

NATURVIDENSKAB OG TEKNOLOGI  
DIREKTE FRA FORSKNINGSVERDENEN

AKTUEL  
*natur* VIDENSKAB

TEMA OM CO<sub>2</sub>  
– problem og ressource

Kosmiske fyrtårne giver ny viden om tidlige galakser

Vandkraft versus vandmiljø  
– et opløftende eksempel

NR. 4 - 2023 SEPTEMBER 50 KR.



## Forudsigelig kunst

Forskere fra University of Chicago har i en række eksperimenter testet, hvilke malerier i samlingen på Art Institute of Chicago, folk bedst kan huske. Det viste sig, at der var en tendens til, at folk bedst kan huske de samme malerier. Således kunne forsøgspersonerne bedre huske større og mindre "overfyldte" værker end mindre og tætpackede værker. Forskerne fandt også, at en maskinlærings-model kunne forudsige, hvilke værker der sandsynligvis vil blive husket – ligesom den kunne forudsige "berømteden" af velrenommerede værker på museet.

Kilde: PNAS

## 私はロボットではありません

### Japaner eller ChatGPT?

Japanske forskere har ud fra 72 akademiske japanske tekster (skrevet af 36 forskellige forfattere) genereret et tilsvarende antal tekster ud fra titlerne på disse artikler ved hjælp af ChatGPT (72 tekster med version 3,5 og 72 med version 4). Efterfølgende analyserede forskerne ved hjælp af maskinlærings-algoritmer de i alt 216 tekster rent stylometrisk (dvs. på baggrund af kvantificerbare egenskaber såsom sætningslængde, diversitet i vokabular, hyppighed af anvendte ord og -former mv.). Forskerne fandt, at det var muligt med op til 100 % nøjagtighed at afgøre, om teksterne var skrevet af et menneske eller ChatGPT.

Kilde: PlosOne, doi.org/10.1371/journal.pone.0288453

### Spot på de ukendte proteiner

Menneskets arvemas-se koder samlet for flere end 20.000 proteiner, hvoraf mange endnu ikke er karakteriseret. I

forskningen er der en tendens til, at forskere beskæftiger sig med velkendte proteiner, hvilket medfører en risiko for, at dårligt kendte gener negligeres i forskningen af de forkerte grunde. For at adressere denne problemstilling har engelske forskere oprettet en offentlig tilgængelig database – *The Unknome* – der rangerer proteiner i forhold til, hvor lidt man ved om dem. Forskerne håber, at denne database vil kunne stimulere til udforskning af proteiner fra mennesker eller modelorganismer, som er dårligt forståede. <https://unknome.mrc-lmb.cam.ac.uk/>

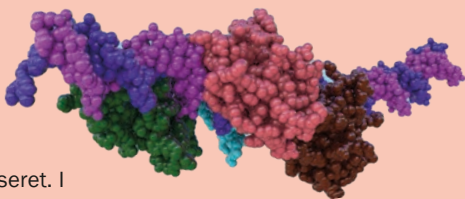


Illustration: Shutterstock

## Quizzen

Hvad er i astrofysisk forstand en kvasar?

1. En neutronstjerne, der udsender pulser af kraftig elektromagnetisk stråling.
2. Et meget fjernt og kraftigt lysende objekt, der skyldes lysende gas omkring et supertungt sort hul.
3. Et område i en galakse, hvor nye stjerner dannes.

Find svaret i artiklen: *Kosmiske fyrtårne giver ny viden om tidlige galakser.*



Foto: Shutterstock

## Opbrud giver diamanter

Når kontinenter brydes op, er det en drivende kraft i de processer, der danner diamanter. Det har et internationalt forskerhold ledet af geologer ved University of Southampton, England, opdaget. Diamanter dannes ved omdannelsen af carbon under stort tryk og høje temperaturer cirka 150 kilometer under Jordens overflade, og de findes typisk i en vulkansk bjergart kaldet kimberlit. Forskerne har analyseret sig frem til, at en dominoeffekt knyttet til nedsynken af små stykker afbrækket kontinentplade i den underliggende kappe kan forklare, hvordan opbrydningen af kontinentalpladerne – kaldet rifting – fører til dannelsen af kimberlit-magma.

Kilde: Nature vol. 620, pp. 344–350



Foto: EGRIP

## Bunden er nået

Det internationale forskningssamarbejde EGRIP med iskerneforskere fra Københavns Universitet i spidsen har nu nået deres mål om at bore hele vejen ned under indlandsisen. Det er første gang, det lykkes i en såkaldt isstrøm, hvor enorme mængder is skrider mod kysterne. Forskerne har boret sig igennem i alt 2670 meter is, og de skal nu analysere materialet, der blandt andet kan sige en masse om klimaets udvikling de seneste 120.000 år. Allerede nu har boringen gjort forskerne klogere, idet de har konstateret, at hele massen af 2670 meter is flyder som en blok med en hastighed på 58 meter om året. Hidtil har man troet, at isstrømme havde forskydninger ned gennem isen.

Kilde: Science KU

# indhold



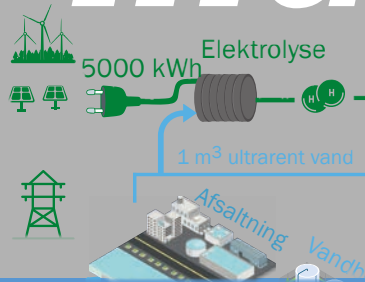
## Energi og klimakrisen

Negative udledninger, carbon-fangst og netto-nul-brændstoffer er centrale begreber i bestræbelserne på at tackle klimakrisen. Men hvad dækker disse begreber egentlig over, og hvilke udfordringer står vi overfor i den forbindelse? **8**



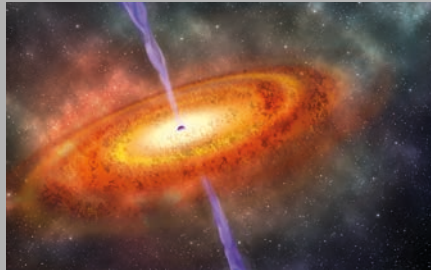
## Mikroorganismer omdanner menneskeskabt CO<sub>2</sub>

Mikroorganismer kan hjælpe os med at omdanne CO<sub>2</sub> til nyttige molekyler, der kan indgå i vores carbonbase-rede værdikæder. Derfor kan mikroorganismer få en vigtig rolle i mange Power-to-X-teknologier. **13**



## Power-to-X er fremtiden

Power-to-X handler om at udnytte overskudselektricitet til nyttige formål, hvor det første skridt mod X'et altid er omdannelsen af elektrisk energi og vand til hydrogen. Danmark er med helt fremme indenfor udviklingen af power-to-X. **18**



