

Direct Air Capture i Danmark

En pixibog om vejen til negative CO₂-emissioner i 2050

Paulsen, Maria Maigaard; Petersen, Sebastian Bruhn; Januchta, Mikolaj; Pedersen, Thomas Helmer

DOI (link to publication from Publisher):
[10.54337/aau714713063](https://doi.org/10.54337/aau714713063)

Creative Commons License
CC BY 4.0

Publication date:
2024

Document Version
Også kaldet Forlagets PDF

[Link to publication from Aalborg University](#)

Citation for published version (APA):

Paulsen, M. M., Petersen, S. B., Januchta, M., & Pedersen, T. H. (2024). *Direct Air Capture i Danmark: En pixibog om vejen til negative CO₂-emissioner i 2050*. (1 udg.) Institut for Energiteknik, Aalborg Universitet. <https://doi.org/10.54337/aau714713063>

General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal -

Take down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us at vbn@aub.aau.dk providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

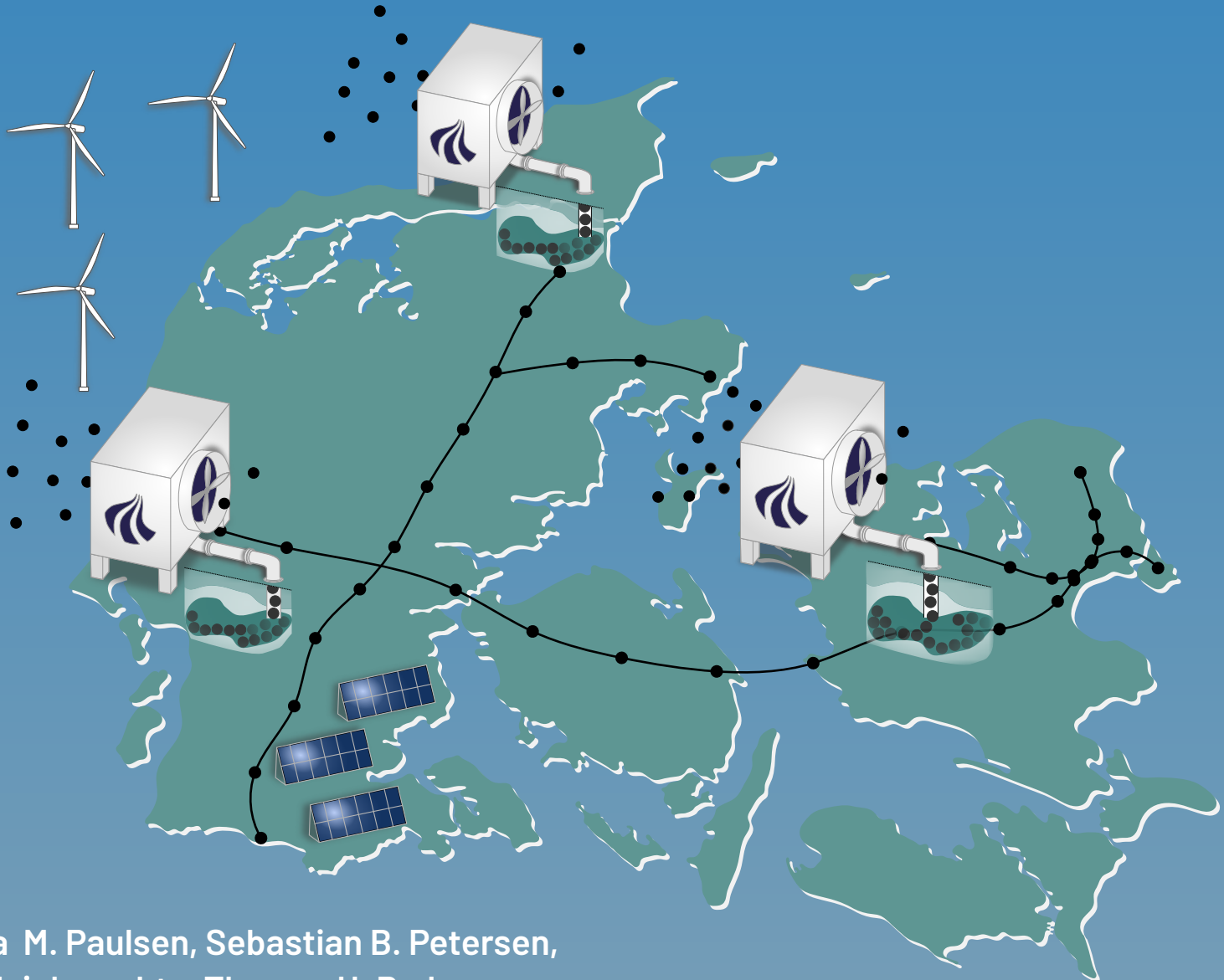
Direct Air Capture i Danmark

En pixibog om vejen til negative CO₂-emissioner i 2050



AAU ENERGI

AALBORG
UNIVERSITET



Maria M. Paulsen, Sebastian B. Petersen,
Mikolaj Januchta, Thomas H. Pedersen

Forord

Direct air carbon capture and storage, DACCS (atmosfærisk CO₂-fangst og lagring), er en af få teknologier, der kan bruges til at rette op på fortidens synder med udledning af drivhusgasser ved at levere negative CO₂ emissioner. Formålet med dette white-paper er at præsentere, hvad vi mener, er status inden for DACCS i en dansk kontekst. I den sammenhæng beskriver vi ressourceforbruget af vand, energi og arealer for at nå målsætningen om 110 % drivhusgasreduktioner i 2050. Derudover diskuterer vi de mest kritiske udfordringer ved at implementere DACCS i Danmark.

Vi vil også udfordre den dogmatiske tankegang, der har præget diskussionen om DACCS, og har som ambition at skabe et fælles udgangspunkt for den fremtidige dialog. Vi fremlægger desuden en handlingsplan for udvikling af teknologierne og de politiske rammebetingelser.

White-paperet er blevet til på baggrund af vores forskning, der begyndte med partnerskabet INNO-CCUS i 2022. Det skal derfor ses som første udgave af et opslagsværk, der ændrer sig i takt med udviklingen inden for DAC.

Publikationen har modtaget støtte fra EUDP og Innovationsfonden, hvis bidrag har været afgørende for vores arbejde. Vi håber, at vores indsats vil bidrage til en mere nuanceret diskussion om DACCS og dets potentiale i Danmark.

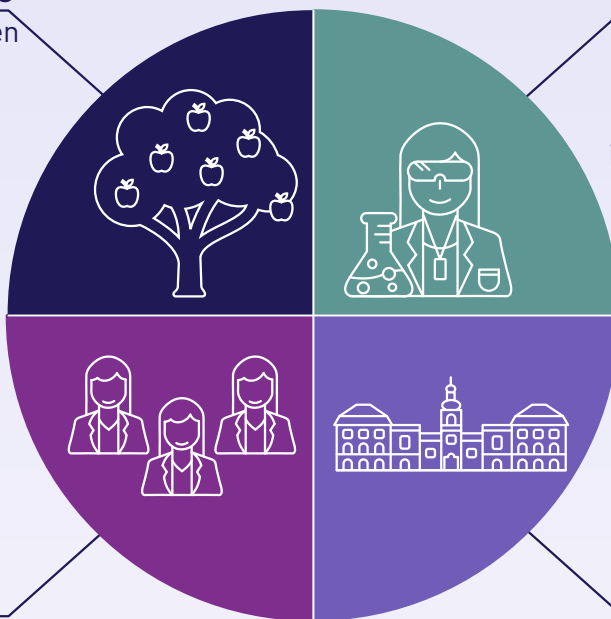
God læselyst!



Opsummering

Nødvendigheden af DACCS

DACCS er nødvendigt for en bæredygtig realisering af 110 %-målsætningen, selvom det er en højthængende frugt



Teknisk anbefaling

Næste generation DAC-teknologier skal demonstreres mhp. at øge investeringstilliden og opnå erfaring til videreudvikling af teknologierne

Markedsanbefaling

Økonomiske incitaments-strukturer bør implementeres for at fremme udviklingen af DACCS

Regulatorisk anbefaling

Der bør udarbejdes en national kulstofstrategi, som sikrer bæredygtig brug af biomasse og garanterer additionalitet

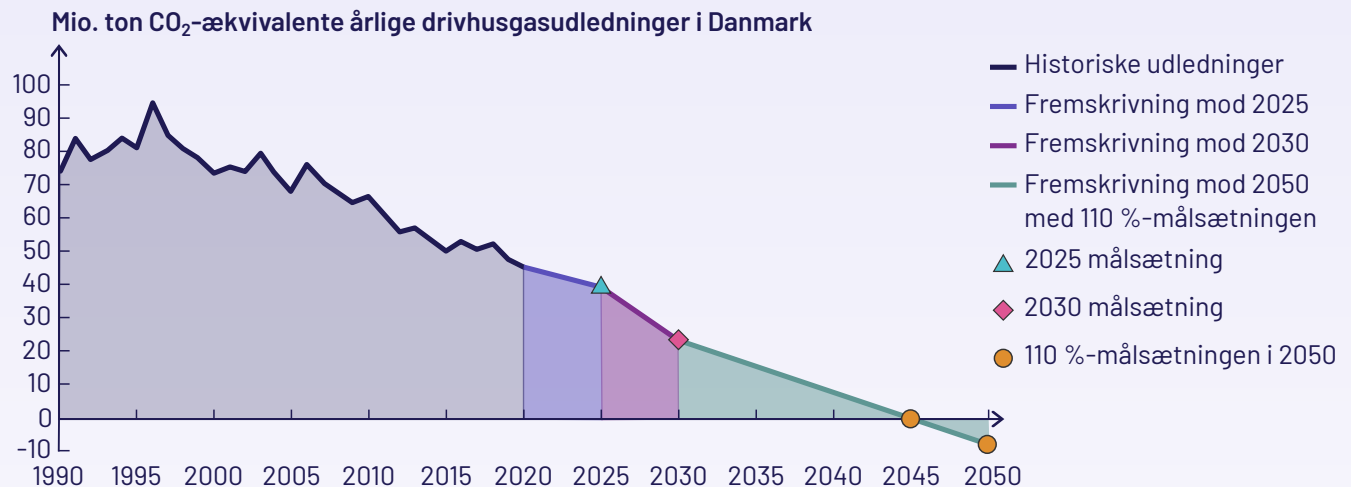
En uddybende liste over anbefalinger findes på side 31.

