

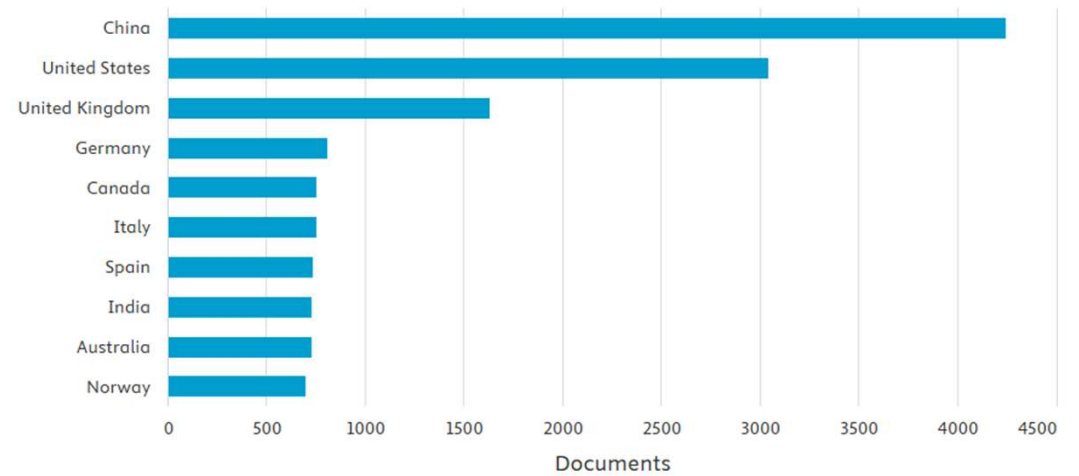
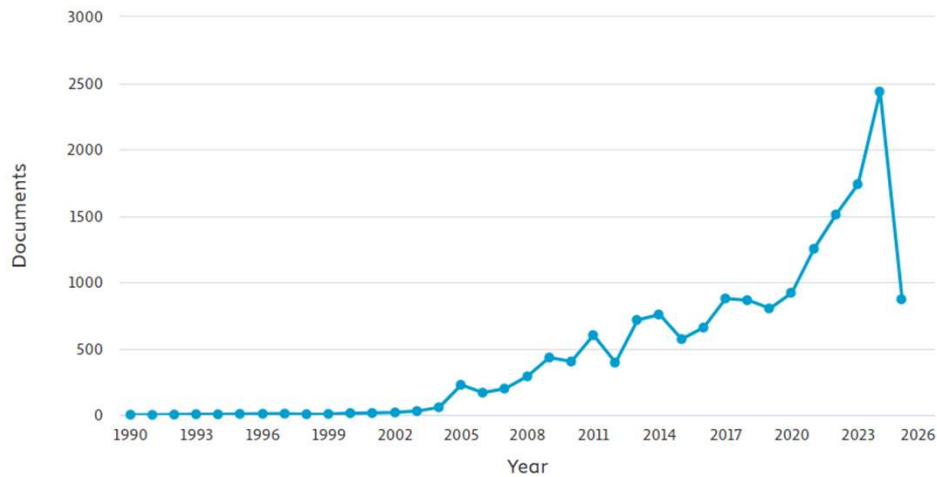
# SÜSINIKU (CO<sub>2</sub>) PÜÜDMISE VÕIMALIKKUS JA TEHNOLOOGIAD

Oliver Järvik

TALLINNA  
TEHNIKAÜLIKOOL

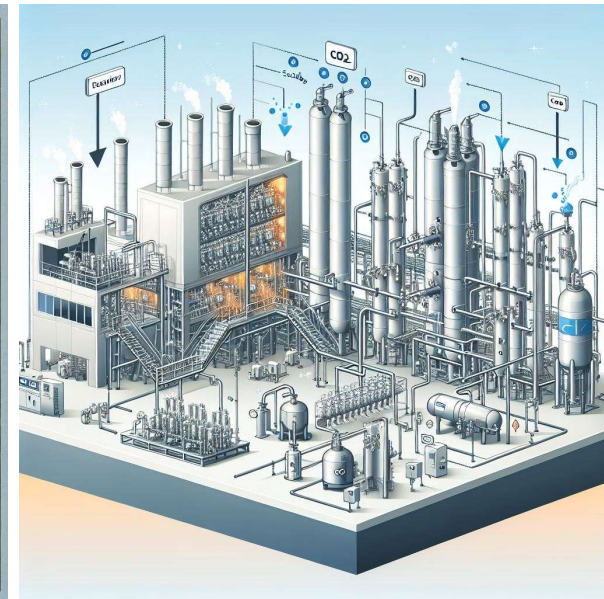
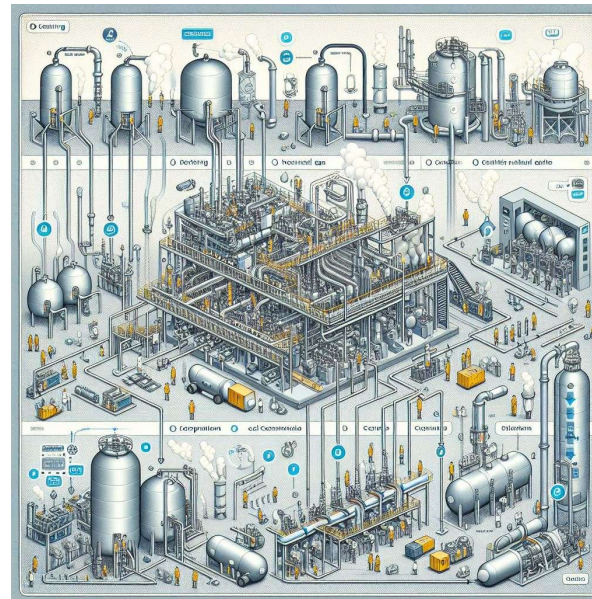
# CO<sub>2</sub> PÜÜDMISE AJALOOST