## Kosmiske fyrtårne giver ny viden om tidlige galakser

Astronomerne forsøger nu at skaffe sig viden om galakserne i det tidlige univers ved hjælp af lyset fra såkaldte kvasarer – objekter i universet, der kan lyse lige så kraftigt som hundredvis af galakser tilsammen. **32**

## FORSKNING OG NYHEDER

- 4 KORT NYT
- 8 **TEMA OM CO<sub>2</sub>**  
– **problem og ressource:**
- 8 Energi og klimakrisen
- 13 Mikroorganismer omdanner menneskeskabt CO<sub>2</sub>
- 18 Power-to-X er fremtiden
- 24 Kemiske udfordringer ved CO<sub>2</sub>-fangst
- 28 Jagten på den rene CO<sub>2</sub>
- 32 Kosmiske fyrtårne giver ny viden om tidlige galakser
- 38 Vandkraft versus vandmiljø – Et opløftende eksempel fra De italienske Alper
- 44 BAGSIDEN:  
Klik-kemi som kollektivt kunstværk:

## AKTUEL NATURVIDENSKAB

### Udgiver

Aarhus Universitet, Faculty of Natural Sciences og Faculty of Technical Sciences, i samarbejde med:

- Det Natur- og Biovidenskabelige Fakultet, Københavns Universitet
- Det Naturvidenskabelige Fakultet, Syddansk Universitet
- Roskilde Universitet

### Ansvarshavende

David Lundbek Egholm, professor, Faculty of Natural Sciences, Aarhus Universitet.

### Redaktion

Redaktører Carsten Rabæk Kjær og Jørgen Dahlggaard  
Tlf.: 3036 0660 / 3036 0662 / 8715 2094  
E-post: red@aktuelnaturvidenskab.dk  
Hjemmeside: aktuelnaturvidenskab.dk



## SPONSOR- ABONNENTER



# Statistik afslører, om hvaler opfører sig unaturligt

**V**i mennesker kan være et skræmmende bekendtskab for hvaler i naturen. Det gælder også, når havbiologer sætter måleinstrumenter (tags) på dyrerne for at forstå dem bedre. Efterfølgende opfører hvalerne sig usædvanligt i et stykke tid. De kan for eksempel finde på at lave mange overfladiske dyk og hurtige spjæt, som de normalt ikke ville.



Narhval med måleinstrument.

Foto: Carsten Egevang, Grønlands Naturinstitut

Det kan gå ud over forskningens kvalitet, fordi det giver støj i datasættet, når formålet er at studere dyrenes naturlige adfærd, og det understreger samtidigt et dyretisk dilemma. Men nu er der kommet hjælp fra en usædvanlig kant.

»Biologerne ender med at smide en del data ud, som det er nu. Med det her studie har vi foreslået en matematisk tilgang med nogle statistiske metoder, der kan bestemme præcist, hvor lidt data man behøver at smide væk,« siger ph.d.-studerende Lars Reiter fra Institut for Matematiske Fag ved Københavns Universitet.

Tilgangen indebærer statistiske beregninger med to typer data fra tags – acceleration og dybde.

Acceleration fortæller om hvalens energiniveau og bevægelser. Pejlemålene for naturlig adfærd er her opdelt efter hvalens aktivitet, så eksempelvis et højt energiniveau registreres som naturligt i forbindelse med jagt, men ikke i forbindelse med hvile.

Data om dybde bruges til at finde hvalens dykkeprofil. Her ser man på det mønster, hvalens samlede aktiviteter danner, og om fordelingen af forskellige typer dyk er naturlig.

Det optimale skæringspunkt i forskningsdataet mellem naturlig og påvirket adfærd findes så ved at sammenligne de enkelte målinger som "stemmer for eller imod" normal adfærd.

Den nye tilgang er vigtig for havbiologernes arbejde også i en langt bredere forstand, fordi klimaforandringer er ved at ændre hvalernes naturlige habitat i Arktis, blandt andet fordi vi mennesker rykker tættere på.

»Den giver os mulighed for at undersøge, hvordan forskellige menneskelige aktiviteter påvirker hvalerne. Med Lars' algoritme kan vi få et klart billede af, hvordan det præger dyrene,« lyder det fra havbiolog Outi Tervo fra Grønlands Naturinstitut.

Kristian Bjørn-Hansen, Science KU

## Kør roligt og spar CO<sub>2</sub>

**E**n aggressiv kørestil med hidsige accelerationer og kraftig nedbremsning bruger mere brændstof end en mere jævn og fredsommelig kørestil. Og det betyder større CO<sub>2</sub>-udledning. Men hvor stor betydning har dette for den samlede CO<sub>2</sub>-udledning? Det giver en gruppe forskere fra Kina og England et bud på i et nyt studium publiceret i *Nature Sustain*.

Forskerne foreslår i artiklen et standardiseret "aggressivtets-index" i trafikken, som de har udviklet ved at analysere data indsamlet i Kina. På baggrund af disse data har forskerne kvantificeret intensiteten af acceleration og deceleration, når en bil følger efter en anden i trafikken, og inddelt førere i tre kategorier: "rolige", "neutrale" og "aggressive". De esti-



Foto: Shutterstock

merede derefter udledningen af CO<sub>2</sub> for hver kørestil og opskalerede til sidst deres resultater til hele landet under hensyntagen til den nuværende rate, hvormed Kinas bilpark udskiftes med el-biler.

Beregningen viser, at hvis den nuværende køreadfærd i Kina blot fortsætter indtil 2050, vil Kinas samlede flåde af biler udlede hele 400 millioner tons CO<sub>2</sub>, 1,5 millioner tons CO og 3.3000 tons partikler mere i perioden fra 2013 til 2050 sammenlignet med, hvad der vil blive udledt, hvis alle adopterede den rolige kørestil.

Ifølge forskerne viser deres resultater, at adfærdsskiftninger er vigtige i forhold

til at begrænse udledninger i transportsektoren, og at det derfor er nødvendigt at stimulere bilister til at adoptere en mindre miljøbelastende kørestil.

CRK, Kilde: *Nat Sustain* (2023).  
doi.org/10.1038/s41893-023-01173-x

# Oxygen var ikke afgørende for udviklingen af flercellet liv

**F**or mellem 685 og 800 millioner år siden begyndte flercellet liv at dukke op overalt i Jordens have i det, der kaldes Avalon-eksplosionen, forløberen til den Kambriske eksplosion. Havsvampe og andre mærkelige flercellede organismer afløste på den tid små encellede amøber, alger og bakterier, som indtil da havde haft kloden for sig selv i mere end to milliarder år.