Danmarks 110 %-målsætning

Danmark har sat et ambitiøst mål om at opnå en 110 % reduktion af drivhusgasser i år 2050 som et led i strategien for den grønne omstilling.¹ Med målet om en så markant reduktion af drivhusgasser er der reelt tale om et klimapositivt samfund, som optager flere drivhusgasser, end der udledes. Dermed kan vi kompensere for vores historiske udledninger og forventeligt bremse den globale opvarmning.

I Figur 1 ses Danmarks historiske udledninger angivet i CO₂-ækvivalenter siden 1990, samt de forventede fremtidige udledninger baseret på en realisering af 110 %-målet. Med de nuværende målsætninger vil Danmark være CO₂-neutralt i 2045.

På de følgende sider gennemgår vi, hvordan en realisering af 110%-målsætningen ser ud, når CO₂ fanges direkte fra atmosfæren med DACCS (*direct air carbon capture and storage*).



Figur 1: Danmarks nationale historiske udledninger samt fremskrivninger som følge af klimamålene.²

Dogmet om DAC

DAC dækker over flere teknologier, der har til fælles, at de ved hjælp af elektricitet og varme kan opfange CO₂ direkte fra luften og derefter lagre den permanent i undergrunden, hvorved der skabes negative emissioner. CO₂'en fanget fra DAC kan i princippet også bruges til andre formål, men det er en anden historie.

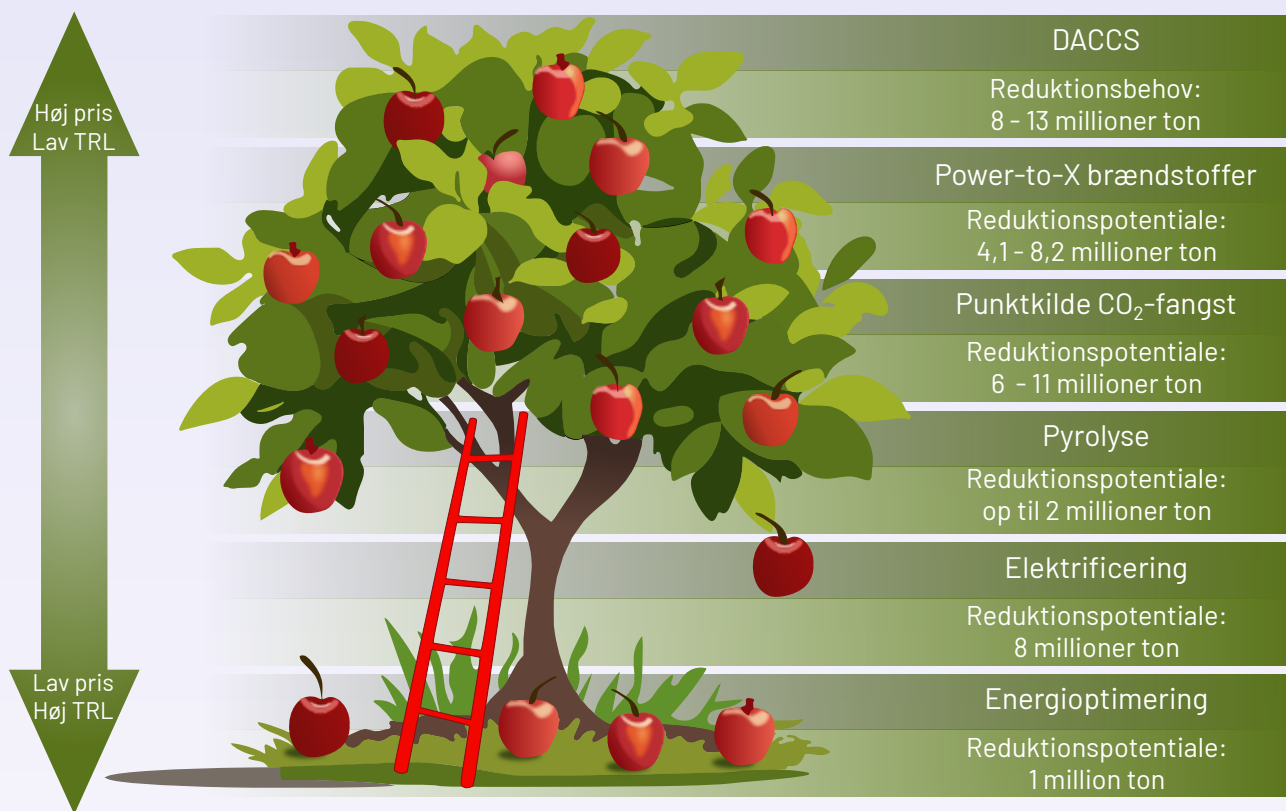
En af fordelene ved DACCS er, at reduktionspotentiallet i princippet kun er begrænset af tilgængeligheden til vedvarende strømproduktion. Det står i modsætning til andre teknologier, der tilbyder negative emissioner, hvor tilgængeligheden af biomasse er den begrænsende faktor. Derudover drager DACCS fordel af at være uafhængig af en bestemt placering, hvorved anlæg kan placeres tæt på f.eks. lagringssteder eller rørinfrastruktur.

Men DACCS i Danmark er ofte forbundet med en nærmest dogmatisk skepsis i debatten, der bygger på en misforstået præmis for teknologiernes berettigelse.

Så lad os slå fast:

- ❧ DACCS skal ikke være en sovepude for den eksisterende brug af fossile brændsler!
- ❧ DACCS er ikke i konkurrence med CO₂-fangst fra punktkilder, som f.eks. affaldsforbrænding og cementproduktion, hvor man langt mere effektivt kan fjerne CO₂ fra igangværende udledning.
- ❧ DACCS skal ses som et supplement til metoder, der reducerer vores emissioner – ikke som en erstatning.

Implementeringen af DACCS-teknologier er ikke nogen lavt-hængende frugt i forhold til at opnå klimaneutralitet. Der er flere metoder, som er mere realiserbare i den nærmeste fremtid, som det er illustreret i Figur 2.



Figur 2: Forskellige teknologiers potentiale for reducere af klimagasser rangeret efter technology readiness level (TRL) og pris.^{2,3}

Der hvor DACCS kommer til at spille en afgørende rolle i fremtiden er, når vi skal nå helt i mål med at stoppe udledningen af drivhusgasser og begynde at indhente fortidens udledninger. Det skyldes, at DACCS er en af de få metoder, vi har, der direkte kan bidrage negativt til CO₂-regnskabet – og dermed kan gøre noget ved de historiske emissioner samt de restemissioner, som i en realistisk fremtid er uundgåelige.

Restemissioner

Restemissioner refererer til den mængde drivhusgasser med negativ klimapåvirkning, hvor selve udledningen ikke kan reduceres, og derfor skal fjernes vha. negative emissions-teknologier. Restemissionerne kommer bl.a. fra metan- og lattergasudledninger fra landbruget, biogaslækager, kompostering, spildevand og ikke-energirelaterede udledninger fra industrier som cementproduktion.

Historiske emissioner

Historiske emissioner er den samlede mængde drivhusgasser, der allerede er blevet udledt i atmosfæren siden begyndelsen af industrialiseringen. De ekstra 10 % CO₂, som Danmark vil fjerne hvert år efter 2050, tager udgangspunkt i Danmarks drivhusgasudledninger i 1990. De historiske emissioner er betydelige. De har bidraget til de nuværende niveauer af drivhusgasser i atmosfæren og påvirker allerede klimaet negativt.

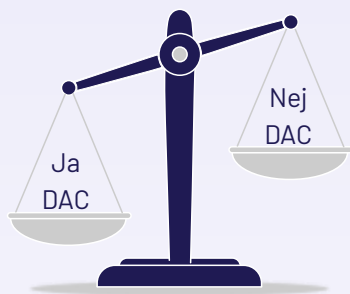
Er der brug for DACCS i Danmark?

Negative udledninger kan i udgangspunktet opnås ved skovrejsning, BECCS (*bio energy with carbon capture and storage*), pyrolyse og DACCS.

Naturen optager CO₂ via fotosyntese og lagrer den som biomasse. Hvis biomassen høstes og benyttes til energiformål, som f.eks. produktion af flydende brændstoffer eller forbrænding til varmeproduktion, kan der være tale om BECCS, hvis den frigivne CO₂ fanges og lagres i undergrunden. Fordelen ved BECCS er, at der er en god business case i at producere energien i første omgang, og at CO₂-udledningen efterfølgende kan fanges i en relativt høj koncentration. BECCS-potentialet begrænses ligesom skovrejsning af den tilgængelige mængde biomasse samt behovet for energi baseret på biomasse.

Pyrolyse er en proces, som binder kulstof fra biomasse i biokul, der kan pløjes ned på markerne og derved fungere som CO₂-lager. Udover biokullet produceres også grøn gas og olie, der kan bruges til energiformål og bidrage positivt til den økonomiske rentabilitet. Potentialet for biokul afhænger bl.a. af tilgængeligheden af biomasseressourcer.

Beplantning af skov, BECCS og pyrolyse er alle metoder, der gør brug af biomasse, som er en begrænset ressource. Selvom BECCS og pyrolyse har væsentlige teknologiske og økonomiske fordele, der placerer teknologierne som mere lavthængende frugter end DACCS, så afhænger disse teknologier i stort omfang af import af biomasse. Ifølge Klimarådet er Danmarks forbrug af biomasse allerede højere, end hvad der er klimamæssigt velbegrunder og langsigtet bæredygtigt, hvis vi skal realisere 110 %-målsætningen uden brug af DACCS.²



Implementering af DACCS synes uundgåelig, hvis vi skal i mål med 110 %-målsætningen og samtidig undgå overforbrug af vores biomasseressourcer. Derfor er det essentielt, at de lettilgængelige negative emissioner udelukkende benyttes til at kompensere for restemissioner.

