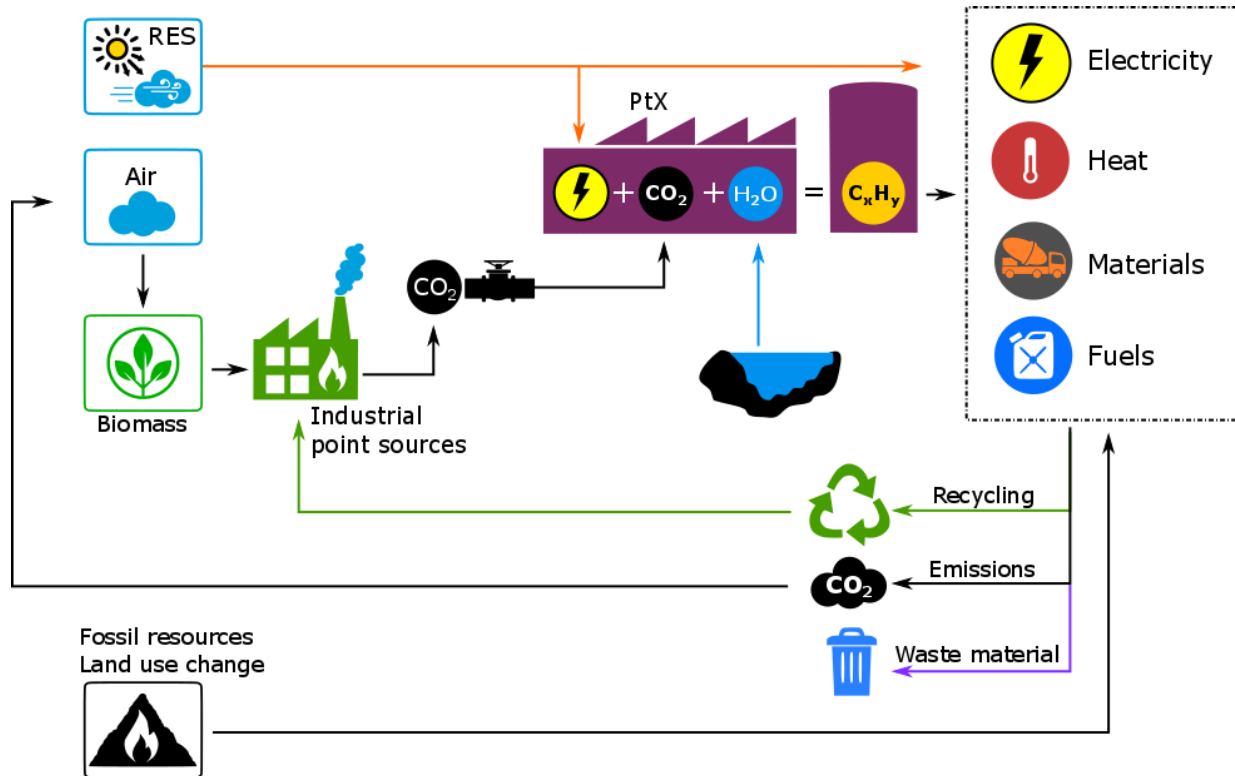


CCU + PtX

Kiertotalous – kierrätettyjen raaka-aineiden osuus kasvaa.

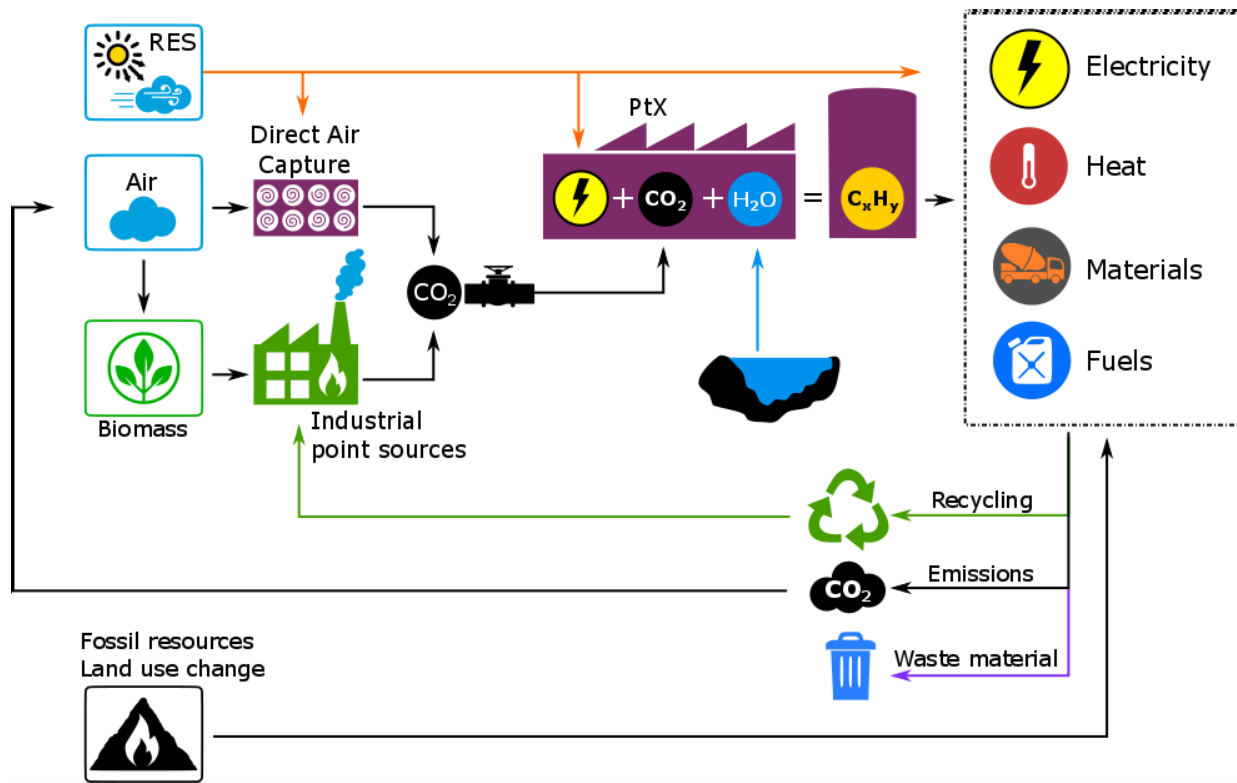
Uusiutuvia hiilivetyjä (C_xH_y) tuotetaan kierrätetystä hiilestä (CCU) with renewable electruusiutuvalla sähköllä Power-to-X (PtX) tehtaissa. Fossiiliset raaka-aineet korvataan osin PtX tuotteilla Teknologia kehitys- ja pilotointiastella.