Indtil nu har man troet, at en stigning i mængden af oxygen på Jorden var det, der udløste udviklingen af de mere avancerede organismer i havene. Men det modbevises nu af forskere fra Københavns Universitet, i samarbejde med blandt andet Woods Hole oceanografiske Institut, Syddansk Universitet og Lunds Universitet i et nyt studie.

Ved at undersøge det kemiske indhold i ældgamle stenprøver fra en bjergkæde i Oman har forskerne været i stand til at "måle" niveauet af oxygen i verdenshavene på den tid, hvor de flercellede organismer piblede frem. Og resultatet viser, at oxygenniveauet på Jorden ikke steg – snarere tværtimod. Det forblev fem til ti gange lavere end i dag, hvilket svarer til oxygenniveauet i omkring to gange Mount Everests højde.

## Snarere et fald i oxygen end en stigning

»Vores målinger giver et godt gennemsnitligt billede af, hvordan oxygenniveauet har været i verdenshavene på den tid, og vi kan se, at der ikke var en kæmpe stigning i mængden af oxygen, da det mere avancerede dyreliv begyndte at udvikle sig og dominere Jorden. Faktisk var der nærmere et lille fald,« siger lektor Christian J. Bjerrum, der de sidste 20 år har beskæftiget sig med kvantificering af forholdene omkring livets opståen.

Det nye resultat gør op med en 70 år lang forskningshistorie, der fortæller, at et højt indhold af oxygen var afgørende for, at mere avanceret liv kunne udvikle sig.

»At vi nu med ret stor sikkerhed ved, at oxygen ikke var styrende for livets udvikling på Jorden, giver os en helt ny fortælling om,



Feltarbejde i Oman Mountains. Bjergarterne her bærer vidnesbyrd om, at oxygenniveauet for mellem 685 og 800 millioner år siden var meget lavere end hidtil antaget. Foto: Christian J. Bjerrum

hvordan liv opstår og hvilke faktorer, der var styrende for den succes,« siger forskeren og tilføjer:

»Helt konkret betyder det, at vi skal gentænke en masse ting, som vi troede var barnelærdom og lærebøger skal revideres og skrives om.«

## Forskningsresultater bør ses i nyt lys

Men der er stadig meget forskerne ikke ved, og kontroverser hersker fortsat. Derfor håber han, at det nye resultat kan få andre forskere verden over til at se deres tidligere resultater og data i et nyt lys.

»Der er mange forskningssektioner rundt i verden, blandt andet i USA og Kina, som har forsket meget i det her emne, hvis tidligere resultater kan kaste vigtige nye detaljer af sig, hvis de fortolkes ud fra, at oxygen ikke

var styrende for livets udvikling,« siger Christian J. Bjerrum.

Men hvad udløste så den eksplosion af liv, som Jorden gennemgik på den tid, når det ikke var ekstra oxygen? Måske det stik modsatte, lyder det fra forskeren:

»Det er interessant, at den store eksplosion i de flercellede organismer sker på et tidspunkt med et lavt oxygenindhold i atmosfæren og verdenshavene. Det peger på, at organismene har nydt godt af et lavere oxygenniveau og har kunnet udvikle sig i ro og mag, da vandkemien naturligt værnedes om deres stamceller,« siger Christian J. Bjerrum.

Michael Skov Jensen, KU.

Kilde: Studiet er publiceret i *Gebiology*, <https://doi.org/10.1111/gbi.12557>

# Intelligent sensornetværk skal overvåge korrosion

**D**en gradvise nedbrydning af materialer i konstruktioner som broer og tunneler kaldes korrosion. I denne nedbrydning omdannes materialerne ved en kemisk eller elektro-kemisk proces til stabile oxider (materialerne oxiderer). Vi kender specielt korrosion i form af rust, som er elektrokemisk omdannelse af metaller, men korrosion forekommer i mange forskellige materialer. Korrosion er på global skala et kæmpe problem, der anslås at koste i omegnen af 17 billioner kroner årligt. Det svarer til omkring 3 procent af bruttonationalproduktet af alle verdens samlede nationer.

Et nyt projekt – CorroSense – skal nu udvikle løsninger, der kan overvåge korrosion og rustdannelse inden i store betonkonstruktioner ved hjælp af et trådløst sensornetværk, der forsyner sig selv med energi uden batterier. Overvågningen skal kunne detektere og forudsige eventuelle problemer ved hjælp af kunstig intelligens.



Foto: Shutterstock

I dag er korrosions-sensorer afhængige af såkaldt elektromekaniske teknikker. De skal støbes ind i konstruktionen, de kræver omfattende kabling, og de kan kun overvåge få kritiske områder. Samtidig giver de ofte blot vejledende målinger, som kan

være fejlbehæftede, målingerne skal ofte udføres manuelt og ofte på svært tilgængelige steder.

I CorroSense er ambitionen et trådløst sensornetværk, der indsamler data om blandt andet korrosion, temperatur og fugtighed, hvilket giver et samlet billede af konstruktionens strukturelle sundhed. Det skal blandt andet gøre, at Vejdirektoratet kan slippe for det traditionelle arbejde med overvågning af de cirka 2.500 broer og tunneler i Danmark, der både er omfattende, upræcist og dyrt.

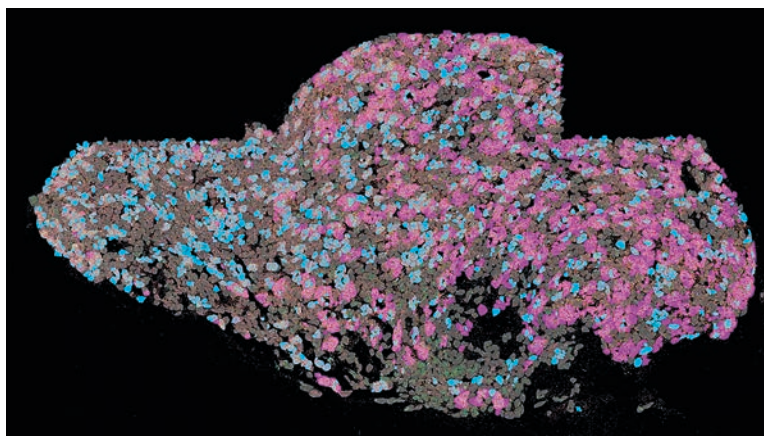
CorroSense-projektet er et samarbejde mellem FORCE Technology, Vejdirektoratet, Sund & Bælt, virksomhederne Damgaard Rådgivende Ingeniører og Maturix samt Aalborg Universitet og Aarhus Universitet. Projektet modtaget 26 millioner kr. fra Innovationsfonden, og det totale budget er på 35 millioner kr.