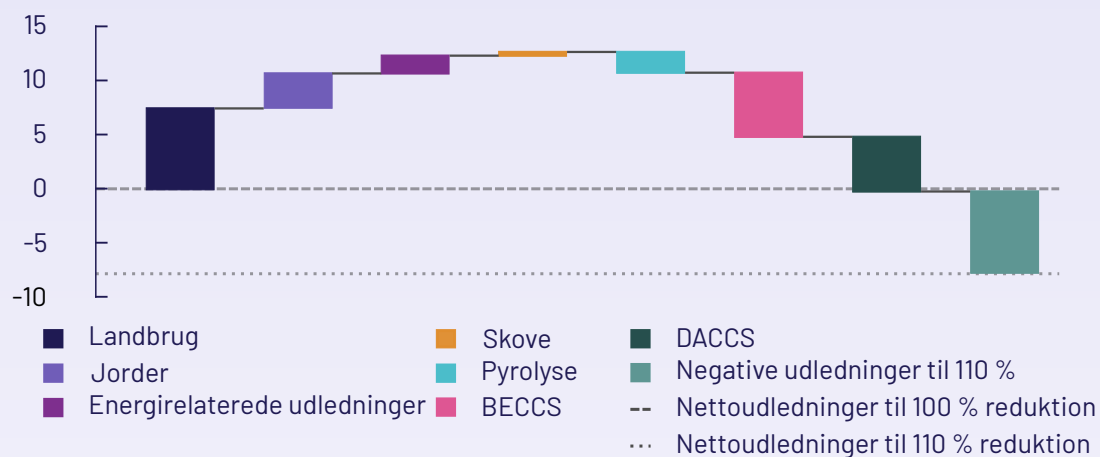
Derfor bør der laves en national kulstofstrategi, som sikrer, at vi undgår utilsigtet forbrug af biomassen.

Hvor meget DACCS er der brug for i Danmark?

Vejen til realiseringen af 110 %-målsætningen afhænger i høj grad af, hvordan samfundet som helhed, især landbruget, omstiller sig og reducerer udledningerne. Klimarådet har tidligere opstillet en række mulige scenarier for 2050, der illustrerer behovet for negative udledninger på baggrund af restemissionerne samt de historiske emissioner. I Figur 3 illustreres det mindst optimistiske scenarie, hvor landbruget og jorder stadigvæk udleder store mængder CO₂ og i mindre udstrækning energirelaterede udledninger samt et netto positivt bidrag fra skove.²

I scenariet præsenteres et årligt DACCS-behov på 5 Mton for at opnå netto-nul udledninger. Derudover skal 8 Mton levere de 10 % negative emissioner i forhold til niveauet i 1990 for at opnå 110 %-målsætningen. Disse 8 Mton er der på nuværende tidspunkt ikke fremlagt en plan for, hvordan skal realiseres. Desuden undersøges et scenarie, hvor DACCS samlet set kun skal dække de 8 Mton CO₂, der skal til for at opnå 110 %-målsætningen. Men hvordan ser landskabet og energiregnskabet ud for Danmark, hvis vi skal installere mellem 8 og 13 Mton DACCS-anlæg?

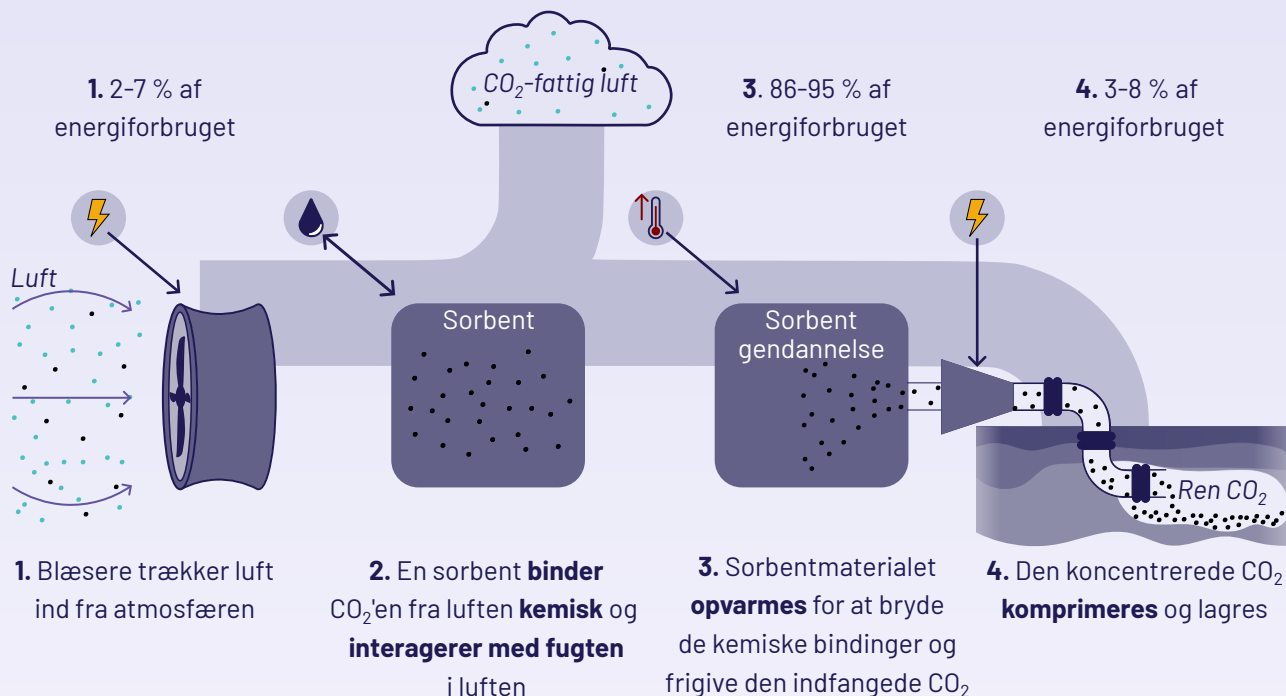
Anslåede mio. ton CO₂-ækvivalente drivhusgasudledninger i Danmark i 2050



Figur 3: Sektoropdelt CO₂-ækvivalente drivhusgasudledninger i "Bio og CCS" scenariet i 2050. Danmarks bidrag til udledning ifm. international skibs- og luftfart er ikke inkluderet i figuren.²

DACCS-teknologierne i dag

De DACCS-teknologier, der udvikles i dag, kan være meget forskellige, men deler alle sammen det overordnede koncept bestående af de af fire procestrin, som er illustreret i Figur 4.



Figur 4: Overordnede DACCS procestrin med anslået fordeling af energiforbrug i processen.

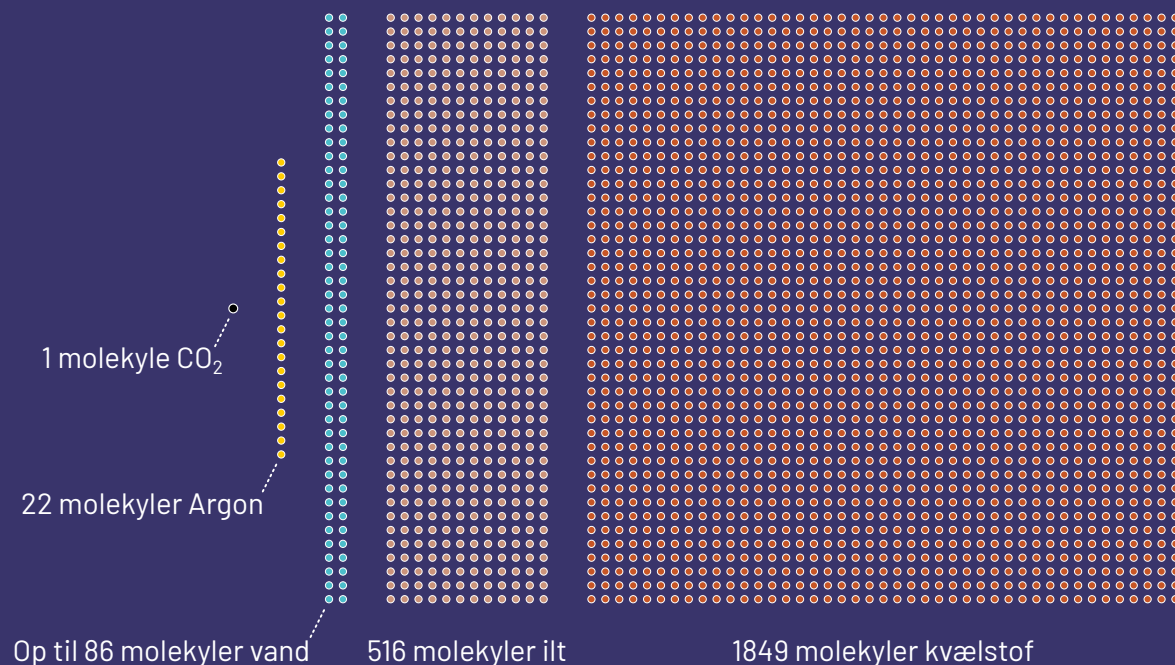
DACCS kræver først og fremmest, at en stor mængde luft kommer i kontakt med den sorbent, der kemisk binder CO₂'en og derved adskiller den fra luften, som sendes tilbage i atmosfæren. Selvom vi snakker om, at der hver dag udledes store mængder CO₂, er koncentrationen i atmosfæren så lille, at det er svært og meget energikrævende at sortere CO₂-molekylerne fra resten af molekylerne i luften. Når sorbenten har bundet CO₂'en, skal sorbenten gendannes, så den kan bruges til at fange mere CO₂. Det er typisk en proces, der kræver meget varme ved høje temperaturer. Hvor høje afhænger af hvilken teknologi og dermed hvilken type sorbent, der bruges. Den frigivne CO₂ komprimeres og kan derefter lagres, f.eks. i undergrunden.

Hvad er luft?

Luft består primært af kvælstof og ilt, som illustreret i Figur 5. Faktisk udgør CO_2 kun 420 ppm (milliontedele) eller 0,8 g pr. kubikmeter luft. Med andre ord skal der altså flyttes mindst 1,25 millioner kubikmeter luft for at indfange bare ét ton CO_2 ! Derfor ligner DAC-anlæg kæmpestore blæsere.