Tie negatiivisiin päästöihin



CCU + PtX + Biomassa
Kasvava CO₂ sidonta biomassaan ja kasvavan biomassan hyödyntäminen.
Energiaviljely
Metsitys
Levien viljely
Biomassan hyödynnetään yhä enemmän fossiilisten raaka-aineiden korvaajina.
Riski negatiivisista maankäytön muutoksista ja hiilinielujen pienemisestä.

Tie negatiivisiin päästöihin

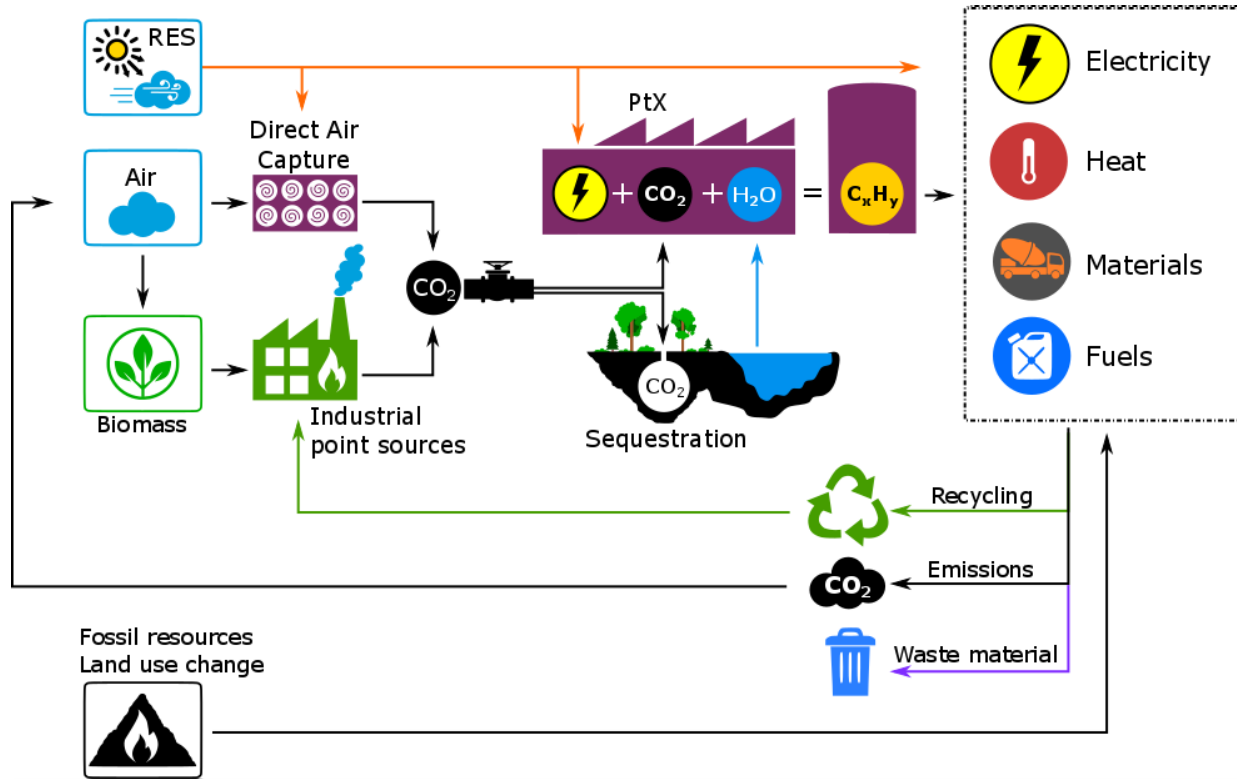


CCU + PtX + DAC

Biomassareitin lisäksi CO₂:ta otetaan talteen suoraan ilmakehästä – Direct Air Capture (DAC) uusiutuvaa sähköä hyödyntäen.