Jesper Bruun, AU Tech

# Derfor kan hjerteproblemer give søvnproblemer

**M**ennesker, der har oplevet hjertestop eller har anden hjertesygdom, oplever ofte forstyrrelser af det naturlige søvnmønster og lave niveauer af hormonet melatonin (et centralt hormon i reguleringen af kroppens døgnrytme). Søvnproblemer bidrager væsentligt til den samlede sygdomsbyrde for patienter med hjertesygdom, men hvilke mekanismer der ligger bag dette fænomen har hidtil været uklart.

Karin Ziegler fra det tekniske universitet i München, Tyskland og kolleger rapporterer nu i tidsskriftet *Science* på baggrund af undersøgelser af nerveceller hos både mus og mennesker, at søvnforstyrrelserne er drevet af tab af nerveceller i den "øvre cervikale ganglion", som er en del af



Billedet viser den øvre cervikale ganglion hos en mus: I disse ligger nerveceller, der kontrollerer hjertemusklens (lyserød) tæt ved dem, der er forbundet med koglekirtlen (blå).

Illustration: Karin Ziegler, Technische Universität München.

det autonome nervesystem. Nerveceller i det øvre cervikale ganglion strækker sig ind i koglekirtlen (pinealkirtlen) – den hjernestruktur der producerer melatonin. Tabet af nerveceller bundet i, at hjertesygdom udløser en indstrømning af makrofager (en type

hvide blodceller) i den cervikale ganglion, hvor de forårsager celledød.

Forskerne har også undersøgt en musemodel med hjertesvigt og opdaget, at ved at behandle musene med medicin, der undertrykker produktionen af makrofager, kunne de måle en væsentlig stigning i niveauet af melatonin.

Resultaterne antyder derfor, at behandling med anti-inflammatorisk medicin

måltrettet de relevante nerveceller kan være en mulig strategi for at forebygge søvnforstyrrelser hos patienter med hjertesygdomme.

CRK Ziegler, K. A. et al. *Science* 381, 285–290 (2023).



# Nye vådområder kan give mere metanudslip

Luffoto af engsøen forrest i billedet og den salte kystlagune bagest på den anden side af diget. Foto: Viggo Lind

**M**ed planerne om at tage 100.000 hektar lavbundsjord ud af drift inden 2030 og omdanne dem til vådområder, er der lagt op til store CO<sub>2</sub>-besparelser på klimabudgettet. Det skyldes, at den iltfrie jordbund i vådområder udleder mindre CO<sub>2</sub> end iltholdige, dyrkede jorde.

Men den omlægning kan risikere at koste overraskende meget på klimabudgettet, advarer biologer fra SDU nu. Problemet opstår specifikt, når der kommer til at stå ferskvand i det nye vådområde, for det har vist sig, at der kan slippe store mængder af drivhusgassen metan ud til atmosfæren, når man oversvømmer med ferskvand og laver lavvandede søer. Hvis man nøjes med at holde området fugtigt, som for eksempel en mose, falder udslippet af metan markant.

Professor i økologi Erik Kristensen fra Syddansk Universitet har sammen med kolleger fra Biologisk Institut i en årrække fulgt oversvømmelsen af det store landområde på Nordfyn, Gyldensteen Strand. I 2014 blev områdets dyrkede lavbundsjord oversvømmet som led i en naturgenopretning udført af Aage V. Jensen Naturfond. Da projektet er enestående i Danmark og Europa, finansierede fonden en række forskningsprojekter,

der har til hensigt at lære mere om, hvad der sker, når tidligere landbrugsjord omdannes til vådområder.

Forskerne har kørt dette storskalaforsøg i en årrække, og de har kunnet konstatere, at når der er stående ferskvand i et vådområde – om der så står bare 10 cm vand – så foregår der en kraftig metan-frigivelse. Det samme sker slet ikke i et område, der er oversvømmet med saltvand.

Gyldensteen er i dag oversvømmet i to portioner; en del blev efter fjernelse af diger oversvømmet med havvand, og en anden del blev oversvømmet med ferskvand. Og det er altså målinger af de to forskellige vådområders udslip af drivhusgasser, der har vist, at metanudledningen er vidt forskellig.

Årsagen skal findes i det iltfrie mudder under det salte og det ferske vand, hvor forskellige bakterier er på spil. Metan-producerende bakterier trives i det ferske vand, men hæmmes i det salte vand. Deres aktivitet er også stor, når jorden kun er fugtig, men her vil atmosfærens ilt hjælpe iltkrævende bakterier, så de kan spise metanen nær overfladen, og derfor slipper der kun små mængder metan ud fra fugtige jorde.

Ifølge forskernes målinger udledes der hvert år 303 tons metan (svarende til 8400 tons CO<sub>2</sub>-ækvivalenter) fra den 144 hektar store Engsø (der er den ferskvandsoversvømmede del af Gyldensteen). Hvis man ekstrapolerer denne metanudledning til de 100.000 hektar lavbundsjord, der planlægges at gøres til vådområder, vil det frigive metan svarende til knap 6 millioner tons CO<sub>2</sub>-ækvivalenter om året, hvis alle områder får et åbent vandspejl. Herfra skal så trækkes den forventede CO<sub>2</sub>-gevinst ved, at områderne bliver oversvømmet med vand, på cirka 3 millioner tons CO<sub>2</sub>-ækvivalenter. Dermed bliver nettoresultatet 3 millioner tons flere tons CO<sub>2</sub>-ækvivalenter, end hvis landmanden havde beholdt arealerne under plov. Dette er vel at mærke under den antagelse, at arealerne andre steder i Danmark vil opføre sig på samme måde som ved Gyldensteen.

Erik Kristensen og kolleger mener, at den viden, vi har opnået ved Gyldensteen, skal med i fremtidige vandmiljøplaner, så vi kan designe nye vådområder på en intelligent måde. Hvilket for eksempel vil sige, at man skal oversvømme med saltvand og ikke ferskvand i kystnære områder, hvis der er mulighed for dette.

Birgitte Svennevig, Kilde: SDU

Mennesket bruger meget energi – her illustreret ved nat-telys fra områder med stor befolkningstæthed.