En anden vigtig faktor er vandindholdet i luften. På en gennemsnitlig sommerdag i Danmark, som figuren nedenfor illustrerer, indeholder luften hele 86 gange så meget vand, som CO_2 . Uanset hvilken DAC-teknologi, der implementeres, vil det varierende vandindhold i luften være i dynamisk udveksling med DAC-anlægget og forårsage enten et netto-optag eller tab af vand i processen.

Figur 5: For at finde bare ét CO_2 -molekyle: ○ skal den følgende mængde af andre molekyler bearbejdes:



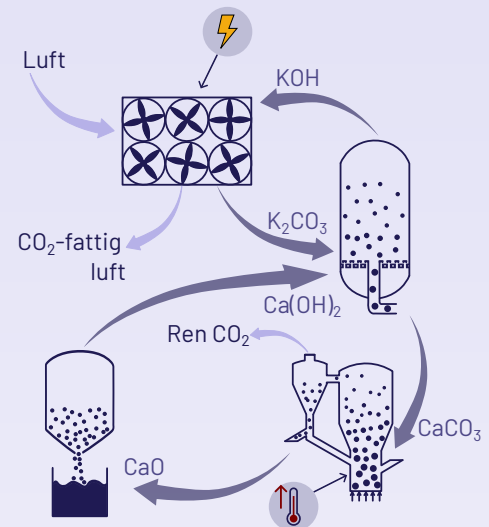
De førende DAC-teknologier

I dag er to firmaer førende i at udvikle DAC-teknologier: schweiziske Climeworks og canadiske Carbon Engineering. I Tabel 1 fremgår nogle nøgleinformationer om deres to teknologier tilpasset en dansk kontekst.

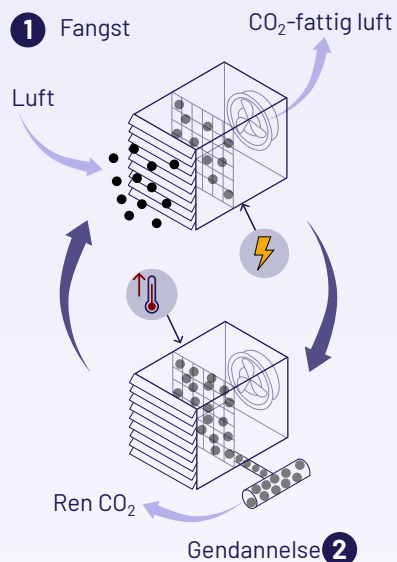
Tabel 1: Nøgletal for de to mest fremskredne DAC-teknologier. Tallene er baseret på modellering af systemerne under danske vejrforhold af forfatterne til dette white paper og er ikke verificeret af firmaerne bag teknologierne.

	Climeworks (LTDAC)	Carbon Engineering (HTDAC)
Oprindelsessted	Schweiz	Canada
Projekter	15 i Europa	Pilotskala i Canada, demonstration på vej i Texas
Fangstmetode	Solid adsorption	Flydende absorption
Fangstkapacitet	Modulær, cyklisk enhed ~50 ton _{CO2} /år per enhed	Kontinuert storskala enhed, ~0,5-1 Mton _{CO2} /år
Varmekilde	Elektrisk opvarmning/ varmepumper	Naturgas med CCS/ elektrisk opvarmning
Procestemperatur [°C]	80 – 130 ⁴	800 – 900 ⁴
Energiforbrug [GJ/ton _{CO2}]	3,8 – 9,5	5,5 – 8,8
Netto vandforbrug [ton _{H2O} /ton _{CO2}]	-2 – 0	0,6 – 2,3
Anslået direkte arealforbrug [m²/ton _{CO2} /h]	~10500 ⁵	~3500 ⁵
Samlet fangstomkostning [DKK/ton _{CO2}]	2000 – 4000 ⁶	1600 – 3800 ⁶

De to processer, udviklet af hhv. Climeworks og Carbon Engineering, er kemisk- og procesteknisk meget forskellige. Carbon Engineerings teknologi, *højtemperaturs-DAC* (HTDAC), se Figur 6, har den fordel, at den primært bygger på kendte teknologier (køletårne og kalcinering), som allerede er bevist virker i stor skala. Det er med til at gøre omkostningerne forudsigelige. Ulempen ved teknologien er, at energiforbruget til frigivelse af CO_2 er meget højt. Det skyldes, at der skal en stor mængde energi til, for at bryde den kemiske binding. Det kræver samtidig en høj temperatur på $800 - 900^\circ\text{C}$.⁴ Derfor er det oplagt at fokusere forskningen på at finde en sorbent, der er mindre energikrævende at gendanne, og som kan gendannes ved lavere temperatur.



Figur 6: Konceptualisering af HTDAC.⁴

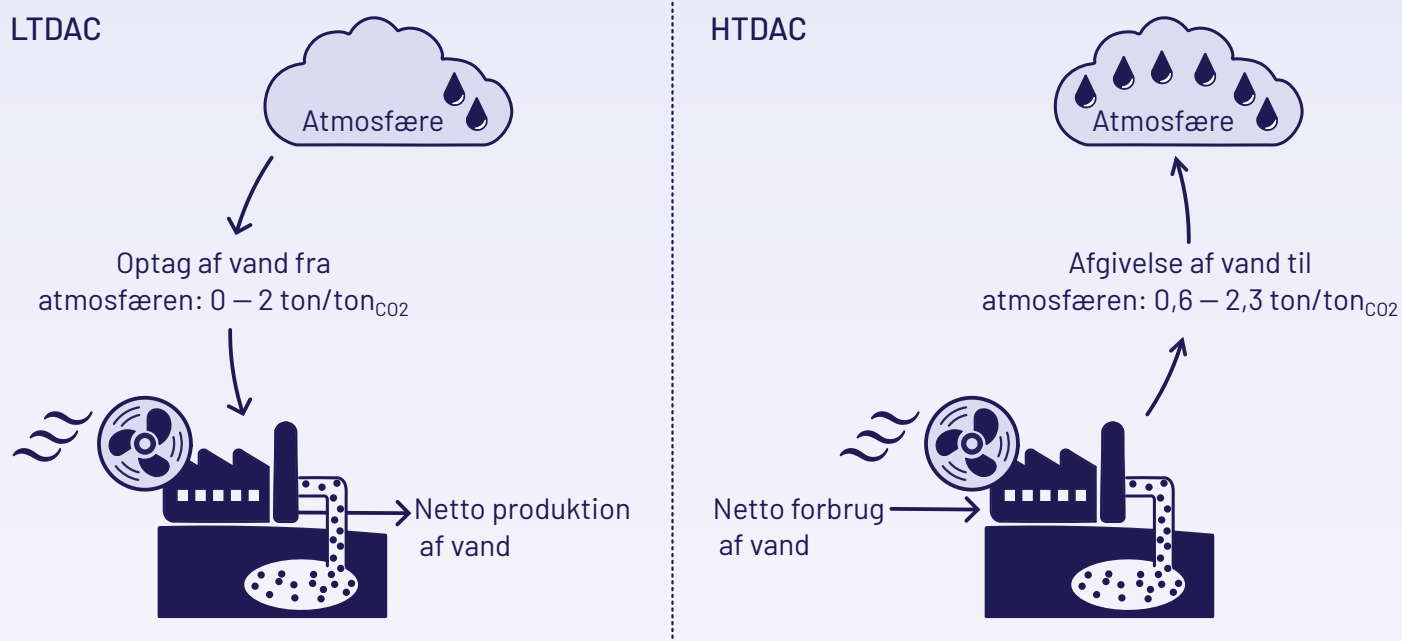


Figur 7: Konceptualisering af LTDAC.⁴

Climeworks' teknologi, *lavtemperaturs-DAC* (LTDAC), Figur 7, har ikke samme problem med den høje temperatur, da frigivelsestemperaturen typisk er opgivet til mellem 80 og 130°C .⁴ Der arbejdes særligt på at finde materialer, der tillader en temperatur i den lavere ende af intervallet. Ved at komme ned i temperatur kan der potentielt udnyttes overskudsvarme fra industrien til at drive opvarmningen. Derudover foreslås varmepumper ofte som varmekilde, da disse er særligt energieffektive. Dog skal det i denne sammenhæng også noteres, at højtemperatursvarmepumper i den størrelsesorden, som det vil kræve, endnu ikke kan betragtes som en moden teknologi. Ligeledes er Climeworks' teknologi endnu ikke set i stor skala, og der hersker en del tvivl omkring energiforbruget, og især hvor hurtigt processen forløber. Alt sammen bidrager til at gøre de økonomiske estimater usikre.

Vandforbrug i DACCS-anlæg i Danmark

Luftens fugtighed spiller en stor rolle i forhold til vandbalancen for DACCS-processerne. Processer, som gør brug af en vandig absorbent til fangst af CO_2 , risikerer fordamping af vand til atmosfæren. Derfor er disse processer i litteraturen typisk opgivet til at have et stort tab af vand på mellem fire og fem ton pr. ton CO_2 , der indfanges.⁴ Dette skal dog ses i lyset af, at vejrforholdene har en betydelig indflydelse på hvor meget vand, der fordamper fra processen. Under danske vejrforhold vil behovet for vand svinge mellem 0,6 og 2,3 ton/ton $_{\text{CO}_2}$ afhængigt af sæsonen, som illustreret i Figur 8.



Figur 8: Vandbalance i LTDAC og HTDAC.

Processer, der benytter faste sorbenter, står over for en helt anden udfordring. Det adsorbentmateriale, der bruges til at fange CO₂'en, vil samtidig også fange noget af det vand, der er til stede i luften. Det gør processen væsentligt mere energitung, fordi der bruges en hel del energi på også at frigive vandet. For at kunne lagre CO₂'en skal vandet efterfølgende udkondenseres, hvorved processen samlet set bliver vandproducerende. Under danske vejrforhold vil processen gennemsnitligt producere omkring 1,5 ton vand per ton fanget CO₂. Produktionen af vand kan anses som en ekstra bonus ved teknologien.