Ilmakehä on "rajaton" ja paikasta riippumaton hiilen lähde.

Tie negatiivisiin päästöihin

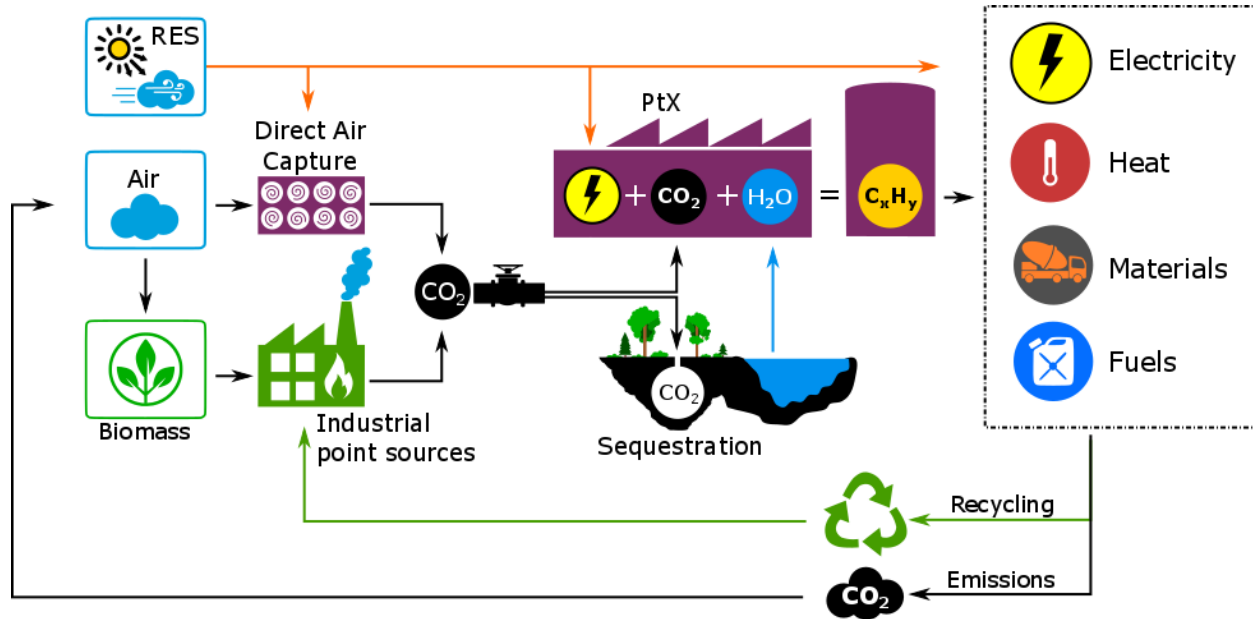


DAC+PtX+CCS

Talteenotettu CO₂ tai osa siitä varastoidaan pysyvästi geologisiin muodostumiin (CCS). Negatiiviset tai nolla CO₂ päästöt mahdollisia.

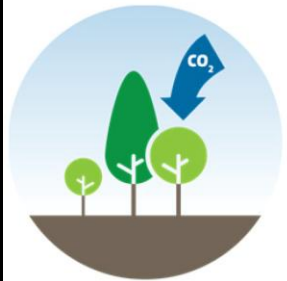
Varastoidun CO₂:n määrä pitää olla suurempi tai yhtä suuri kuin fossiilisten päästöjen.

Tie negatiivisiin päästöihin

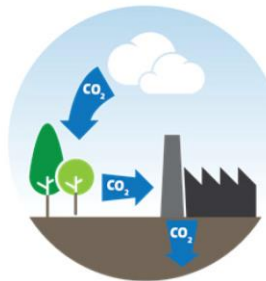


Kestävä järjestelmä
Lopulta ainoa kestävä järjestelmä on suljettu kierto, jossa materiaalit kierrätetään ja prosessien vaatima energia otetaan uusiutuvista lähteistä. Esiteollisen ajan CO₂ pitoisuus voidaan saavuttaa CCS:n avulla.

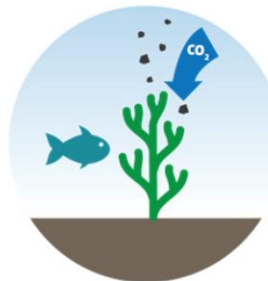
Keinot ilmakehän CO₂ pitoisuuden vähentämiseksi



Afforestation and Reforestation
Tree growth takes up CO₂ from the atmosphere.



Bioenergy with carbon capture and storage
Plants turn CO₂ into biomass that fuel power plants. CO₂ captured and stored underground.



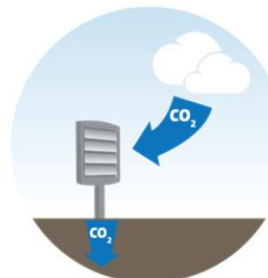
Ocean fertilization
Iron or other nutrients are applied to the ocean increasing CO₂ absorption.