Foto: Shutterstock

# ENERGI OG KLIMAKRISEN

**“Negative udledninger, carbon-fangst og netto-nul-brændstoffer” er centrale begreber i bestræbelserne på at tackle klimakrisen. Men hvad dækker disse begreber egentlig over, og hvilke udfordringer står vi overfor i den forbindelse?**

**Det får du et overblik over i denne artikel.**

**M**enneskeheden befinder sig på et kritisk punkt i historien. Effekterne af klimaforandringer bliver mere synlige for hvert år: Stigende overfladetemperatur, smeltende poler og ekstremt vejr, som bare er nogle få ud af mange tegn på, at jordens naturlige balance er truet. I midten af krisen findes ét af de mest kendte grundstoffer, carbon (kulstof). Carbon i kemiske forbindelser har evnen til at indeholde store mængder energi, som vi høster og bruger til alverdens formål, lige fra det første bål til nutidens rumrejser. Afbrændingen af carbon-forbindelser er den primære drivkraft bag menneskets store fremskridt gennem de seneste tusinder af år. Men hver gang vi høster energien, efterlader vi også en usynlig gas, der nu ligger

som en dyne i atmosfæren over jordens overflade og skaber global opvarmning og klimaforandringer: Carbondioxid eller CO<sub>2</sub>.

CO<sub>2</sub> er ét af de styrende elementer i jordens energibalance. Det har gennem hele jordens 4,5 milliarder års lange historie været i atmosfæren, hvor det fungerer som drivhusgas. CO<sub>2</sub> absorberer varmeenergi afgivet fra jorden og reflekterer den. Noget af energien reflekteres tilbage mod jorden, hvilket skaber mere opvarmning, og noget ender på den anden side af atmosfæren i rummet. Hvis vi som et tankeeksperiment tog alt CO<sub>2</sub> ud af atmosfæren, vil resultatet være en fuldkommen tilfrosset jordklode uden evnen til at opretholde højere liv, så vi har meget at takke CO<sub>2</sub> og drivhuseffekten for. Men i det omvendte scenario med forøgel-

se af CO<sub>2</sub> vil mere og mere varmeenergi blive fanget mellem jorden og atmosfæren og skabe højere og højere temperaturer. Det er det, vi oplever lige nu.

## Hvor er vi?

I 2015 underskrev 196 lande under FN Parisaftalen, der forpligter dem til at tage skridt til at reducere CO<sub>2</sub>-udledninger for at begrænse den globale temperaturstigning til under 1,5 grader Celsius i forhold til førindustrielle niveauer. FN's klimapanel, IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), overvåger fremskridtet i forhold til aftalen og giver regelmæssige videnskabelige vurderinger af klimaforandringer, påvirkninger, risici samt muligheder for tilpasning og risikoreduktion.

Et vigtigt spørgsmål er nu, hvor

## Om forfatteren



Mads Lundgren Bendixen er uddannet biolog med speciale i mikrobiologi fra Aarhus Universitet. Han har arbejdet med forskningsformidling siden 2016 og er nu ansat som Director of Outreach ved The Novo Nordisk Foundation CO<sub>2</sub> Research Center, Aarhus Universitet. mlb@corc.au.dk



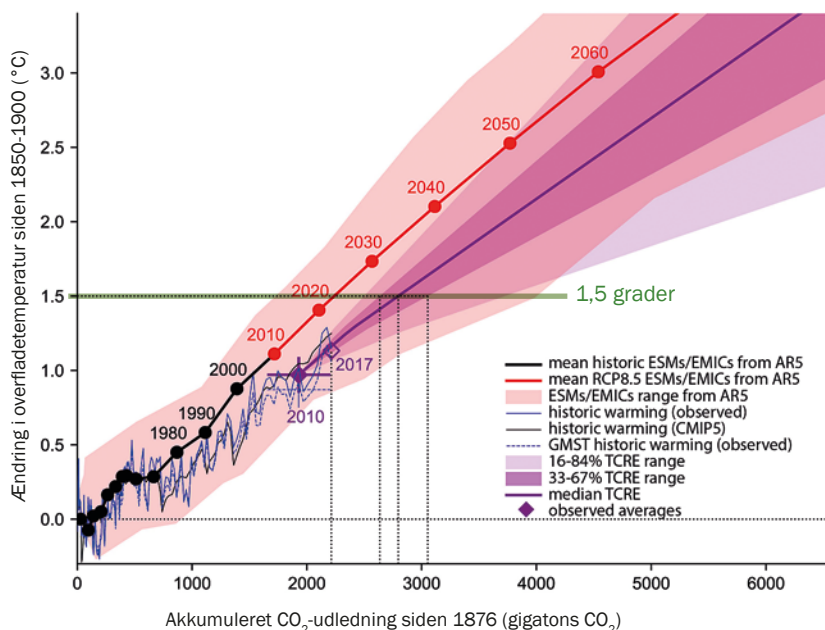
meget mere CO<sub>2</sub> atmosfæren kan optage, før vi når det fastsatte loft på 1,5 graders temperaturstigning. Ifølge IPCC har vi kun cirka 260 gigaton CO<sub>2</sub> tilbage, før vi når loftet på 1,5 grader, og omkring 1009 gigaton CO<sub>2</sub> tilbage, før vi når 2 grader (figur 1). Men det mere interessante spørgsmål er, hvor lang tid vi har til at bruge de resterende 261 gigaton CO<sub>2</sub>. Det er den tid, vi har til at løse problemet, og svaret afhænger primært af, hvordan menneskeheden håndterer CO<sub>2</sub>-udledninger.

I 2021 udledte vi i alt omkring 42,2 gigaton CO<sub>2</sub>-ækvivalenter af drivhusgasser, og udledningerne forventes at være endnu højere i 2022. Med udgangspunkt i udledningerne fra 2021 og de resterende 260 gigaton CO<sub>2</sub>, har vi groft sagt cirka 6 år tilbage, før vi rammer de 1,5 graders temperaturstigning. Heldigvis kan der stadig ske betydelige ændringer! Vi så for eksempel en betydelig reduktion af årlige udledninger under COVID-19-pandemien, hvilket viser, at vi er i stand til at påvirke udledningerne. Men der er ingen tvivl om, at det kræver en betydelig indsats.

Det er dog blevet mere usandsynligt, at vi kan holde temperaturstigningen under 1,5 grader. Mange klimamodeller arbejder dog med scenarier, hvor temperaturen i en periode kan overstige 1,5 grader for derefter at falde igen. Dette kaldes "overshoots" og kan ses som en strategi for at nå langsigtede mål. For eksempel kan man tillade en midlertidig overskridelse af 1,5 graders-målet for at opnå et klimamål i 2050 eller 2100. Dette er en risikabel klimastrategi, men den kan give mere tid til at udvikle tekniske og systemiske løsninger til at reducere CO<sub>2</sub>-udledninger, før tiden løber ud. Men hvordan kan dette opnås?

