

CO₂-fangst fra luften kan bringe os over målstregen i den grønne omstilling

Når jeg kigger ud ad vinduet, ser jeg tegn på forandring. Ekstremt vejr bliver mere almindeligt, og ord som “*tipping points*” dukker op igen og igen – de kritiske grænser, som vi er ubehageligt tæt på at overskride. CO₂ er ikke længere et ord, kun forskere bruger; det er blevet en del af daglig tale. Derfor ser vi også det ene ambitiøse politiske klimamål efter det andet: CO₂-neutralitet, og endda CO₂-negativitet. Men hvordan når vi dertil?

Den offentlige debat om emnet er ofte meget polariseret. På den ene side står dem, der mener, at vi må ændre vores livsstil radikalt: mere natur, mindre landbrug, færre husdyr, ændrede kostvaner og færre flyrejser. På den anden side står dem, der tror på, at nye teknologier kan løse det meste, så vi ikke behøver at ændre særlig meget i vores hverdag.

Virkeligheden ender sandsynligvis et sted midt imellem, men én ting står lysende klart ifølge det danske klimaråd: der vil være nogle *restemissioner*, som vi ikke kan slippe af med. Præcis ligesom vi stadig har restaffald, selvom vi sorterer vores skrald i alle tænkelige fraktioner. Og restemissionerne skal vi altså håndtere. På den ene eller den anden måde. Det er netop dér, min forskning kommer ind i billedet.

CO₂-fangst direkte fra luften – en ny og uprøvet teknologi

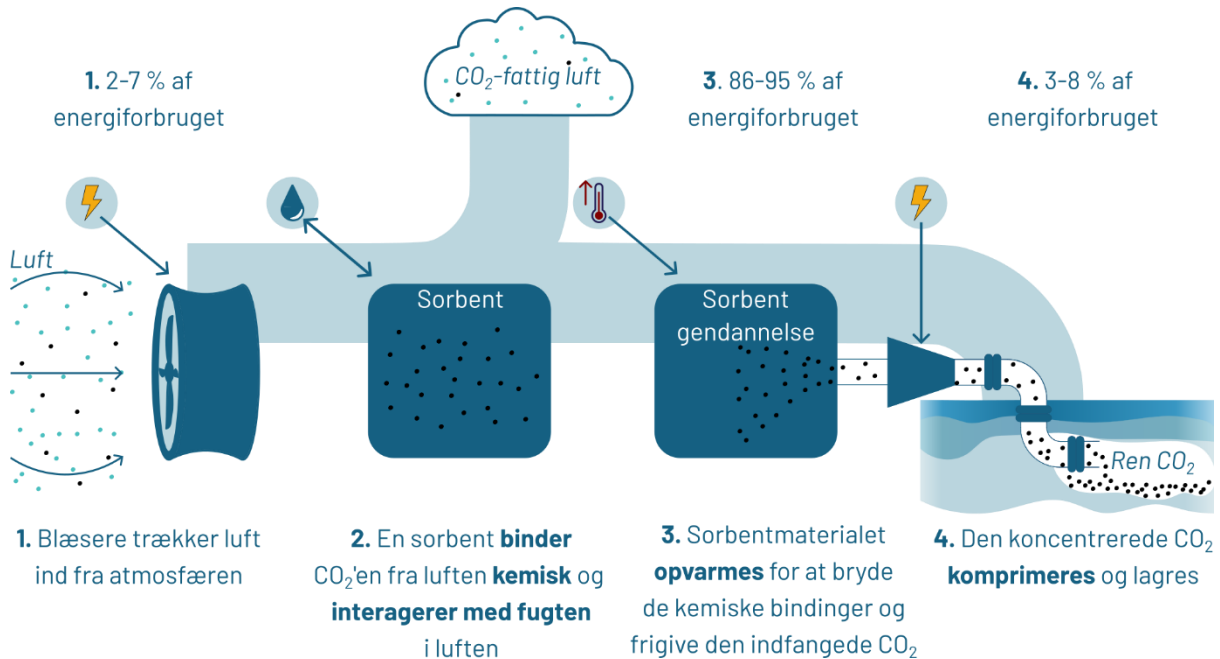
En af de eneste teknologier, der faktisk kan lave *negative emissioner*, er CO₂-fangst direkte fra luften også kaldet DAC (fra Direct Air Capture). Det er en metode, der ikke bare stopper nye udledninger, men aktivt fjerner CO₂, der allerede er ude i atmosfæren. Det gør teknologien vigtig. Både for klimaneutralitet og for at rydde op efter de udledninger, der allerede er sluppet ud i atmosfæren, så vi kan rette kursen og undgå de skader, der kan opstå ved de såkaldte tipping points.