Biochar
Partly burnt biomass is added to soils absorbing additional CO₂.



Enhanced weathering
Crushed minerals are applied to soil for chemical CO₂ absorption.



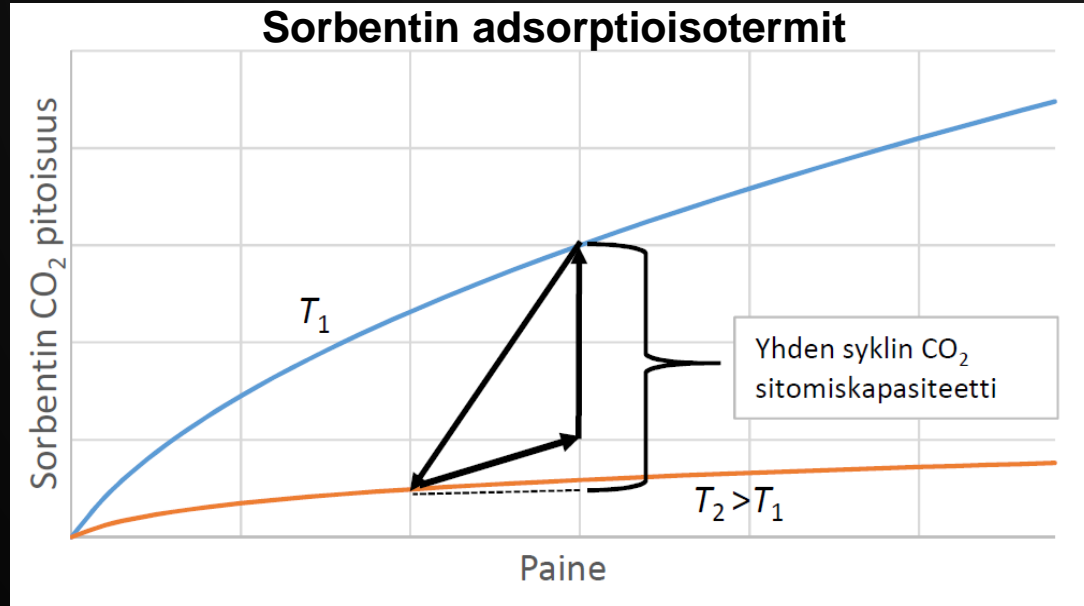
Direct Air Capture
CO₂ is removed from ambient air through chemical processes and stored underground.

Tämän esityksen fokus

Hiilidioksidin erotus ilmasta



- Olemassa olevaa tekniikka – käytössä esim. CO₂ poistoon väestönsuojien/sukellusveneiden sisäilmasta
- Ei kokemusta suuressa mittakaavassa, energiatehokkuus ei ole ollut fokuksessa
- Useimmat ratkaisut perustuvat kiinteiden sorbenttien käyttöön, joiden CO₂ adsorptiokapasiteetti riippuu paineesta ja lämpötilasta