### Hvor skal vi hen?

IPCC arbejder med langsigtede mål og prøver at inkorporere al den indsamlede viden i klimamål og -strategier. Generelt er der blevet udarbejdet nogle scenarier for, hvordan man kan opnå klimaneu-



Figur 1. IPCC har observeret en næsten lineær sammenhæng mellem den samlede mængde CO<sub>2</sub> i atmosfæren og jordens overfladetemperatur. Jo mere CO<sub>2</sub>, der er i atmosfæren, desto mere varme reflekteres tilbage og mindre varme afgives til rummet. Figuren viser denne sammenhæng ved at vise den kumulative ophobning af CO<sub>2</sub>-udledninger siden 1876 og den tilsvarende stigning i overfladetemperaturen siden den industrielle revolution. Kilde: IPCC Special Report on Global Warming of 1.5 C

tralitet og overholde Parisaftalen til år 2100. Nogle af disse scenarier inkorporerer overshoots, mens andre opererer med ingen eller næsten ingen overshoot (se figur 2). Hvis man ser på udledningerne i år 2100 for de forskellige scenarier, er der meget stor forskel på deres størrelse. Men for dem alle gælder, at vi i år 2100 skal under det punkt udledningerne rammer nul. Vi skal

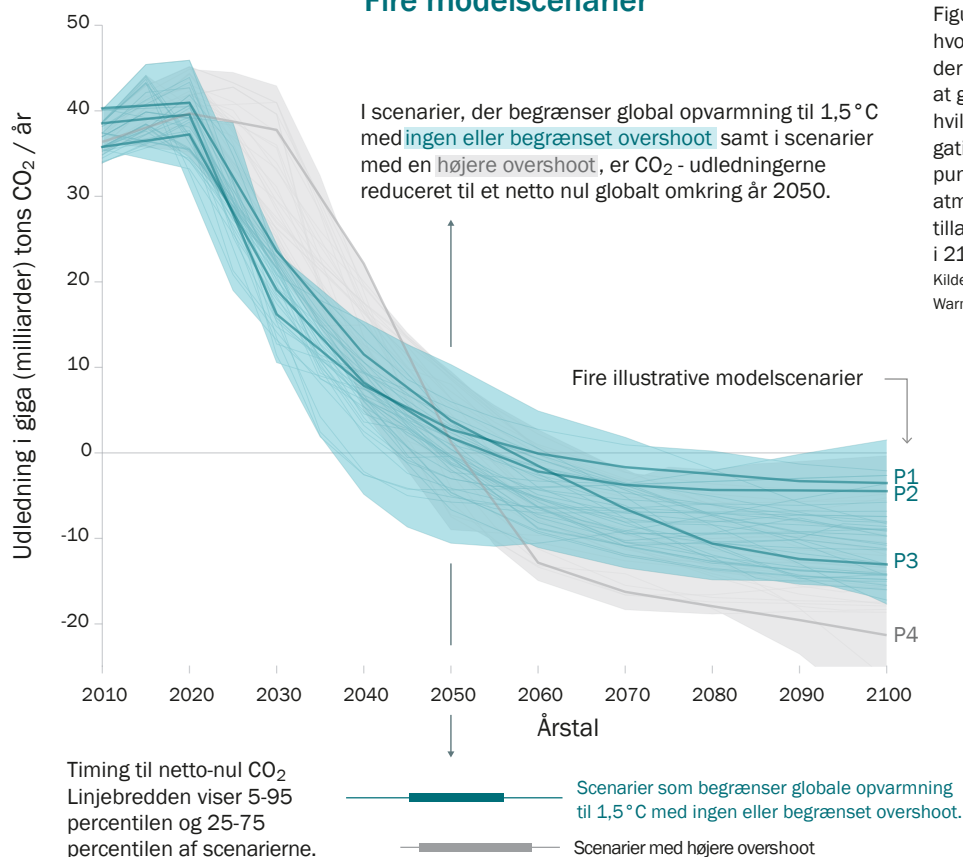
altså i minus, hvilket kaldes negative udledninger. Negative udledninger er et komplekst og omdiskuteret begreb, men i det store hele betyder det, at vi netto skal fjerne mere CO<sub>2</sub> fra atmosfæren, end vi udleder – på global plan. Det er altså ikke længere nok at reducere udledningerne til nul. Vi skal under nul. CO<sub>2</sub> kan fjernes fra atmosfæren enten gennem en række naturbaserede

### Tema om CO<sub>2</sub> i Aktuel Naturvidenskab

En af tidens helt store udfordringer er at nedbringe atmosfærens koncentration af CO<sub>2</sub> til et niveau, der kan begrænse den globale temperaturstigning til et acceptabelt niveau. I den såkaldte Parisaftale er dette fastsat til 1,5 °C i forhold til tiden før industrialiseringen. Vejen til dette mål går over en masse tiltag, der kan samles under forkortelsen CCUS, der står for *Carbon Capture Utilization and Storage*, dvs. Fangst, udnyttelse og lagring af carbon (kulstof). Det dækker altså over en bred palette af metoder, der alt sammen har som endemål, at der fjernes CO<sub>2</sub> fra atmosfæren eller udledes mindre, end der gør i dag.

I en række temaartikler vil vi i dette og kommende numre af Aktuel Naturvidenskab dykke ned i dette store emne og se nærmere på nogle af de mange forskningsprojekter, der udfolder sig indenfor dette område. Da det er et område, der hurtigt udvikler sig i disse år, vil vi selvfølgelig løbende følge op på emnet og samle nye artikler indenfor området i en temaindgang på hjemmesiden.

## Fire modelscenarier



Figur 2. IPCC P1-P4 er scenarier for, hvordan vi holder temperaturen under 1,5 graders stigning. Man kan se, at grafen går under nul i alle tilfælde, hvilket betyder at der er brug for negative udledninger – altså at vi når et punkt, hvor der fjernes mere CO<sub>2</sub> fra atmosfæren end der tilføres. P4 (grå) tillader et større overshoot og kræver i 2100 større negative udledninger.  
Kilde: IPCC Special Report on Global Warming of 1.5 C

løsninger (som jorde og skove) eller via menneskeskabte teknologiske løsninger designet til at fjerne CO<sub>2</sub> fra atmosfæren i stor skala.

Hvilket scenarie, man følger, har stor indvirkning på, hvor store negative udledninger, der er behov for. Som hovedregel siger man, at jo mere CO<sub>2</sub>, vi lukker ud nu, og jo større overshoot, man tillader, des større negative udledninger er der behov for i år 2100. Omvendt, jo mere vi globalt kan reducere CO<sub>2</sub>-udledninger nu, jo mindre skal der indfanges i fremtiden. Om der står minus 20 Gt om året eller 5-6 Gt om året i 2100 er faktisk ret væsentligt. Det er nemlig både besværligt og dyrt at nå frem til negative udledninger.