En DACCS-proces, der har en nettoproduktion af vand, er interessant af flere grunde. For det første bidrager vandproduktionen til bæredygtigheden af processen, idet den ikke er afhængig af adgang til en ferskvandskilde. Derudover fremhæver det et potentiale for at kunne kobles med power-to-X teknologier, hvor rent vand er et nødvendigt input til elektrolyseprocessen ved produktionen af grøn brint. Ser vi f.eks. på produktionen af grøn metanol, skal der bruges 1,2 ton vand per ton CO₂, som konverteres til metanol. Det vil sige, at Climeworks' teknologi i en dansk kontekst kan være med til at gøre metanolproduktionen selvforsynende med både vand og CO₂.

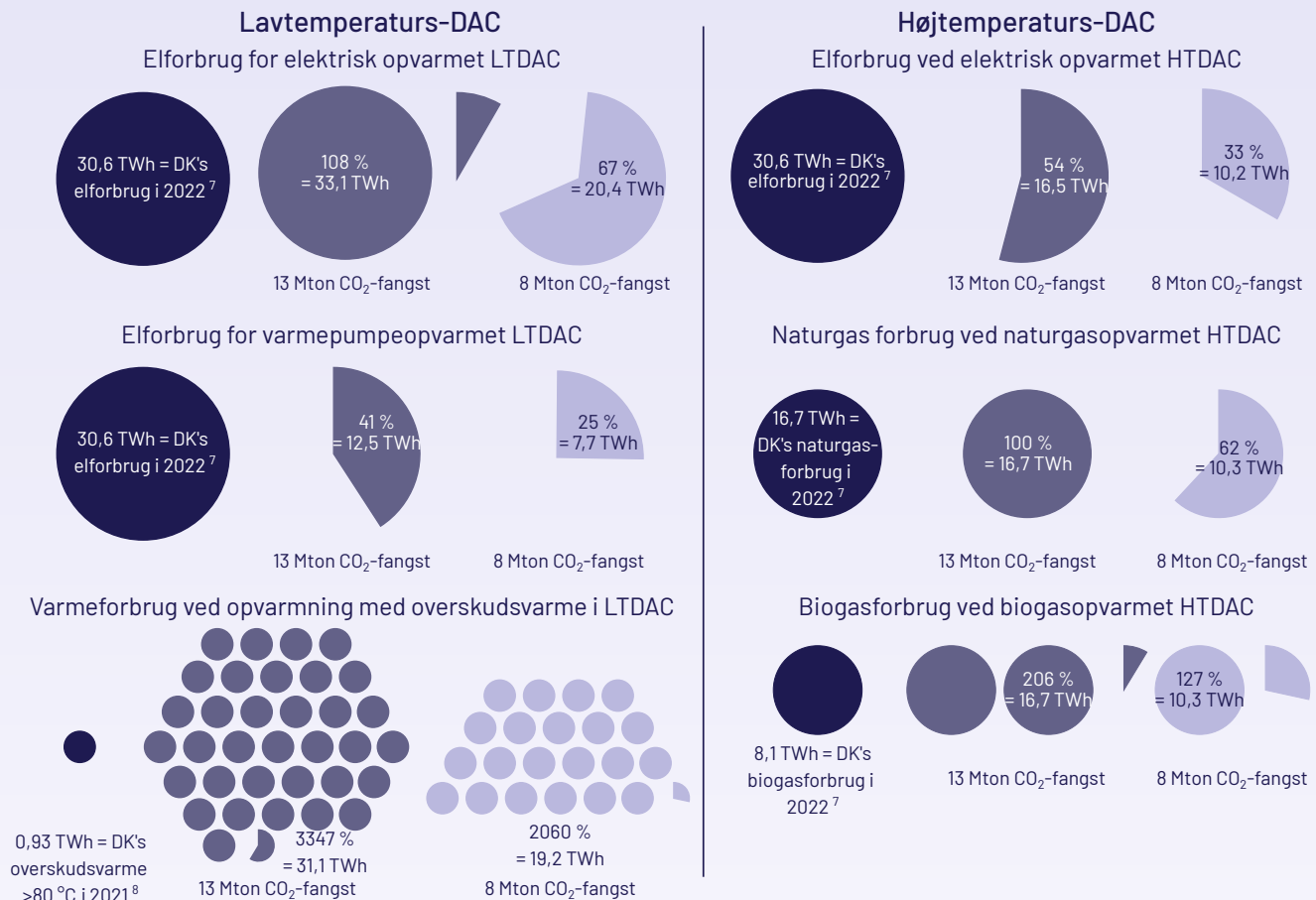
DACCS i det danske energisystem

Fangst af 8-13 Mton CO₂ via DACCS kræver et stort energiforbrug, som primært skyldes opvarmning til frigivelse af CO₂. Den store forskel i procestemperatur mellem LTDAC og HTDAC er bestemmende for, hvilke energikilder der realistisk set kan udnyttes til driften af de to teknologier. Til LTDAC kan varmen enten forsynes rent elektrisk, elektrisk via en varmepumpe eller via f.eks. overskudsvarme fra industrielle processer. HTDAC kræver så høj en temperatur, at mulighederne for at dække varmebehovet traditionelt set er foreslået dækket via forbrænding af enten naturgas eller biogas.⁴ Dog indikerer den seneste forskning, at elektrisk opvarmning også kan blive en realitet. På Figur 9 ses hvor stor en andel fangsten af hhv. 8 og 13 Mton CO₂ ville beslaglægge af det nuværende forbrug af henholdsvis elektricitet, overskudsvarme, natur- eller biogas for de to typer DACCS.

Det fremgår af figuren, at hvis varmebehovet for LTDAC skal dækkes via elektricitet, så er udviklingen af en højtemperatursvarmepumpe essentiel, da elforbruget kan reduceres med mere end 50 % i forhold til ren elektrisk opvarmning. Det ses også, at industriel overskudsvarme er urealistisk som primær energikilde, da den tilgængelige varme er væsentlig lavere end behovet. Selvom fremtidige power-to-X anlæg kan øge mængden af overskudsvarme, er det ikke realistisk, at en betydelig del af DACCS' behov kan dækkes af dette.

Ser vi i stedet på perspektiverne i HTDAC vil fangsten af 8-13 Mton CO₂ beslaglægge mellem 33 og 54 % af det nuværende elforbrug. Dermed er elforbruget til HTDAC en lille smule højere end det anslåede forbrug til LTDAC med varmepumper. Skal varmen i stedet leveres via forbrænding af gas, kræves over 100 % af det nuværende danske forbrug af biogas eller størstedelen af naturgasforbruget. Det kan diskuteres hvor realistisk og hensigtsmæssigt, det ville være at bruge de knappe og værdifulde natur- og biogasressourcer på denne måde.

Den danske produktion af naturgas forventes nedtrappet i fremtiden grundet et politisk ønske om at udfase brugen af naturgas. Biogasproduktionen forventes derimod at stige. Langt størstedelen af denne gas vil formentlig blive brugt til højtemperatursprocesser i industrien, da biogas er en af de få bæredygtige energikilder, der kan levere høje temperaturer gennem forbrænding.



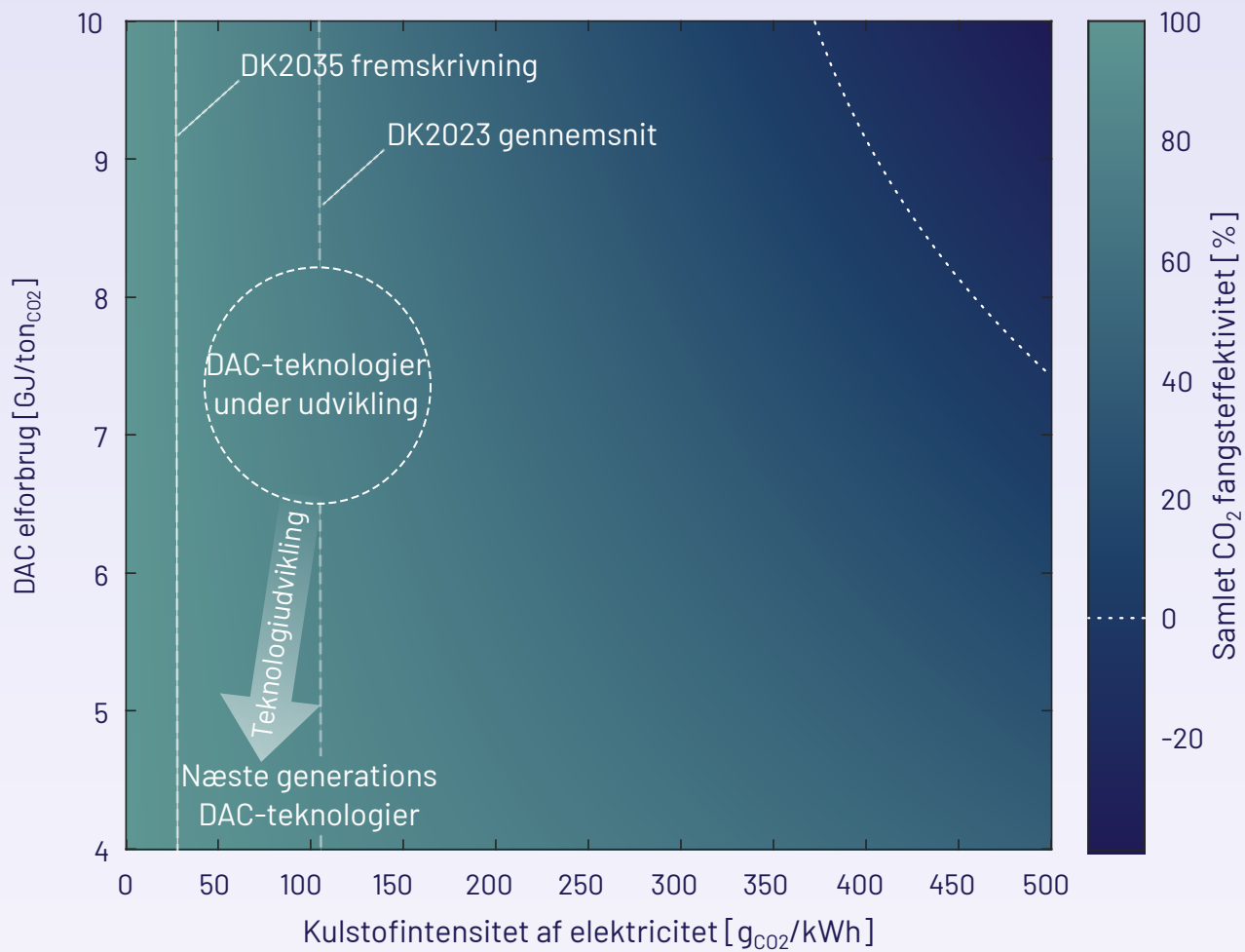
Figur 9: Forhold mellem den nuværende produktion af hhv. elektricitet, natur- og biogas og forbruget til DACCS via fangst af hhv. 8 og 13 Mton CO₂ årligt.^{7,8}

DACCS i fremtidens energisystem

For at sikre en succesfuld implementering af DACCS-teknologier i Danmark, er det essentielt at indpasse teknologien, så den ikke giver anledning til øgede indirekte emissioner af CO_2 , og så den ikke bliver en byrde for fremtidens fleksible energisystem. Danmarks elektricitet er sammensat af forskellige energikilder hen over året. Disse er primært vind og sol samt el fra naturgas-, biomasse-, olie- og kulkraftvarmeværker. Samlet set var Danmarks gennemsnitlige kulstofintensitet i 2023 på $103 \text{ g}_{\text{CO}_2}/\text{kWh}$.⁹ Der kan dog være signifikante udsving, idet der også var timer med en kulstofintensitet på ned til $11 \text{ g}_{\text{CO}_2}/\text{kWh}$, men også ganske få timer på helt op til $470 \text{ g}_{\text{CO}_2}/\text{kWh}$.