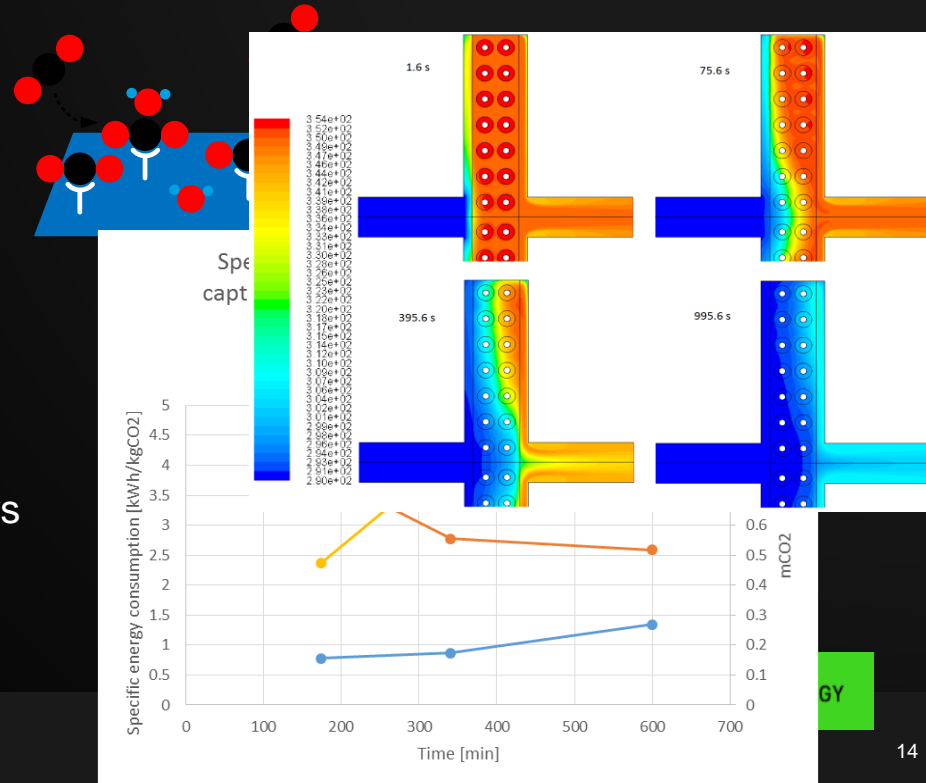


Adsorptio-desorptioprosessiin perustuva CO₂ erotus ilmasta



DAC-prosessin kehitysmahdollisuudet ja tutkimustarpeet

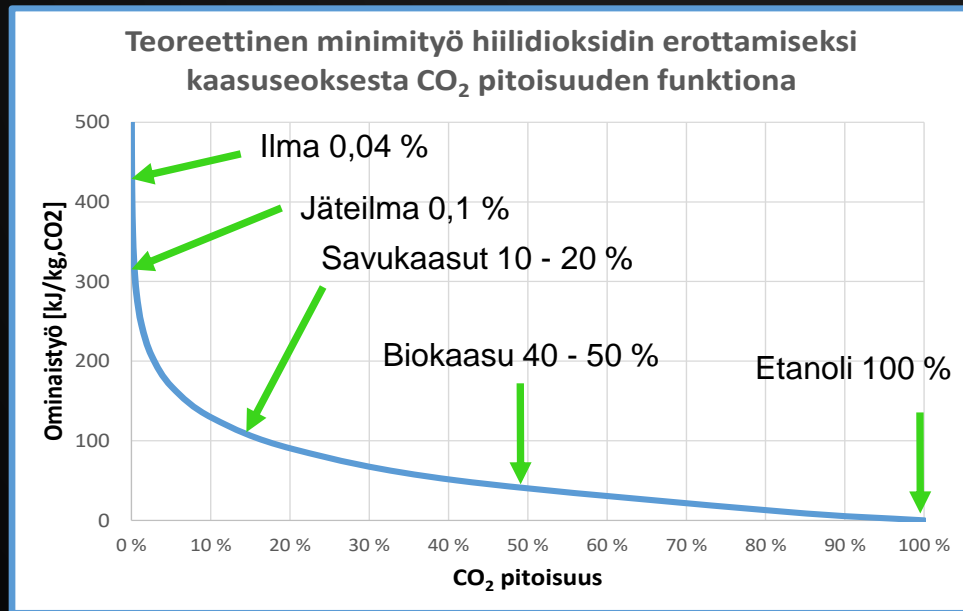
1. Sorbenttimateriaalien kehittäminen
 - Sitomiskapasiteetin suurentaminen
 - Lämpötilanjohtavuuden suurentaminen
2. Prosessin virtaustekninen kehittäminen
 - Painehäviön minimointi
 - Reaktiopinta-alan maksimointi
 - Aineen- ja lämmönsiirtovastuksen minimointi
3. Prosessin säätö- ja ohjausjärjestelmän kehitys
 - Syklin optimointi
 - Vaihtuvien ympäristöolosuhteiden ottaminen huomioon



Hiilidioksidin talteenoton vaatima työ



- Talteenottomenetelmästä riippumatta CO₂ erotukselle voidaan määrittää teoreettinen minimityö CO₂ pitoisuuden funktiona
- Todellisten prosessien vaatima työ on aina tätä selvästi suurempi.
- Teoreettinen minimityö ilmaerotukselle noin 4-kertainen verrattuna CO₂ erotukseen savukaasuista.



Hiilidioksidin talteenoton vaatima pinta-ala/MtCO₂



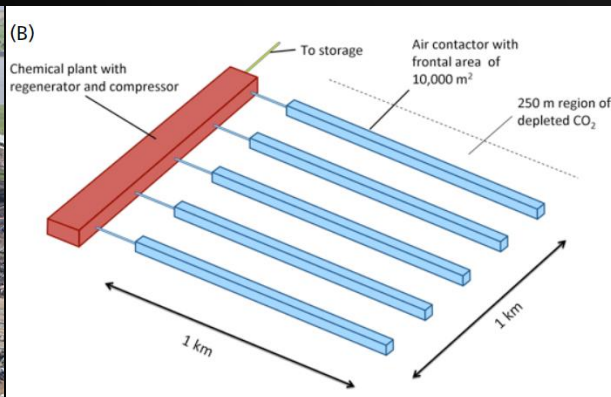
~ 1 ha

~10-100 ha

~ 100 000 – 1 000 000 ha



Boundary Dam in voimalaitoksen CCS-yksikön kapasiteetti noin 1 Mt CO₂/vuosi ja pinta-ala noin 50 x 150 m.