- Märksõnad: CO<sub>2</sub> AND capture AND technology



# CO<sub>2</sub> PÜÜDMINE JA ERALDAMINE

- CO<sub>2</sub> püüdmine – **põlemisgaasid**, kus CO<sub>2</sub> kontsentratsioon on tihti madal:
  - Energeetika, keemiatööstus (sh metallide tootmine)
- CO<sub>2</sub> separatsioon/eraldamine tööstuses – kõrgeid CO<sub>2</sub> kontsentratsioonid, kõrgeid rõhuid
  - Maagaasi töötlemine (aastakümneid kasutusel) – kuni 10,6 Mta
  - Vesiniku tootmine (aastakümneid kasutusel)



*Copiloti nägemus CO<sub>2</sub> maagaasist (vasakul) ja sünteetisgaasist (paremal) eraldamise tehnoloogilistest protsessidest*

# KUS VÕIKS KASUTADA CO<sub>2</sub> PÜÜDMIST?

- CO<sub>2</sub> püüdmist mõjutavad parameetrid:
  - CO<sub>2</sub> kontsentratsioon / osarõhk [ $p_i = y_i P$ ] – üldiselt vahemikus 1 kuni 35%  
CO<sub>2</sub> ↑, maksumus↓
  - Gaasivoo rõhk – mõjutab edasist CO<sub>2</sub> käitlemist:  
rõhk ↑, maksumus↓

Tööstus	CO <sub>2</sub> punktallikas	CO <sub>2</sub> osarõhk (märg) (kPa)	Gaasivoo rõhk (kPa)	Sisemine CO <sub>2</sub> püüdmine
Energeetika	Maagaasi kombineeritud tsükliga (NGCC) elektrijaam	3,8-4,6	Atm	Ei
	<b>Söeelektrijaam</b>	12,2-14,2	Atm	Ei
	<b>Biomassil/jäätmetel töötav elektrijaam</b>	10,1-12,2	Atm	Ei
Elektrienergia / tööstuslik soojus Nafta rafineerimine / naftakeemia	Maagaasil töötav elektri- ja/või soojusjaam (avatud tsükkel)	4,1-8,1	Atm	Ei
	Katalüütiline krakkimine	10,1-14,2	Atm	Ei
	Protsessi kütteseade	8,1-10,1	Atm	Ei
	Etüleenitootmise aurukrakkimine	7,1-12,2	Atm	Ei
	Metaani auruga reformimine vesiniku tootmiseks	<b>300-480</b>	2000-3000	Ei
	Etüleenoksiidi tootmine	<b>&gt;92</b>	Atm	Jah
	Tsement	Pöördahju põlemisgaasid	<b>~18</b>	Atm
Tselluloos ja paber	Eelkaltsineerija	<b>20-30</b>	Atm	Ei
	Lubjaahi	<b>~16</b>	Atm	Ei
Raud ja teras	COREXi sulatamise redutseerimisprotsess	<b>32-35</b>	Atm	Ei
	Körgahi	<b>17-28</b>	Atm	Ei
	Lubjaga kaltsineerimine	7,1-8,1	Atm	Ei
	Paagutusahi	3,7-4,2	Atm	Ei
Alumiinium	Alumiiniumisulatus	0,8-11	Atm	Ei
Väetis	Söe gaasistamise sünteesigaasiks	<b>750-2500</b>	3000-6000	Jah*
	Maagaasi reformimise sünteesigaasiks	<b>300-1200</b>	2000-3000	Jah*
Maagaas	Maagaasi töötlemine	<b>Erinevad, kuni 5000</b>	900-8200+	Jah, happeliste gaaside eemaldamine
Bioetanool	Etanooli käärivamine	<b>&gt;85</b>	Atm	**