Fordi der indirekte udledes lidt CO_2 , når der benyttes strøm til DACCS, bliver den effektive fangst af CO_2 mindre end den mængde, der suges ud af atmosfæren. Den samlede fangsteffektivitet af CO_2 er dermed forholdet mellem hvor meget CO_2 , der netto fanges og hvor meget, der fanges brutto i DACCS. Dette mål er meget afgørende for, hvor stor en klimagevinst DACCS kan levere.

I Figur 10, er den samlede CO_2 fangsteffektivitet afbilledet som funktion af elforbruget fra DACCS og elektricitetens kulstofintensiteten. Figuren indikerer, at med den gennemsnitlige kulstofintensitet i Danmark i 2023, ville den samlede fangsteffektivitet, selv med et elforbrug på $10 \text{ GJ}/\text{ton}_{\text{CO}_2}$, være større end 70 %. Derudover illustreres vigtigheden af en grøn elproduktion, da der er nogle ganske få timer om året med så høj kulstofintensitet, at der med de nuværende DACCS-teknologiers elforbrug vil være en netto udledning af CO_2 ved at drive anlægget, hvis DAC-anlægget drives af elektrisk opvarmning.

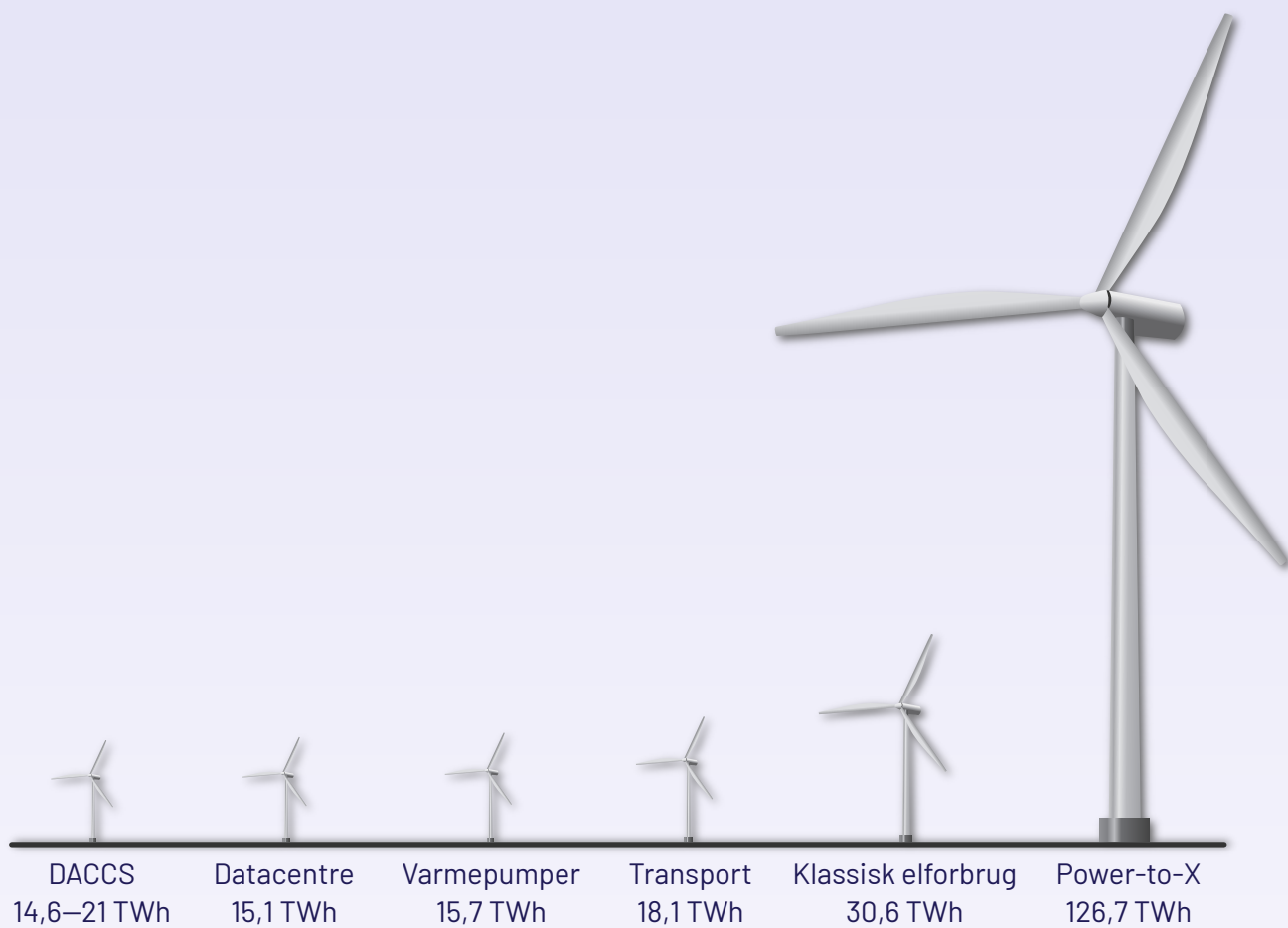


Figur 10: Samlet fangsteffektivitet af CO₂ som funktion af elforbruget til DACCS og kulstofintensiteten af elektriciteten fra elnettet.

Når DACCS i fremtiden skal implementeres i Danmark, er det i et energisystem, der både håndterer elkrævende datacentre, varmepumper, transport og power-to-X anlæg foruden det klassiske elforbrug, som vi kender i dag. Figur 11 viser det anslåede danske elektricitetsforbrug i år 2050 illustreret efter disse kategorier. På figuren ses ligeledes et estimat af elforbruget til DACCS for at fange 8–13 Mton CO₂. Særligt interessant er forholdet mellem det fremskrevne forbrug til power-to-X og DACCS, hvor det ses, at fangsten af 8–13 Mton CO₂ kun udgør omkring 14 % af forbruget til power-to-X. Samtidig er elforbruget til DACCS i samme størrelsesorden som til f.eks. datacentre.

Derfor er det vigtigt, at vi stiller os selv spørgsmålet: "Hvordan skal den grønne strøm prioriteres?"

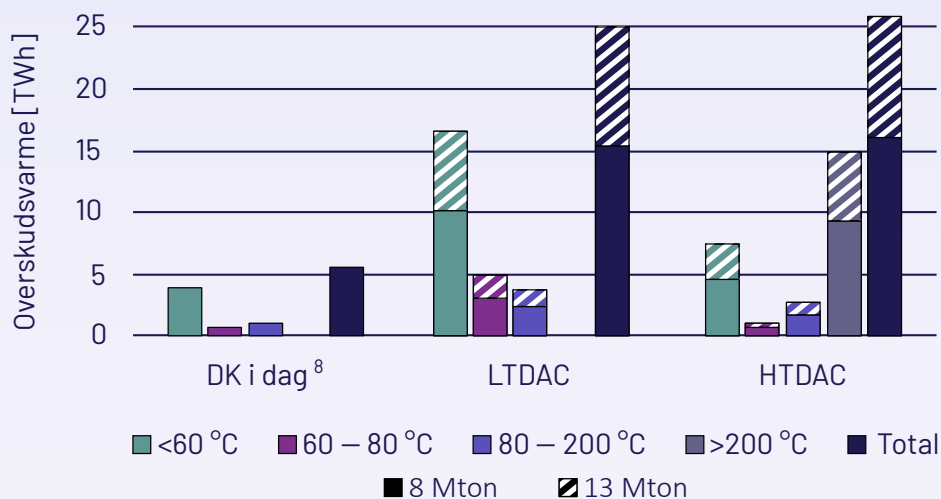
Kunne det f.eks. være mere attraktivt at prioritere en større klimaeffekt ved at fjerne 1 Mton CO₂ og samtidig producere noget høj-kvalitetsoverskudsvarme frem for at installere ekstra computerkraft med lav-kvalitetsoverskudsvarme? Eller kunne det være mere attraktivt for et affaldsforbrændingsanlæg at drive et DAC-anlæg med deres elproduktion og tjene penge på negative emissioner i stedet for at sælge elektricitet til nettet i en fremtid, hvor elprisen forventes at være meget lav på grund af den vedvarende energi?



Figur 11: Danmarks forventede elforbrug i 2050 opdelt efter kategorier. DACCS er ebaseret på 8 – 13 Mton CO₂-fangst.¹⁰

Overskud af procesvarme fra DACCS

Både LTDAC og HTDAC har et stort energibehov og skaber et stort varmeoverskud fra processerne. Det skyldes primært, at der i begge processer indgår både afkøling af produktgassen samt kondensering af vand. På Figur 12 er Danmarks ikke-udnyttede overskudsvarme i 2021 illustreret i forskellige temperaturintervaller. Derudover er det samlede varmeoverskud (efter intern procesintegration) for LTDAC og HTDAC inkluderet for fangst af både 8 og 13 Mton CO₂. Figuren viser ved begge teknologier et behov for køling, der er så omfattende, at en udnyttelse af denne overskudsvarme er essentiel for teknologiens bæredygtighed. Derfor anbefaler vi, at DACCS-teknologier udvikles med en plan for, hvordan overskudsvarmen afsættes. Det kan f.eks. imødekommes ved at integrere DACCS med andre teknologier som power-to-X eller andre industrielle processer.