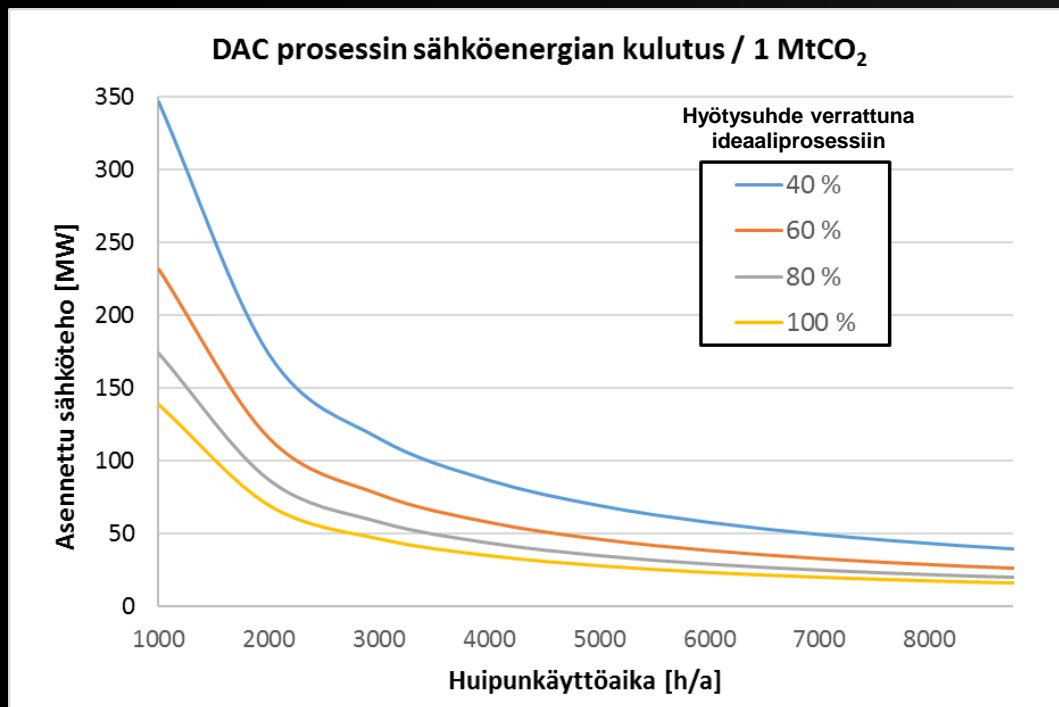


Vastaavan kapasiteetin DAC yksikön jalanjälki n. 100 kertainen (1 km x 1 km). (APS, 2011)



1 Mt vuotuisen hiilensidontaan tarvitaan ~ 500 000 ha metsää.

DAC prosessin energiankulutus



DAC prosessin energian kulutus
jos $\eta = 50 \%$

=> 280 000 MWh/MtCO₂

Tuotettuna aurinkosähköllä
aurinkovyöhykkeellä vastaa noin
140 ha:n aurinkovoimalaa

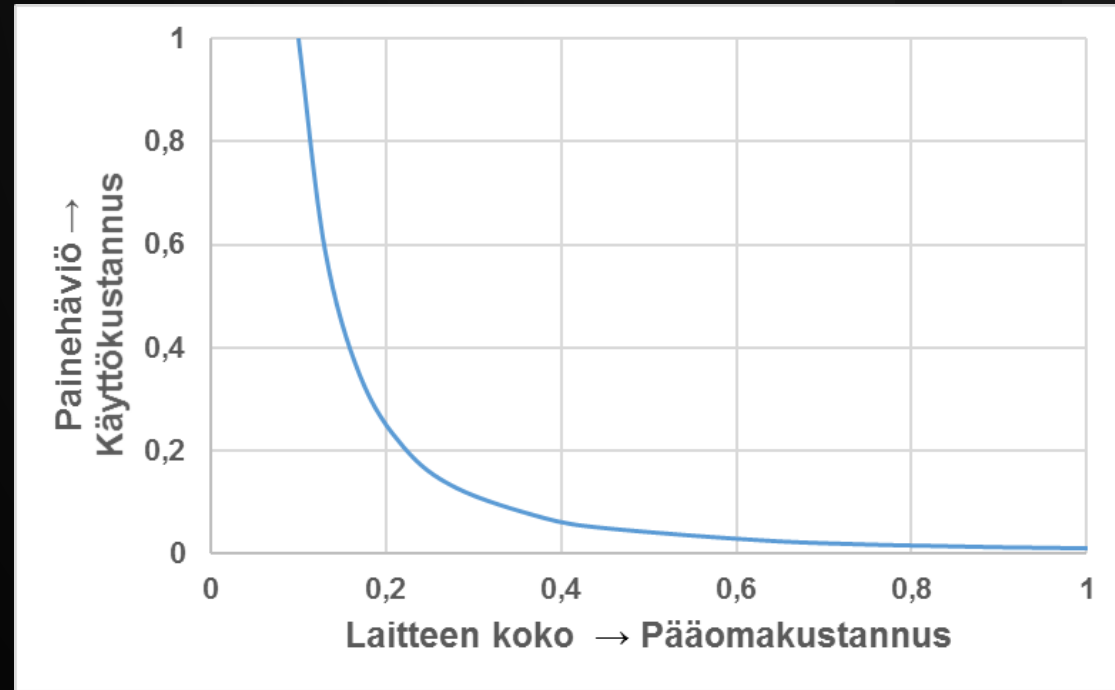
Suomessa tuulivoiman
huipunkäyttöajat hyvillä paikoilla
n. 3000 h/a

=> noin 100 MW asennettua
tuulivoimakapasiteetti/MtCO₂

Kustannukset (opex vs. capex)