\*CO<sub>2</sub> eraldatakse H<sub>2</sub>-st järgnevas ammoniaagi tootmiseks  
 \*\*Vajalik on ainult gaasi kuivatamine ja järgnev komprimeerimine

[Global CCS Institute, 2021. TECHNOLOGY READINESS AND COSTS OF CCS]



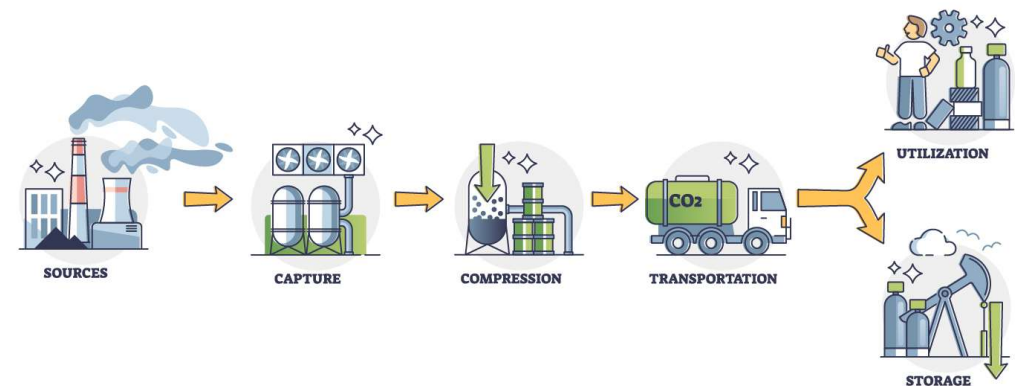
# CO<sub>2</sub> PÜÜDMINE: KUS OLEME?

- NB! CO<sub>2</sub> püüdmiseks klassifitseeruvad need projektid, kus CO<sub>2</sub> ei emiteerita atmosfääri
- Olemasolevad CO<sub>2</sub> püüdmise / eraldamise võimsused (~52 Mt/a) ja püütud CO<sub>2</sub> käitlemine:

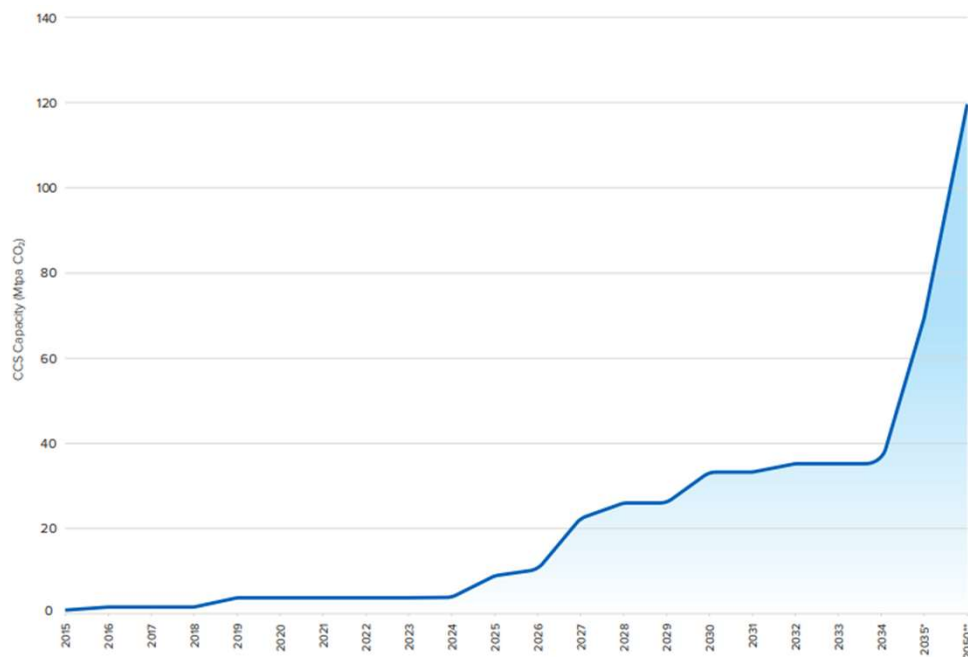
Toode/valdkond	Arv	Tootlikkus, Mt CO <sub>2</sub> /a
H <sub>2</sub> /NH <sub>3</sub> /Väetis	7	0,3 – 3
Maagaasi töötlemine	16	0,16 – 10,6
Elektrienergia ja soojuse tootmine	4	0,002 – 1,4
Etanooli tootmine	5	0,1 – 1
Nafta rafineerimine	2	0,3 – 1,6
Keemia	6	0,05 – 1
Raua ja terase tootmine	1	0,8
Tsemenditööstus	1	0,2
DAC (õhust püüdmine)	4	0,001 – 0,03

KUHU?