Figur 12: Ikke-udnyttet overskudsvarme i Danmark i dag⁸ vs. varmeoverskuddet for LT- og HTDAC for fangst af 8 og 13 Mton CO₂ angivet med hhv. solid og skraveret udfyldning.

For LTDAC er den største del af overskudsvarmen ved temperaturer lavere end 60 °C. For at kunne udnytte denne lave temperatur, til f.eks. fjernvarme, er det nødvendigt med kommercialisering af effektive højtemperatursvarmepumper, der kan hæve temperaturen. I et fremtidigt scenarie, hvor temperaturen på overskudsvarmen effektivt kan øges til procestemperaturen, vil omkring 50 % af den energi, der kræves til frigivelse af CO₂'en, kunne dækkes direkte af overskudsvarmen.

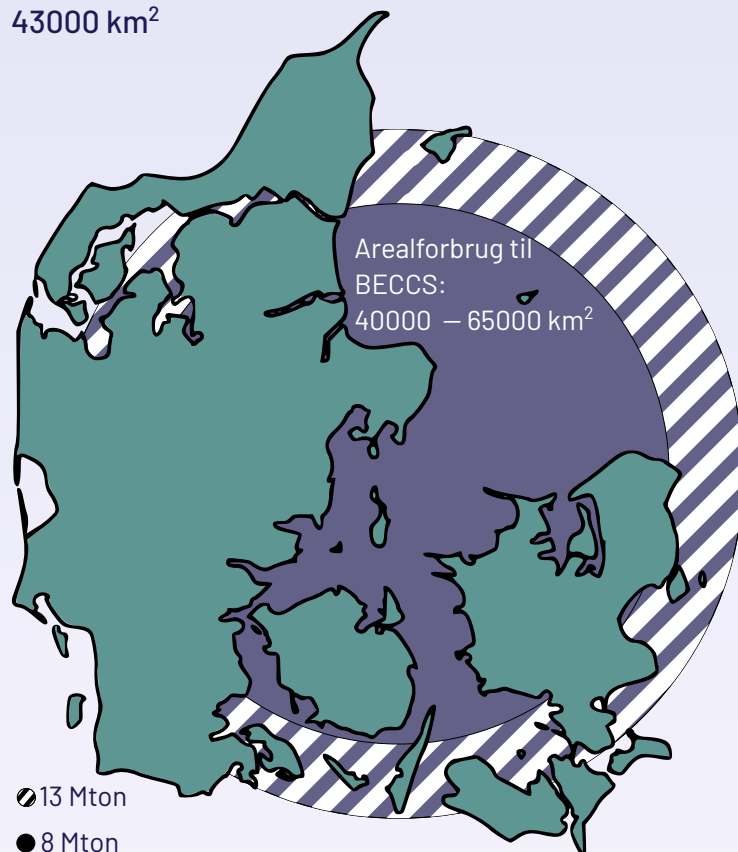
For HTDAC kan størstedelen af overskudsvarmen derimod udnyttes ved en væsentlig højere temperatur. Dette gør overskudsvarmen mere attraktiv og nemmere at afsætte til andre formål. Dog er det vigtigt at have for øje, at udnyttelse af denne høje temperatur sætter krav til placeringen af anlægget, da lange transportafstande vil resultere i markante varmetab.

DACCS' aftryk i det danske landskab

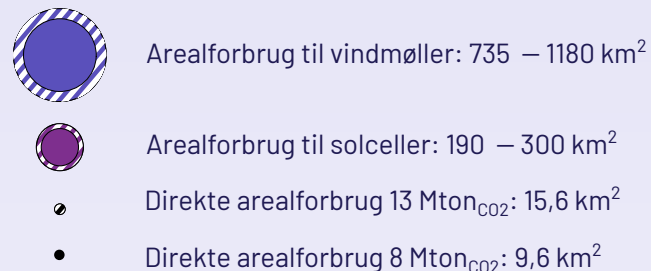
Med implementeringen af DACCS i Danmark opstår et nærliggende spørgsmål: *Hvor meget fylder det?* Vi har efterhånden opnået en del erfaring med f.eks. opsætning af vindmøller, og vi ved, at der er stor modstand mod store tekniske anlæg i landskabet. På Figur 13 illustreres arealforbruget til forskellige metoder til negative udledninger i forhold til størrelsen af Danmark. Det direkte arealforbrug til fangst af hhv. 8 og 13 Mton CO₂ via DACCS udgør kun en meget lille del af det samlede landskab. Til gengæld kan arealforbruget til vedvarende energikilder optage et relativt stort areal afhængigt af, om den foretrukne energikilde er baseret på vind eller sol. Det er dog værd at bemærke, at hvis CO₂-fangsten er baseret på BECCS, kræves et areal større end hele Danmark for at fange 13 Mton om året i 2050.¹¹

Selvom aftrykket fra DACCS i det danske landskab vil være betydeligt mindre end for alternativet BECCS, kræves stadigvæk et direkte arealforbrug, der er 2–10 gange større end Sprogø, afhængigt af DACCS-teknologien, samt hvor meget CO₂, der skal indfanges. En af fordelene ved DACCS i denne sammenhæng er, at anlæggenes placering er meget fleksible. Nogle af de mest hensigtsmæssige placeringer for anlæggene inkluderer industrielle områder, hvor udveksling af overskudsvarme kan finde sted uden lange transportafstande. Især samplacering af power-to-X-anlæg og DAC er interessant, da disse kan udveksle energi og vand foruden kulstof. En anden oplagt lokation for DACCS-anlæg er i forbindelse med CO₂-transmissionsnettet samt de steder, hvor CO₂'en skal pumpes ned i undergrunden til lagring. Det vil både minimere transportomkostningerne og muliggøre placering af anlæg ved siden af eksisterende tekniske områder.

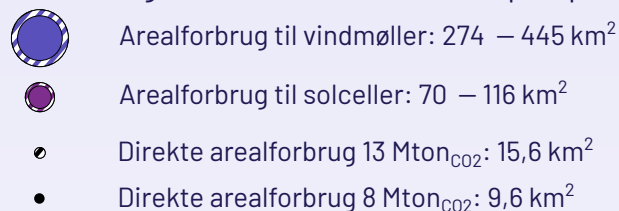
Danmark som størrelsesforhold
43000 km²



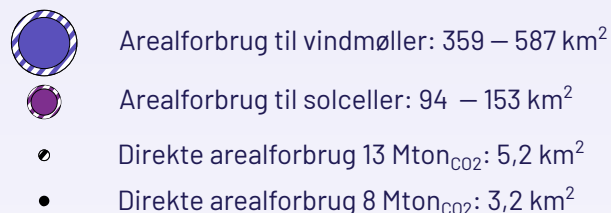
Arealforbrug til LTDAC drevet af elopvarmning



Arealforbrug til LTDAC drevet af varmepumper



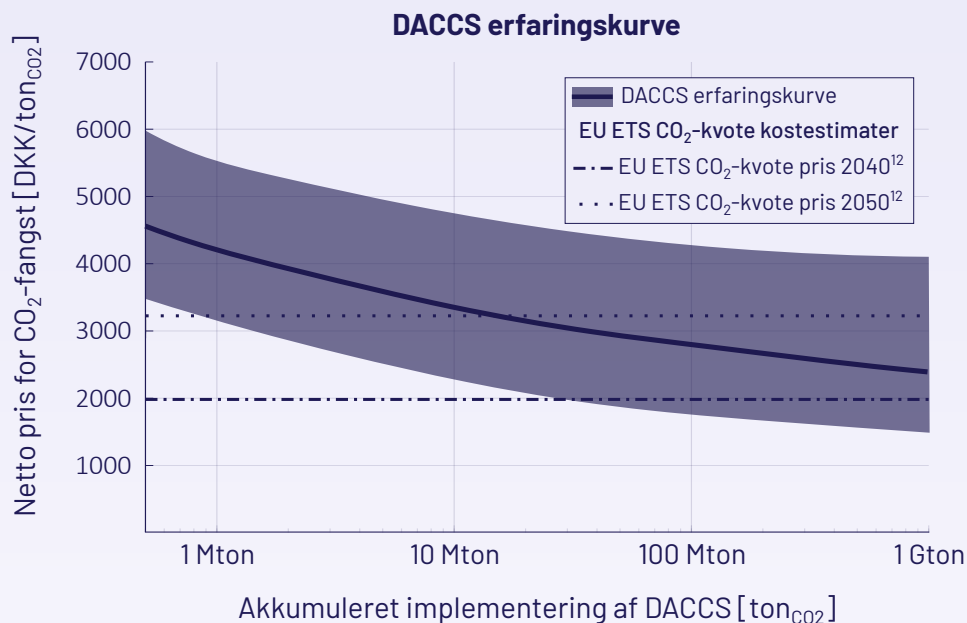
Arealforbrug til HTDAC drevet af elopvarmning



Figur 13: Arealforbrug til forskellige DACCS-teknologier inkl. vedvarende energikilder baseret på el-baseret opvarmning i forhold til Danmarks samlede areal.⁵ Derudover er arealkravet til BECCS afbilledet baseret på, at en tilsvarende mængde CO₂ skal fanges.¹¹

Økonomiske betragtninger

I både industrielle og akademiske kredse er der stor debat om, hvor meget DACCS koster, og ikke mindst hvor meget det kommer til at koste i fremtiden. Når økonomien diskuteres, er det vigtigt at være enige om, hvad prisen består af. I dette white paper inkluderer prisen for DACCS både etablering og drift af selve fangstteknologien, komprimering og CO₂-transport samt lagring. Igennem flere år har der været en opfattelse af, at det ultimative mål for DACCS er at nå en pris på 100 USD/ton_{CO2}, svarende til knap 700 danske kroner – og at det er realistisk. Dette har ofte fordret optimistiske og sandsynligvis urealistiske kostestimer i litteraturen. Et nyt studie fra ETH i Zürich viser et mere realistisk bud på, hvad DACCS-prisen kan reduceres til, når teknologierne er implementeret i stor skala.⁶ En sammenfatning af resultaterne fra studiet ses i Figur 14.