- Kasvattamalla virtauspoikkipinta-alaa pystytään pienentämään puhallintehoa (tilantarve ja investointikustannukset kasvavat)
- Toisaalta virtausnopeuden pienentyessä myös reaktionopeus pienenee
- Kustannusoptimi riippuu toimintaympäristöstä
- Jos halpaa päästötöntä sähköä on käytettävissä, saadaan DAC-laitteisto pakattua pienempään tilaan



CO₂ ilmaerotusteknologiatoimittajia



Toimittaja	Teknologia	Muuta	Maa
Antecy www.antecy.com	Kiinteä inorgaaninen sorbentti K ₂ O, sähköä, lämpöä 80 C	Pilot kokoluokka – esitetty kustannusarvio < 200 €/tCO ₂	Hollanti
Carbon Engineering carbonengineering.com	Nestemäinen CaOH sorbentti, korkea lämpötila > 800 C	Korkea lämpötila edellyttää esim. CH ₄ polttamista 94-232 \$/t,CO ₂ [Keith et al., 2018]	USA
Climeworks www.climeworks.com	Kiinteä amiinipohjainen sorbentti	Demonstroitu – arvioitu kustannus 600 \$/tCO ₂	Sveitsi
Global Thermostat globalthermostat.com	Kiinteä amiinipohjainen sorbentti, sähköä ja lämpöä (85-100 C)	20-500 tCO ₂ /a/m ² 50 000 m ² /MtCO ₂	USA
Hydrocell hydrocell.fi	Kiinteä amiinipohjainen sorbentti, lämpöä ~80 C	Käytössä VTT-LUT Soletair demonstraatiossa www.soletair.fi	Suomi