Foruden behovet for negative udledninger skal der også findes tekniske og systemiske løsninger på at nedbringe de udledninger, som er svære at reducere. Det kan for eksempel være grønt brændstof til flytransport eller tung trafik og indu-

stri, hvor man ikke kan elektrificere. For eksempel kan CO<sub>2</sub> fanget i biomasse eller fra atmosfæren laves til brændstof, som ved afbrænding udleder CO<sub>2</sub> til atmosfæren igen. Det giver netto nul CO<sub>2</sub> til atmosfæren og kaldes samlet set for netto-nul-udledninger.

For at opsummere skal vi have styr på tre ting for at nå Parisaftalens mål: reduktion af nuværende udledninger, netto-nul-teknologi og til sidst de negative udledninger. Faktisk er Danmarks klimamål for 2050 også negative med en målsætning på 110 % reduktion – altså 10 % negative udledninger!

### Reduktion, konvertering og negative udledninger

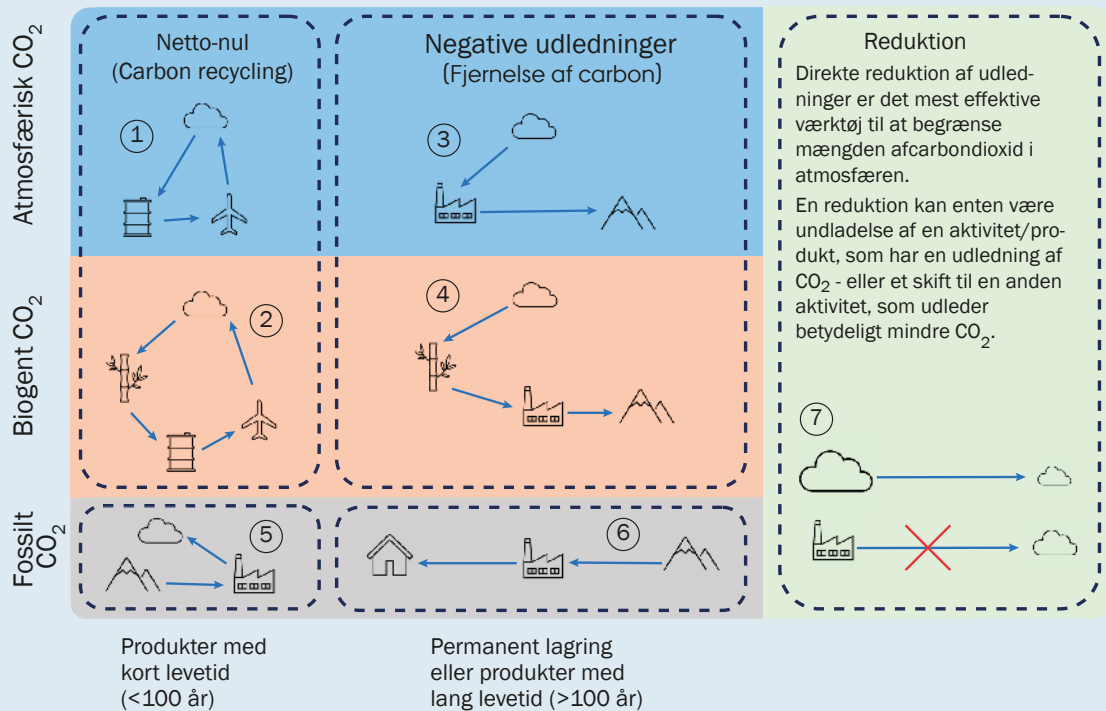
Et godt eksempel på en reduktion af CO<sub>2</sub>-udledninger på et personligt plan er at tage cyklen i stedet for bilen. Cyklings udleder næsten ingen CO<sub>2</sub>, mens bilen udleder forholdsvis meget. Udledninger, som bilkørsel ville have haft, trækkes simpelthen ud af regnskabet. Det samme kan

på sin vis siges om at tage en el-bil – dog koster både en bil, en cykel og en elbil nogle udledninger, når de bliver produceret, og den udledning skal selvfølgelig trækkes fra. Man skal altså tænke i et komplet regnestykke “fra vugge til grav”, når man opgør en aktivitets eller produkts CO<sub>2</sub>-udledning.

Hvis man derimod tager bilen og kører på fossilt brændstof, har man en direkte positiv udledning. Det er de udledninger, vi skal gøre noget ved hurtigst. Her bliver carbon, som ellers ville være bundet i olie i undergrunden, til CO<sub>2</sub> i atmosfæren.

Tager man bilen, men kører på brændstof udvundet fra biomasse, er det en netto-nul-udledning. Afgrøder, som har optaget atmosfærisk CO<sub>2</sub> gennem fotosyntese og senere bliver raffineret til biobrændsel og brændt af i bilens forbrændingsmotor, vil i udgangspunktet resultere i den samme mængde CO<sub>2</sub> i atmosfæren som før. Det gælder dog kun, hvis alle

## CO<sub>2</sub>- aftryk



Illustrationen giver en oversigt over, hvordan forskellige kombinationer af carbonkilder og slutdestination kan have markant forskellige resultater, når man beregner CO<sub>2</sub>-aftrykket. Det er i den forbindelse vigtigt at forstå, at en "reduktion i udledning af CO<sub>2</sub>" ikke mindsker atmosfærens CO<sub>2</sub>-indhold – det kan vi kun opnå ved hjælp af negative emissioner.

Negative emissioner er illustreret ved 3 og 4 på figuren, hvor CO<sub>2</sub> fanget direkte fra atmosfæren eller via biomasse bruges i produkter med lang levetid eller permanent lagres.

Reduktion i CO<sub>2</sub>-udledning kan for eksempel opnås ved

at fange CO<sub>2</sub> fra atmosfæren eller biomasse og udnytte det i produkter som flybrændstof, der igen frigiver CO<sub>2</sub>, når det bliver brugt (1 og 2 på figuren). Reduktioner kan også omfatte adfærdsændringer, såsom at bruge vedvarende energikilder til belysning derhjemme eller slukke for lyset, når der ikke er behov for kunstigt lys.

5 og 6 på figuren illustrerer traditionel brug af fossile carbonkilder.

For at skabe en mere bæredygtig fremtid er det vigtigt at kombinere både reduktioner og negative emissioner i vores bestræbelser på at mindske CO<sub>2</sub>-udledningen og stabilisere klimaet.

trin i raffineringen er CO<sub>2</sub>-neutrale – fra vugge til grav.