Problemet er, at teknologien stadig er ung. CO₂-fangst fra luften er i dag energikrævende og dyr at bygge. Til gengæld har den en klar fordel: den fylder langt mindre end de enorme arealer, der skal til for at plante skove med den samme CO₂-effekt. Og plads bliver en knap ressource. Vi skal stadig bruge store områder til landbrug, som i dag optager cirka 60 % af Danmarks areal. Samtidig har EU et erklæret mål om, at 30 % af landarealet skal reserveres til beskyttet natur – et tal der i Danmark i dag kun er omkring 2 %. Det betyder, at løsninger, der ikke kræver store landområder, bliver ekstra vigtige.

Derfor har jeg i min ph.d. undersøgt, hvordan vi kan udvikle nogle af de metoder og materialer, der kan bruges til CO₂-fangst fra luften, så teknologien kan blive en realistisk og effektiv måde at håndtere vores restemissioner på.

Hvordan finder man en nål i en høstak?

Men hvordan fanger man egentlig CO₂ fra luften? Det kan faktisk gøres på flere forskellige måder, men fælles for dem alle er, at man skal have flyttet en stor mængde luft, som vist på figuren nedenfor. Derfor ligner disse anlæg ofte meget store blæsere.



Når luften først er inde, skal den i kontakt med et materiale, vi kalder en sorbent. Man kan tænke på sorbenten som en slags magnet, der leder efter én bestemt nål i en enorm høstak. Ud af alle de molekyler luften består af, er det kun CO₂'en, den skal holde fast i. Resten skal ud i atmosfæren igen. Men fordi CO₂ kun udgør omkring 0,04 % af luften, skal sorbenten fungere som en ekstra stærk magnet for at finde den rette "nål" i høstakken. Og når en magnet holder rigtig godt fast, kræver det også energi at få den til at slippe igen. Det samme gælder her: der skal en betydelig mængde energi til at få CO₂'en til at løsne sig fra sorbenten.

Derfor bliver sorbenten varmet op, når den er fuld af CO₂. Opvarmningen får CO₂'en til at slippe sit greb, så den kan opsamles som en ren gasstrøm og derefter transporteres til lagring dybt nede i undergrunden, hvor den kan ligge sikkert i tusinder af år. Herefter kan sorbenten bruges igen, og processen startes forfra.

Selve processen afslører også nogle af de største udfordringer ved CO₂-fangst fra luften. For at teknologien kan blive en realistisk del af Danmarks klimaløsning, skal vi udvikle sorbenter, der både kan fange CO₂ effektivt, frigive den igen uden et enormt energiforbrug, og som samtidig er billige, robuste og ikke kræver store mængder vand, plads eller andre værdifulde ressourcer. Det er en svær balance, for vi beder et materiale om at udskille én bestemt gasart, som kun findes i bittesmå mængder i luften, og gøre det igen og igen.

Udvikling af to forskellige CO₂-fangere

I min ph.d. har jeg udviklet og undersøgt to helt forskellige typer CO₂-sorbenter: én flydende og én fast. Fordelen ved den flydende sorbent er, at teknologien er kendt fra andre industrielle processer, men den er forbundet med et meget stort tab af vand. Almindelige flydende sorbenter kan miste mellem 5 og 20 ton vand for hvert ton CO₂, der fanges. Mit mål har derfor været at designe en flydende sorbent, der minimerer vandtabet, men stadig fanger CO₂ effektivt. Jeg arbejdede med en vandig opløsning af KOH og K₂CO₃ hvor jeg gennem modellering og over 70 laboratorieforsøg undersøgte, hvordan luftfugtighed, temperatur og kemisk sammensætning påvirker både fangstevnen og vandbalancen. Her brugte jeg et års vejrdata fra forskellige lokationer, til at simulere sorbentens performance, så den blev udviklet med realistiske klimaforhold for øje.

Den faste sorbent repræsenterer en helt anden tilgang. Her optages CO₂ passivt, altså uden brug af blæsere, af brændt og læsket kalk (hhv. CaO og Ca(OH)₂), der fungerer som en langsom "CO₂-svamp". Fordelen er det lave energiforbrug til fangsten, men udfordringen er hastigheden. Derfor har jeg undersøgt, hvordan luftfugtighed, temperatur, vandmængden i læskningen samt den cykliske performance for kalken påvirker reaktionshastigheden. Alt dette gjorde jeg ved hjælp af et klimakammer der kan simulere vejrbetingelser. For at forstå, hvordan materialets struktur bedst binder CO₂, analyserede jeg sorbenterne med elektronmikroskopi og termogravimetri.