- EOR – 32 projekti
- Ladustamine – 12 projekti
- Mineraalne karboniseerimine – 3 projekti



# CO<sub>2</sub> PÜÜDMINE: KUHU PLAANITAKSE JÕUDA?



- Erinevas arengujärgus kommertsiaalsed+piloot ja eksperimentaalsed CCS rakendused

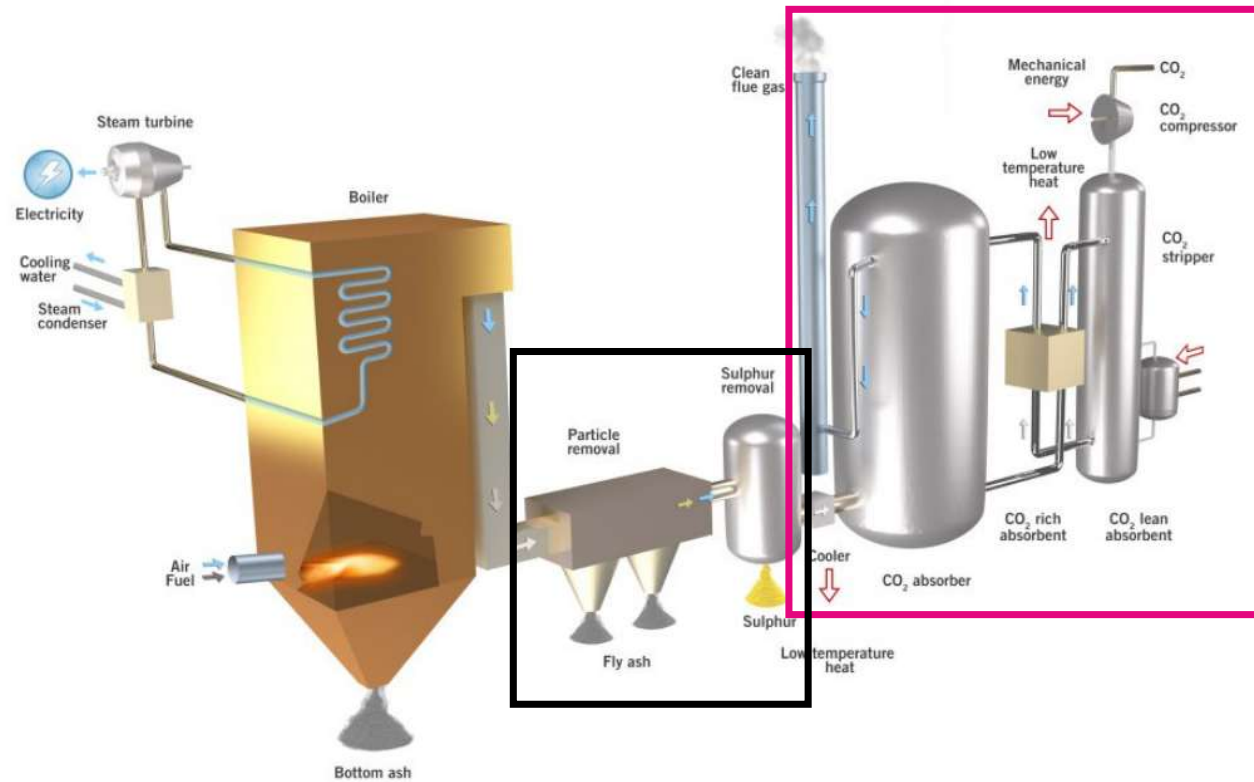
Toode/valdkond	Arv
H <sub>2</sub> /NH <sub>3</sub> /Väetis	63
Biomassist energia tootmine	18
Tsement / lubi / betoon	31
Keemia	20
CO <sub>2</sub> transport / ladustamine	196
Etanool	53
Raua ja terase tootmine	7
Maagaas	35
Nafta rafineerimine	16
Elektrienergia ja soojuse tootmine	74
DAC (õhust püüdmine)	12

[Global CCS Institute andmebaas]