Figur 14: Økonomisk estimat for DACCS baseret på erfaringskurver skaleret op til fangst af 1 Gton CO₂.⁶

Det anslås, at omkostningerne for DACCS, når teknologierne fanger 1 Gton CO₂, kan reduceres til 2600 og 2400 DKK/ton_{CO2} for hhv. LTDAC og HTDAC, dog med en relativt bred fejlmargen.

Selvom ingen af teknologierne umiddelbart når ned på en fangstpris, der matcher målsætningen om de 700 DKK/ton_{CO2} (100 USD/ton_{CO2}), viser fremskrivningen, at begge teknologier er konkurrencedygtige i sammenligning med kostestimer for CO₂-kvoter i 2050 estimeret i et studie lavet på Potsdam Institute for Climate Impact Research.¹² Derudover er kostestimerne i samme størrelsesorden som støtteniveauet i NECCS-puljen, som er på 1000 – 2600 DKK/ton_{CO2}.¹³

Økonomiske co-benefits

Når DACCS skal tænkes ind i det danske energisystem, er det essentielt, at teknologien understøtter et energisystem, der er drevet af en fluktuerende elproduktion. I en dansk kontekst betyder det, at DAC-teknologier bør drives primært af strøm. I denne sammenhæng bør det undersøges, om DACCS-anlæg kan tilbyde regulerkraft til elnettet. Regulerkraft tilbydes for at skabe balance i et elnet, hvor udbud og efterspørgsel på elektriciteten ikke automatisk matcher, fordi elproduktionen skifter afhængigt af, om vinden blæser, og om solen skinner. Fordelen ved at kunne tilbyde regulerkraft er, at man foruden et bidrag til et overordnet mere pålideligt nationalt elnet kan øge sine indtægter via regulerkraftmarkedet.

En anden metode til at forbedre businesscasen for DACCS på kort sigt er at fokusere udviklingen på *direct air carbon capture and utilization* (DACCU). Ved at integrere DAC med en proces hvor CO₂ kan udnyttes til andre formål, vil udviklingen af selve fangstteknologien formodentlig også modnes. På nuværende tidspunkt er det essentielt at vise DAC i demonstrationsskala. Derved opnås teknisk erfaring, og investeringstilliden styrkes. Fordi kulstof er en endelig ressource, er det på lang sigt tilmed usandsynligt at realisere de danske power-to-X målsætninger uden forbrug af kulstof fanget vha. DAC.¹⁴

Det er vigtigt at understrege, at DACCU ikke leverer negative emissioner ligesom DACCS. Derfor skal anbefalingen om systemintegrationen med udnyttelsesprocesser udelukkende ses i lyset af en formodning om en øget investeringsvillighed, der kan gavne udviklingen af DACCS-teknologierne. Generelt anbefaler vi at fortsætte udviklingen af DACCS-teknologier, som kan indgå i symbiose med andre processer, der foruden kulstof fokuserer på udveksling af f.eks. varme eller vand.

Effektiv anvendelse af støtteordninger til negative emissioner

Støtteordninger er nødvendige for at fremme de teknologier og initiativer, der kan reducere CO₂-udledninger og sikre en bæredygtig fremtid. For eksempel har Danmarks støtteordninger tidligere haft stor succes inden for vindenergi. Gennem målrettede subsidier og politisk støtte har vi udviklet en stærk vindenergisektor, hvilket har ført til betydelige reduktioner i CO₂-udledningerne og skabt den globale førerposition inden for vindteknologi. For at sikre effektiv anvendelse af støtteordninger til negative emissioner, bør prioriteten være initiativer, der garanterer langtidslagring af CO₂ med minimal risiko for lækage.

Det er også vigtigt, at støtte gives til projekter, som ikke ville blive gennemført uden finansiering fra kulstofcertifikater, og som sikrer additionalitet. Det vil sige, at projekterne medfører reelle og nye reduktioner i CO₂-udledningerne, der ikke ville være sket uden denne støtte. For at fremme DACCS bør der indføres incitamentsstrukturer, der støtter disse teknologier. Herunder bør der oprettes en specifik tilskudspulje til udvikling og demonstration af DAC-teknologierne for at accelerere deres udvikling og implementering.

Anbefalinger

Tabel 2: anbefalinger til forskellige aktører med henblik på at accelerere modningen af DACCS.

Teknologiske anbefalinger 	Regulatoriske anbefalinger 	Markedsanbefalinger 
Demonstration af næstegeneration DAC-teknologier	Udarbejdelse af en national kulstofstrategi	Indføring af incitamentsstrukturer til at fremme DAC
- Udvikling af teknologierne mhp. at reducere energiforbruget - Udvikling af DAC-processer der understøtter et energisystem med fluktuerende elproduktion - Design af DAC-processer med co-benefits som f.eks. produktion af rent vand, fjernvarme eller regulerkraft - Udvikling af processer, der kan systemintegreres med andre teknologier som f.eks. power-to-X	- Udarbejdelse af en samlet national kulstofplan, som sikrer tilsigtet og bæredygtig brug af biomassen - Støtteordninger prioriteres til initiativer, som ikke ville blive udført uden finansiering fra kulstofcertifikater og som sikrer additionalitet - Støtteordninger dirigeres til projekter med langtidslagring og lille risiko for lækage	- Afsættelse af en tilskudspulje specifikt til udvikling af DAC-teknologi, som det var tilfældet med pyrolysepuljen i 2022, til at fremme udvikling og demonstration - Udbydelse af en DAC-pulje i størrelsesordenen med NECCS-puljen i 2023.

Referencer

- 1 Regeringen, 2022, *Ansvar for Danmark - Det politiske grundlag for Danmarks regering*, <https://www.stm.dk/statsministeriet/publikationer/regeringsgrundlag-2022/>
- 2 Klimarådet, 2023, *Statusrapport 2023 - Danmarks nationale klimamål og internationale forpligtelser*, <https://klimaraadet.dk/da/rapport/statusrapport-2023>
- 3 Energistyrelsen, 2021, *Opgørelse af tekniske reduktionspotentialer frem mod 2030*, <https://ens.dk/service/fremskrivninger-analyser-modeller/klimastatus-og-fremskrivning>
- 4 F. Sabatino, A. Grimm, F. Gallucci, M. van Sint Annaland, G. J. Kramer, M. Gazzani, 2021, *A comparative energy and costs assessment and optimization for direct air capture technologies*, Joule, <http://dx.doi.org/10.1016/j.joule.2021.05.023>
- 5 Energistyrelsen, 2024, *Teknologikatalog for kulstoffangst, -transport og -lagring*, <https://ens.dk/service/teknologikataloger/teknologikatalog-kulstoffangst-transport-og-lagring>
- 6 K. Sievert, T. S. Schmidt, B. Steffen, 2024, *Considering technology characteristics to project future costs of direct air capture*, <https://doi.org/10.1016/j.joule.2024.02.005>
- 7 Energistyrelsen, 2023, *Energistatistik 2022*, https://ens.dk/sites/ens.dk/files/Statistik/energistatistik_2022.pdf
- 8 B.V. Mathiesen, H. Lund, S. Nielsen, P. Sorknæs, D. Moreno, J. Z. Thellufsen, 2021, *Varmeplan Danmark 2021 - Baggrundsrapport*, https://vbn.aau.dk/ws/files/449742587/Varmeplan_Danmark_2021_Baggrundsrapport.pdf
- 9 Energinet, 2024, *CO2 Emission*, <https://www.energidataservice.dk/tso-electricity/CO2Emis>
- 10 Energistyrelsen, 2024, *Klimastatus og fremskrivning 2023 (KF23)*, <https://ens.dk/service/fremskrivninger-analyser-modeller/klimastatus-og-fremskrivning>
- 11 Global CCS Institute, 2019, *Bio energy and carbon capture and storage*, https://www.globalccsinstitute.com/wp-content/uploads/2019/03/BECCS-Perspective_FINAL_PDF.pdf
- 12 M. Pahle, S. Quemin, S. Osorio, C. Günther, R. Pietzcker, 2024, *The Emerging Endgame: The EU ETS on the Road Towards Climate Neutrality*, <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4373443>
- 13 Energistyrelsen, 2024, *Tre nye CCS-projekter får tilsagn om støtte til at fange og lagre CO2*, <https://ens.dk/presse/tre-nye-ccs-projekter-faar-tilsagn-om-stoette-til-fange-og-lagre-co2>
- 14 Klima-, Energi-, og Forsyningsministeriet, 2021, *Regeringens strategi for POWER-TO-X*, <https://kefm.dk/Media/637751860733099677/Regeringens%20strategi%20for%20Power-to-X.pdf>

Forskningsaktiviteter på AAU Energi

EUDP projekt: CHOCO₂LATE

CHOCO₂LATE projektet har som endeligt mål at udvikle og demonstrere en komplet proceskæde for fangst af CO₂ fra luften drevet af solcellestrøm til flydende Fischer-Tropsch brændsel. Dette projekt vil fokusere på fangsten af CO₂ fra luften ved at udvikle en innovativ luftskrubber og kalcinerings-teknologi.

Partnere:

AAU Energi

TK Energy

COWI

Aqueous Solutions

Inno-CCUS projekt: eDAC

Projektet vil levere retningslinjer for interessenter på tværs af hele værdikæden, der dækker både teknologiske og samfundsmæssige aspekter ved at vurdere teknologi, økonomi, forretnings-modeller og reguleringsspørgsmål for DAC-implementering i et el-baseret energisystem. Projektet tilsigter, at DAC og DAC-PtX-løsninger udvikles på en måde, der sikrer succesfuld integration og optimal implementering.

Partnere:

AAU Energi

COWI

EuroWind

Port of Aalborg



Fotos: Henrik Bo, Vigeur,
artikel bragt 12/11-2023



AAU ENERGI

AALBORG
UNIVERSITET