Den flydende sorbent – en tunet løsning med minimalt vandtab

I mit arbejde med den flydende sorbent fandt jeg en måde til at reducere vandtabet dramatisk, som ellers er en af de store barrierer for teknologien. Jeg fandt ud af, at vandtabet kan bringes helt ned på *nul*, hvis man tillader, at sorbentens koncentration svinger i takt med vejret, i stedet for at holde den konstant, som ellers er den gængse tilgang.

Jeg udviklede derfor en ny "tunet" sammensætning, hvor mængden af K₂CO₃ øges, men KOH holdes i det optimale område. Det giver to store fordele:

1. *Vandbalancen stabiliseres*, selv i meget tørre klimaer.
2. *CO₂-fangstevnen bibeholdes*, da KOH er til stede i tilstrækkelig høj koncentration.

Gennem mine laboratorieforsøg viste jeg, at CO₂-fangsten næsten ikke ændrer sig, selv når K₂CO₃-indholdet øges, og at luftens relative fugtighed ved udløbet matcher det teoretiske niveau fra sorbentens vandaktivitet. Det bekræfter, at min nye kemiske sammensætning fungerer præcis som modellen forudsiger. Derfor kan jeg også tune den kemiske sammensætning til forskellige geografiske lokationer, der gør teknologien langt mere anvendelig på tværs af geografiske forhold. Jeg har designet en flydende sorbent, der over et år næsten intet vand bruger og stadig fanger CO₂ effektivt selv under udfordrende klimaforhold.

Den faste sorbent – en CO₂-fanger, der udnytter naturlige bevægelser i luften

Den anden sorbent, jeg har designet og undersøgt, er noget helt andet: en *passiv fast sorbent*, der optager CO₂ direkte fra luften uden nogen form for ventilator eller blæser. Den fungerer ved, at man sætter en bakke med læsket kalk, Ca(OH)₂, udenfor. Herefter omdannes det langsomt til kalk, CaCO₃, når det udsættes for luftens CO₂ og fugt.

Her viser mine resultater, at *høj luftfugtighed er nøglen til accelereret CO₂-fangst*: Ved over 70 % relativ luftfugtighed accelereres fangstprocessen betydeligt, og materialet kan opnå mere end 70 % CO₂-mætning på bare tre dage.

En vigtig del af mit designarbejde var at finde den rigtige mængde vand til læskning af den brændte kalk. Jeg identificerede, at den bedste struktur og reaktionshastighed opnås, når man bruger ét vandmolekyle per CaO-molekyle. Det giver et porøst, fint og reaktivt materiale, der både er nemt at arbejde med og effektivt til at fange CO₂.

Jeg gennemførte også cykliske tests, hvor materialet blev brugt, regenereret og brugt igen. Resultatet er bemærkelsesværdigt: Sorbenten bliver hverken langsommere til at fange CO₂ eller får mindre CO₂-kapacitet, selv efter mange cyklusser.

Til sidst har jeg beregnet, at selv hvis denne passive fangstmetode skal op i million-tons skala, vil systemet, fordi bakkerne kan stables, kun optage et relativt beskedent areal. Samtidig ligger energiforbruget på samme niveau som for andre luft-fangst teknologier.

Hvordan kan vi så bruge min forskning til at nå Danmarks klimamål?

Generelt kan Danmark drage fordel af at vælge DAC-teknologier, der passer til vores klima og vores begrænsede arealressourcer. Mine resultater viser, hvordan vi med den flydende sorbent kan designe systemer, der ikke bruger enorme mængder vand. Det er en vigtig faktor i en verden med stigende ressourceknaphed. Den faste sorbent viser til gengæld, at vi i et fugtigt klima som det danske kan bruge en simpel, passiv metode, som ikke engang kræver strøm til store blæsere.

Til sammen viser min forskning, at Danmark faktisk har gode forudsætninger for at etablere CO₂-fangst fra luften i stor skala, hvis vi gør det klogt og stedstilpasset. Min forskning giver et første skridt mod at vise, hvordan vi kan implementere negative emissioner uden at skabe nye problemer – og dermed hvordan vi i praksis kan lukke det sidste hul mellem udledninger og klimamål.

Men: Vi skal passe på, at DAC ikke ender med at blive set som en ren energisluger. Hvis teknologien skal have en legitim plads i Danmarks klimainsats, må den kunne levere mere end negative emissioner. Det rejser et vigtigt spørgsmål: Hvilke andre services kan DAC bidrage med i et energisystem, der bliver stadig mere elektrificeret og drevet af vind og sol? Det næste skridt er derfor ikke kun at forbedre sorbenterne, men at undersøge, hvordan DAC kan indgå som en aktiv del af energisystemet; måske gennem fleksibel drift, varmeintegration eller noget helt tredje.