Euroopas ~190  
 Põhja-Ameerikas ~311  
 Aasia+Okeaania ~75

} **Tootlikkus**  
**360 Mt CO<sub>2</sub>**

# MIDA TÄHENDAB CO<sub>2</sub> TEHNOLOOGIATE RAKENDAMINE?

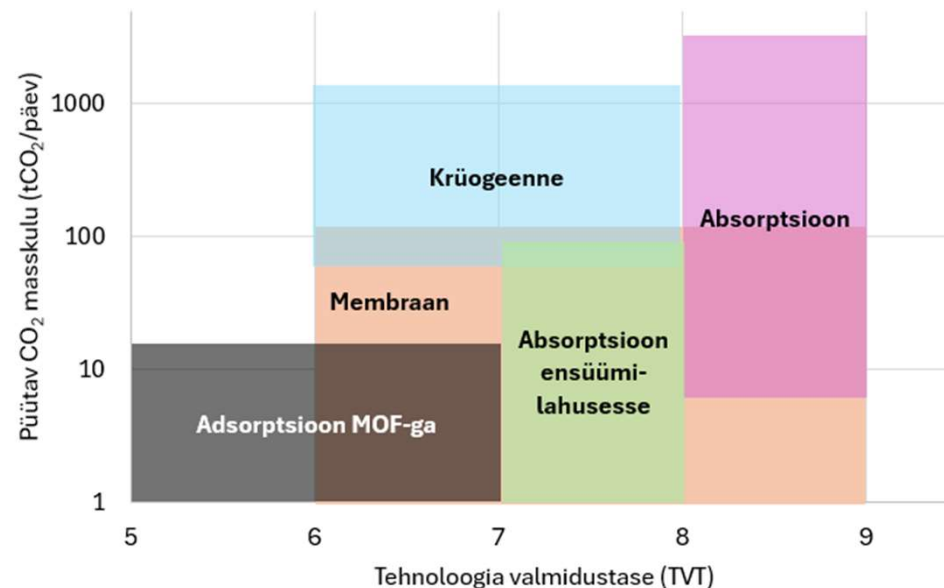




# CO<sub>2</sub> PÜÜDMINE: VÕIMALIKUD TEHNOLOOGIAD

	Meetod	TVT	Püütava CO <sub>2</sub> kulu, t/päev	Energiakulu, GJ/t
<b>Protsessieelne püüdmine</b>	Absorptsioon (keemiline)	9	20 kuni >3000	1 kuni 3
	Absorptsioon (füüsikaline)	9	100 kuni >10000*	>0,3 (2,3) <sub>el</sub> +(1/3) <sub>th</sub>
<b>Protsessis püüdmine</b>	Hapnikus põletamine	8	>10000*	1,5-1,7
	Hapnikukandja ringlus (sh kaltsiumi ringlus)	6	>10000*	
<b>Protsessijärgne püüdmine</b>	Absorptsioon (keemiline)	8-9	1 kuni >10000*	1,0-5,5
	Absorptsioon (füüsikaline)	9	1500	1-1,7
	Krüogeenne	6-8	250 kuni >10000*	0,2-2
	Membraan	6-9	1 kuni >10000*	0-2,9
	Adsorptsioon	7-9	10 kuni 5000*	0-2,8
	Kõikuvrõhuga adsorptsioon	9	68-2700*	>0
<b>DAC</b>		5-7	10 kuni >1400	(4-12) <sub>th</sub> + (0,9-3,2) <sub>e</sub>

\* CO<sub>2</sub> püüdmiseks ehitatud suurimad üksikud seadmed on võimalised separeerima protsessi gaasivoost umbes 1,5 Mt CO<sub>2</sub> aastas ehk ligikaudu 4100 t CO<sub>2</sub> ööpäevas.