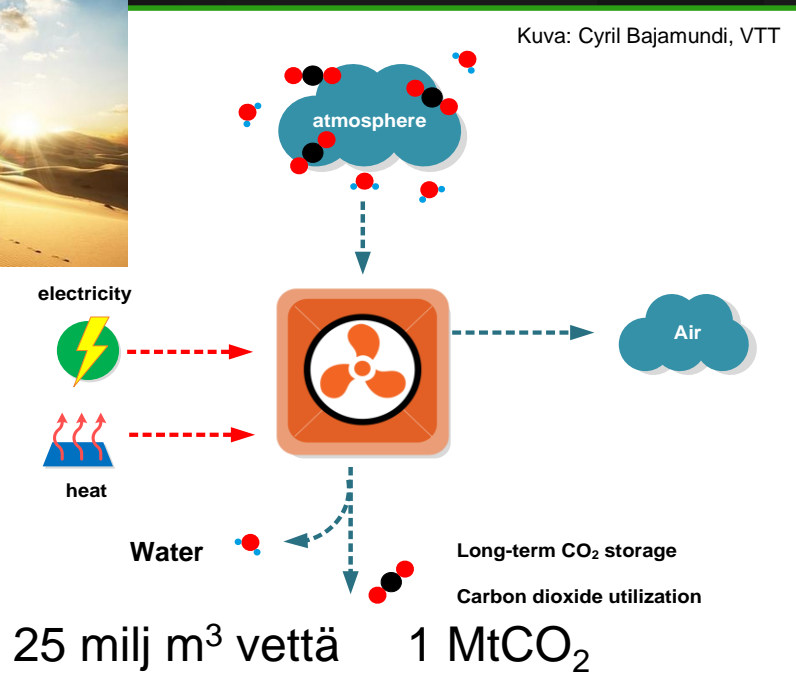
Yhdistetty CO₂ ja H₂O talteenotto



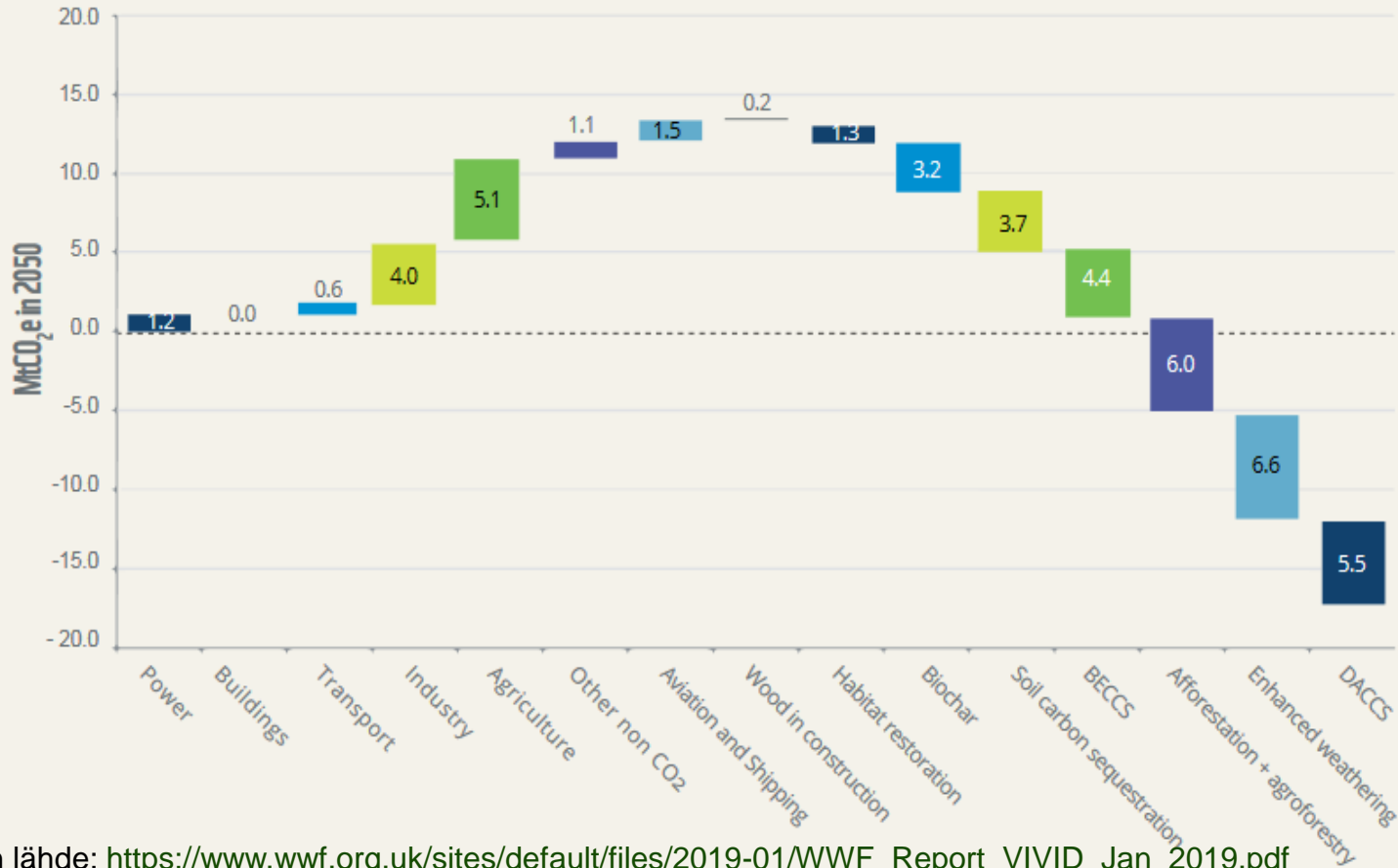
- Adsorptioprosessiin perustuvassa CO₂ ilmatalteenotossa erotetaan ilmasta myös vettä
- Jopa kuivassa autiomaailmassa vettä on noin 25 kertaa enemmän kuin CO₂:a
- Erotusprosessissa tuotetaan 1 MtCO₂ ja 25 milj. m³ vettä, jota voidaan hyödyntää esim. bioimassan kasvattamiseen



1 000 ha metsää



Skotlannin CO₂ negatiivinen skenaario (2050)



Kuvan lähde: https://www.wwf.org.uk/sites/default/files/2019-01/WWF_Report_VIVID_Jan_2019.pdf



Yhteenveto

- CO₂ talteenotto suoraan ilmasta on ja tulee aina olemaan hankalaa ja kallista verrattuna pistelähteiden CO₂ talteenottoon
- Hiilidioksidipäästöt lopetettava välittömästi, keinoina uusiutuvat, CCS, energiatehokkuuden kasvu, jossa sähköistämisellä suuri merkitys.
- Fossiili-CCS:n nopea implementointi välttämätöntä, erityisesti vaikeasti dekarbonisoitavaan teollisuuteen (teräs, sementti)
 - BECCS:n ja DACCS:n vaatima infra rakennettava ja maksatettava fossiiliteollisuudella.
- Tulevaisuudessa ilmakehästä pitää poistaa hiilidioksidia -> nettonegatiiviset emissiot
 - Biomassan lisääminen
 - Maaperän hiilensidonnan tehostus
 - BECCS
 - DACCS
- Fossiilinen hiili raaka-aineena pitää korvata bioperäisellä hiilellä.
- Biomassa ei yksinään voi olla ratkaisu, tarvitaan kaikkia keinoja DAC mukaan lukien.



Lähteet / lisätietoa

- Keith et al. A Process for Capturing CO₂ from the Atmosphere, *Joule*, 2, 1573–1594, 2018.
- Direct Air Capture of CO₂ with Chemicals A Technology Assessment for the APS Panel on Public Affairs, APS Physics, 2011.
- Betting on negative emissions - Potentials and uncertainties of new technologies to reduce the world's carbon debt, Mercator Research Institute on Global Commons and Climate Change, 2016. https://www.mcc-berlin.net/fileadmin/data/B2.3_Publications/Kurzdossiers/Negative_Emissionen/Policy_Brief_NET_EN.pdf
- A Climate of Possibility: Harnessing Scotland's natural resources to end our contribution to climate change, WWF Scotland, 2019. https://www.wwf.org.uk/sites/default/files/2019-01/WWF_Report_VIVID_Jan_2019.pdf
- <http://www.neocarbonenergy.fi/>
- <https://soletair.fi/>



TRAILBLAZER

Show the way.
Never follow.