CO<sub>2</sub> järelpüüdmise tehnoloogiad ja nende TVT-d

# PERSPEKTIIVSED CO<sub>2</sub> PÜÜDMISE TEHNOLOOGIAD

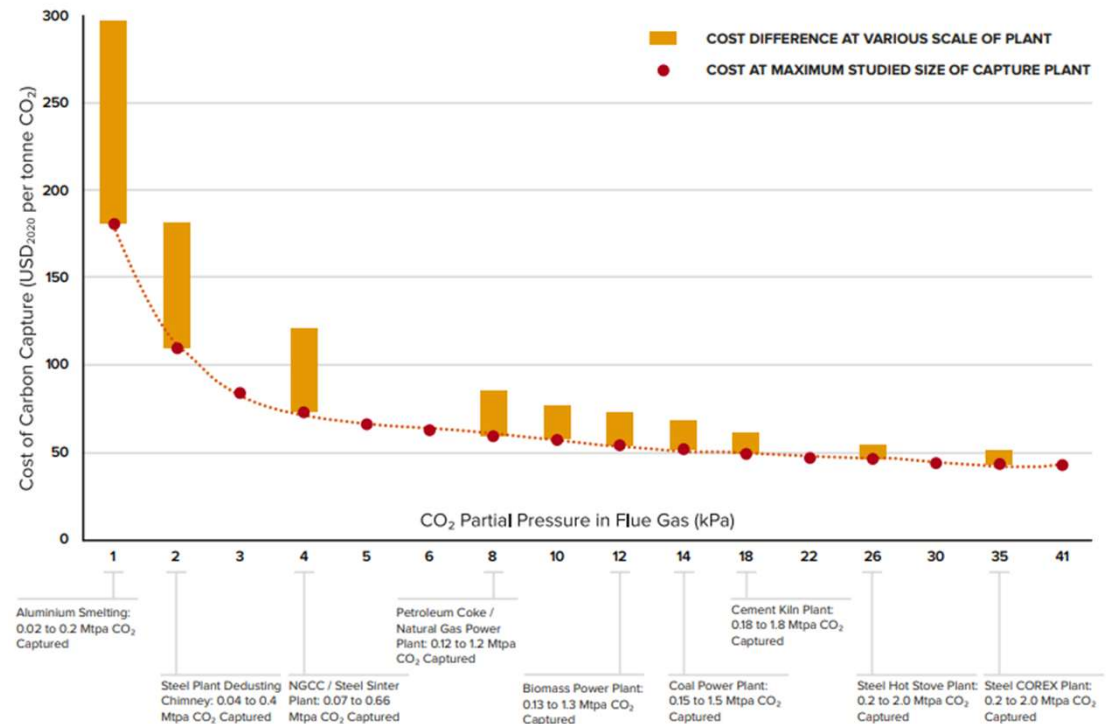
	Absorptsioon	Membraan	Adsorptsioon	Krüogeenne
Positiivne	<ul style="list-style-type: none"> <li>Kõrge TVT</li> <li>Suur CO<sub>2</sub> eraldamise kiirus/tootlikkus</li> <li>Rakendatav erinevatel rõhkudel</li> <li>Rakendatav erinevates mastaapides ja erinevate CO<sub>2</sub> kontsentratsioonide korral</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Üldiselt madalad kapitali- ja opereerimiskulud</li> <li>Väikesed mastaabid</li> <li>Lihtne opereerida</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Potentsiaalselt lai adsorbentide valik</li> <li>Adsorbentidel üldiselt suur CO<sub>2</sub> mahtuvus</li> <li>Võimalik opereerida erinevatel tingimustel</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Võimaldab saada suure puhtusega CO<sub>2</sub></li> <li>Sobiv kõrgete CO<sub>2</sub> kontsentratsioonide korral</li> </ul>
Negatiivne	<ul style="list-style-type: none"> <li>Suur energiakulu absorbendi regenereerimiseks</li> <li>Absorbendi korrosiivsed omadused</li> <li>Absorbendi stabiilsus</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Tundlik lisanditele</li> <li>Ei sobi kõrgete temperatuuride korral</li> <li>Membraani hind võib olla väga kõrge</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Suur rõhulang</li> <li>Tundlik gaasis olevatele lisanditele</li> <li>Adsorbent on ebastabiilne</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Kõrge kapitalikulu</li> <li>Kõrged opereerimiskulud</li> <li>Potentsiaalsed soojusülekanne probleemid</li> <li>Ummistumise oht</li> </ul>

# TEHNOLOGIATE PAKKUJAD



# CO<sub>2</sub> PÜÜDMISE MAKSUMUS

- Sõltub oluliselt eelnevast tehnoloogiast, st gaasi parameetrid määravad kasutatava tehnoloogia, selle parameetrid ning maksumuse
  - Kõrge CO<sub>2</sub> osarõhk
    - Efektivsem protsess → madalamad kapitalikulud
    - Füüsikaline absorptsioon → odavam tehnoloogia; madalamad opereerimiskulud
  - Kõrge rõhk
    - väiksem gaasi maht → madalamad kapitalikulud
  - Madal CO<sub>2</sub> osarõhk
    - Selektiivsed absorbendid → kallim tehnoloogia; kõrgemad opereerimiskulud
- Kui suur osa CO<sub>2</sub> püütakse?

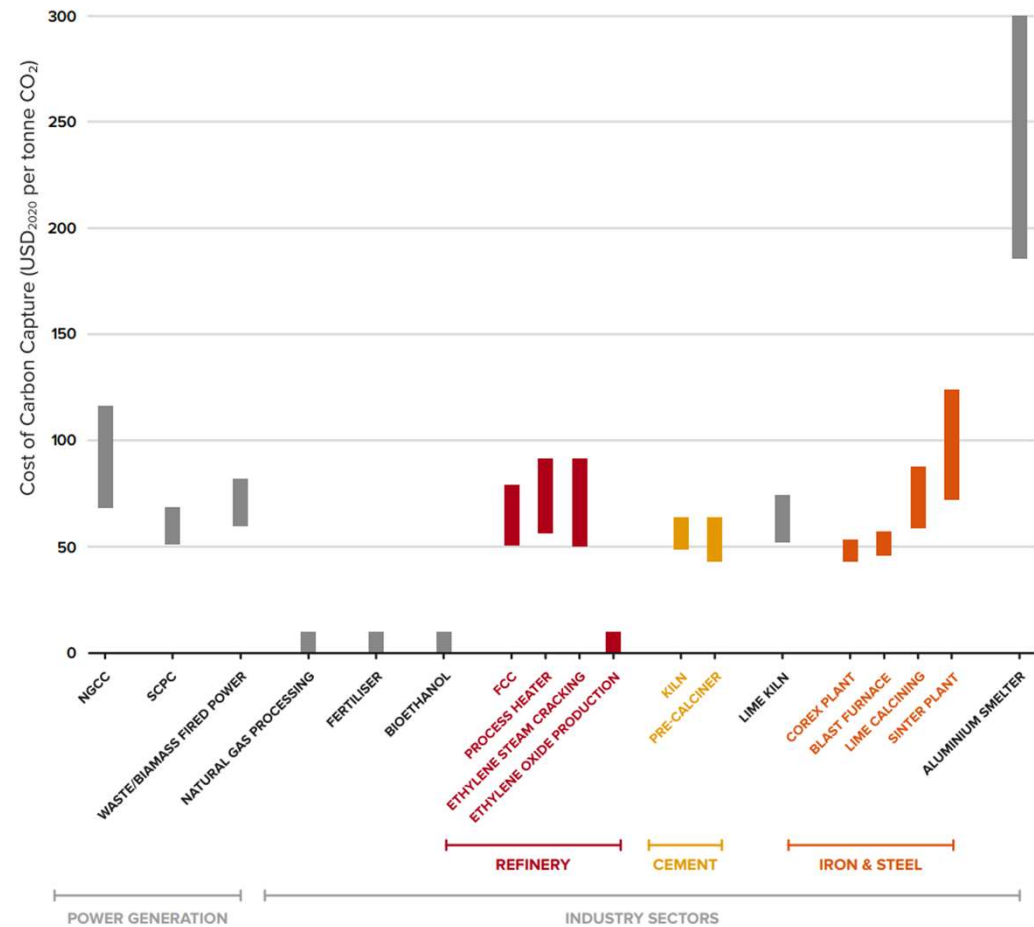


CO<sub>2</sub> püüdmise maksumuse sõltuvus CO<sub>2</sub> kontsentratsioonist ja mastaabist

[Global CCS Institute, 2021. TECHNOLOGY READINESS AND COSTS OF CCS]

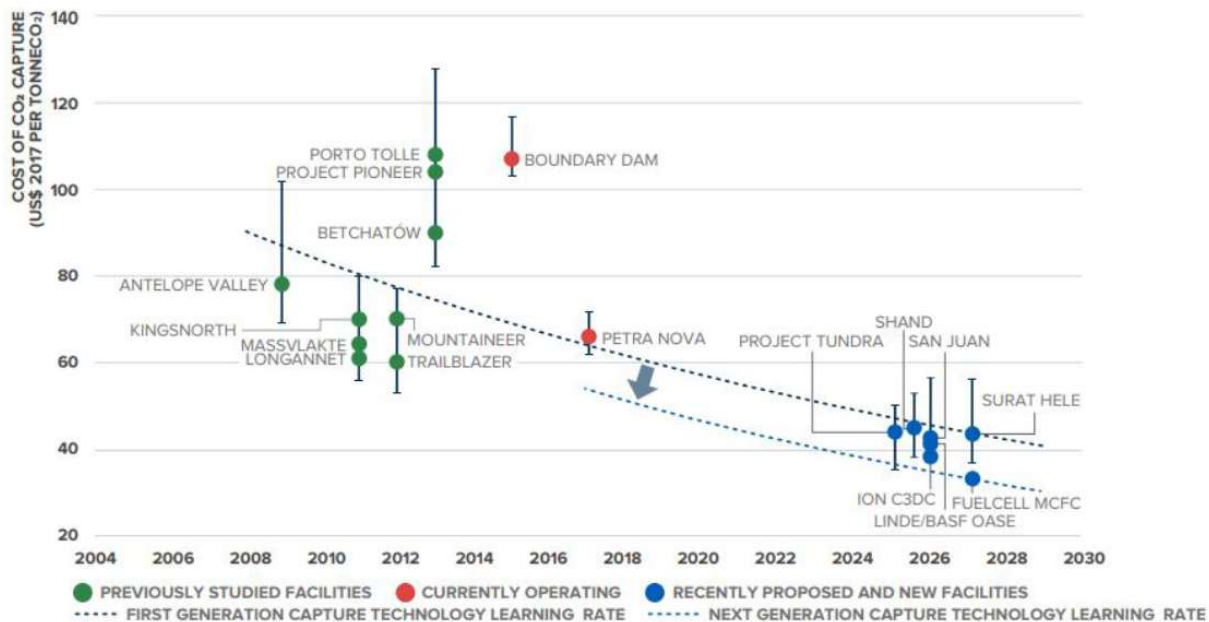
# CO<sub>2</sub> PÜÜDMISE MAKSUMUS

- CO<sub>2</sub> püüdmise maksumus sõltub projektist/objektist:
  - Suurus/tootlikkus
  - Asukoht
  - CO<sub>2</sub> voo omadused
- Tehnoloogia on ülioluline, kuid see pole ainus hinda mõjutav tegur. Kogumaksumus koosneb järgmistest kuludest:
  - CO<sub>2</sub> püüdmine
  - CO<sub>2</sub> kuivatamine ja kokkusurumine/veeldamine (olenevalt transpordimeetodist)
  - CO<sub>2</sub> transport torujuhtme, laeva või veoautoga
  - CO<sub>2</sub> ladustamine ning ladustatud CO<sub>2</sub> seire ja kontrollimine

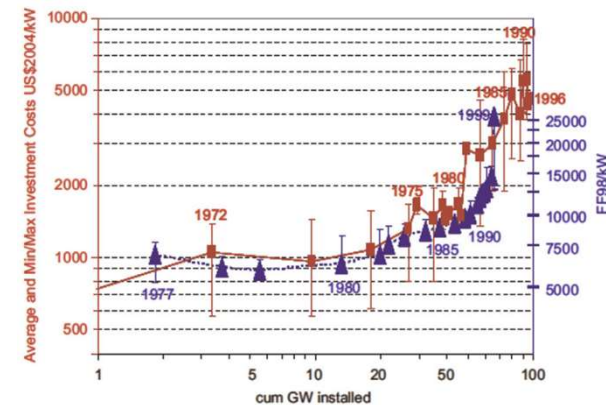


[Global CCS Institute, 2021. TECHNOLOGY READINESS AND COSTS OF CCS]

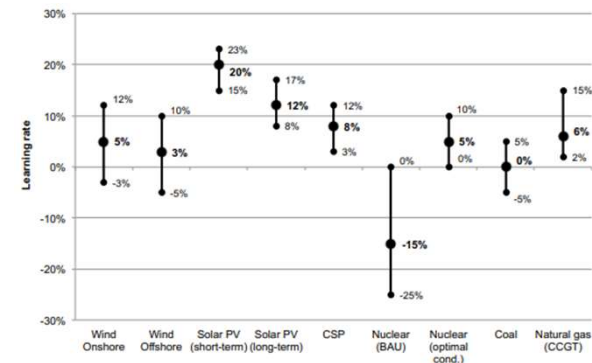
# CO<sub>2</sub> PÜÜDMISE MAKSUMUS – KUIDAS SEE VÕIKS MUUTUDA?



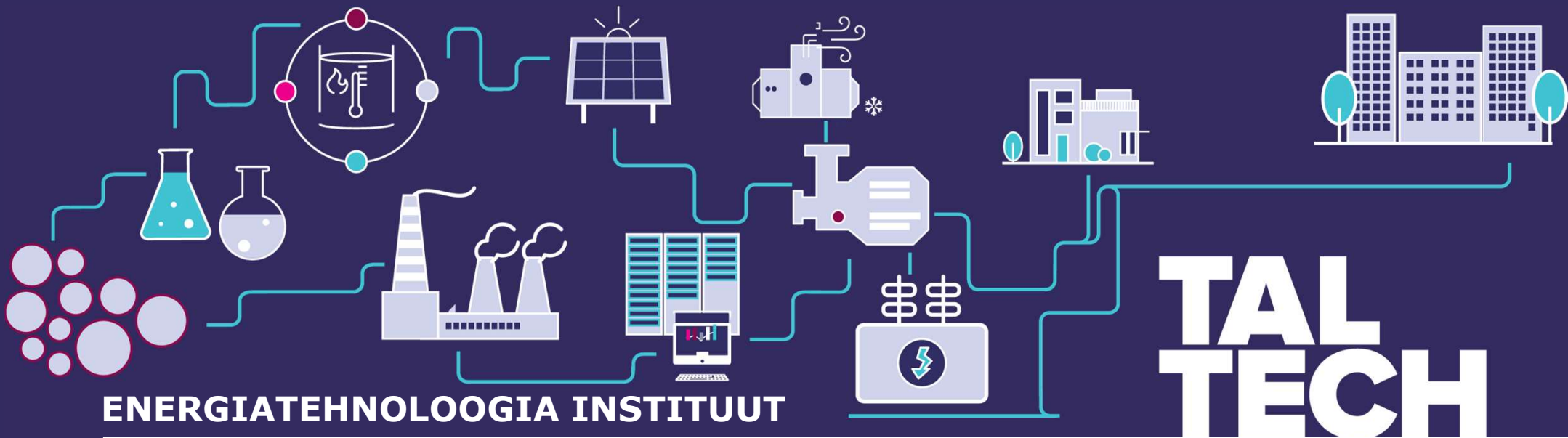
CO<sub>2</sub> püüdmise tehnoloogiate õppimiskõver  
[WP3 Scale and Cost Reduction. Scottish Net Zero Roadmap]



Tuumareaktorite õppimiskõver  
[DOI: 10.1016/j.enpol.2015.06.011]



Erinevate energia tootmisvõimsuste õppimiskiirus  
[DOI: 10.1016/j.rser.2017.08.077]



**TÄNAN!**

[oliver.jarvik@taltech.ee](mailto:oliver.jarvik@taltech.ee)

**TALLINNA  
TEHNIKAÜLIKOO**