Hvis man kører bilen på biobrændsel og fanger CO<sub>2</sub>'en, man udleder, for derefter at lagre den permanent (over 1000 år), vil det blive anset for en negativ udledning, da CO<sub>2</sub>'ens oprindelse er atmosfæren, og endestationen er permanent lagring. Det er faktisk en af de metoder, som man tror meget på lige nu og bliver kaldet BECCS (som står for BioEnergy Carbon Capture and Storage). BECCS foregår på kraftvarmeverker, som opvarmer deres kedler med afbrænding af biomasse som træflis eller halm.

CO<sub>2</sub>'en i den røggas, der produceres under afbrændingen, fanges og kan derefter lagres. På den måde får man energi ud af biomassen og også en negativ udledning. Afbrænding af biomasse er dog meget udskaeldt, da det lægger beslag på arealer til produktion af "energi-afgrøder", som kunne være brugt til andre formål, for eksempel natur eller fødevarerproduktion.

Fangst af CO<sub>2</sub> er altså et centralt element i at opnå negative udledninger. Men heri ligger også udfordringen, da det desværre ikke er så ligetil at fange CO<sub>2</sub>. Det bringer os direkte tilbage til energien i det hele.

### Energien i det hele

Ifølge IPCC's beregninger er der behov for tekniske løsninger til reduktion, negative udledninger og netto-nul-løsninger. Inden 2030 bør størstedelen af reduktionerne komme fra udbygningen af sol- og vindenergi, hvilket udgør cirka 4 gigaton (Gt) for begge energityper. Dog skal der ifølge IPCC også findes næsten 1 Gt gennem fangst og lagring af CO<sub>2</sub> (CCS, Carbon Capture and Storage). På overfladen kan det virke som en smart idé, der kan løse klimaproblemet hurtigt. Men de eksisterende teknologier på området er meget energikrævende og stadig i en tidlig udviklingsfase.

**Ynderlige læsning.**  
IPCC 2018: Special Report: Global Warming of 1.5 °C.

Om carbon fjernelse: CDR Primer; skrevet af Holly Buck og Roger D. Aines, 2021: [cdrprimer.org/read](http://cdrprimer.org/read)

Remaining carbon budget; Carbon-clock: [www.mcc-berlin.net/en/research/co2-budget.html](http://www.mcc-berlin.net/en/research/co2-budget.html)

Populær formidling fra MIT: Climate Science, Risk & Solutions: [climateprimer.mit.edu](http://climateprimer.mit.edu)

Der er kun få fungerende anlæg på verdensplan, hvilket betyder, at teknologien stadig er ung. Derfor er det vigtigt, at vi i de kommende år opfører flere anlæg, så vi kan lære og reducere omkostningerne ved CO<sub>2</sub>-opsamling markant. Forskningen spiller en afgørende rolle i denne sammenhæng, da der er behov for meget mere forskning for at finde de bedste metoder og teknologier til forskellige situationer. Der er sjældent én universel løsning, så forskning er afgørende for at afdække de optimale tilgange.

Et eksempel, der illustrerer det store energibehov, er grøn produktion af metanol (CH<sub>3</sub>OH) – et brændstof, som kan bruges til tung transport i fremtiden. For at producere 1Gt metanol ud fra CO<sub>2</sub> skal der bruges 0,14 Gt hydrogen. Hydrogen bliver fremstillet ved spaltning af vand i elektrolyse, og for at producere 0,14 Gt hydrogen skal man tilføre vandet 6,710 TWh strøm. Det er rigtigt meget! Til sammenligning er USA's samlede energiforbrug om året lidt under 4000 TWh, så det vil altså kræve en mængde strøm

svarende til halvanden gang USA's samlede energiforsyning at producere blot et gigaton metanol. Og det skal vel at mærke være strøm fra vedvarende energi (i dag stammer kun 12,5% af USA's energiforsyning fra vedvarende energikilder). I Danmark har vi på grund af vindmøller og afbrænding af biomasse meget vedvarende energi i forhold til mange andre lande, og det er også en af grundene til, at vi kommer til at se mange af de såkaldte power-to-x (PtX) projekter i Danmark. Energiforbruget er nemlig ikke ens gennem alle døgnets timer og sæsoner, og nogle gange produceres mere, end vi forbruger. Det er derfor smart, at man kan producere brændstoffer og andre brugbare kemikalier med den grønne strøm, som er i overskud.

#### Vi skal vende strømmen!

I tusinder af år, siden tæmning af ilden, har menneskeheden fået sin energi fra carbon-forbindelser. Vi har udledt CO<sub>2</sub> fra biomasse og senere fra fossile kilder i en stadig større strøm af carbon til atmosfæren. Nu står vi over for en

presserende opgave med at omdirigere carbon-strømmen, så den går tilbage fra atmosfæren til biomasse og undergrunden. Det kræver, at vi frigør os fra vores afhængighed af fossile brændstoffer og skaffer enorme mængder energi for at vende processen om.

Heldigvis er forskere over hele verden engageret i at finde nye og innovative løsninger, der gør teknologierne nemmere, mere skalerbare, billigere og ikke mindst reducerer energiforbruget. Vi kan sammenligne vores situation med et budget, hvor vi som menneskehed skal investere i negative udledninger og smarte løsninger for at skabe mere tid – og vores valuta i denne sammenhæng er primært vedvarende energi.

Dog kan de teknologiske løsninger ikke redde os alene. Først og fremmest er det afgørende, at vi fokuserer på områder, hvor vi kan opnå betydelige reduktioner hurtigst muligt! Dette er ikke kun den mest omkostningseffektive tilgang, men også den mest levedygtige. ■

Roskilde Universitet

# Læs Naturvidenskabelig Bachelor

” Vi finder et problem, og så leder vi efter naturvidenskabelige metoder til at løse det.

Vi samarbejder fx med hospitaler om modeller for, hvor lang tid kroppen kan tåle behandling med strålingsterapi mod kræft.”

— Max har læst Naturvidenskabelig Bachelor

# MIKROORGANISMER OMDANNER MENNESKESKABT CO<sub>2</sub>

**Mikroorganismer kan hjælpe os med at omdanne CO<sub>2</sub> til nyttige molekyler som metan og eddikesyre, der kan indgå i vores carbonbaserede værdikæder. Derfor kan mikroorganismer få en vigtig rolle i mange Power-to-X-teknologier.**

**D**er er i dag et globalt fokus på at reducere den menneskelige udledning af CO<sub>2</sub> til atmosfæren. At dette er en kæmpestor udfordring bunder i, at hele vores økonomi overvejende er carbonbaseret, og carbon udgør byggestenen til alle organiske molekyler, vi omgiver os med, hvad enten det er fossile brændstoffer eller biobaserede produkter i form af foder, fødevarer, materialer og biobrændsler.

For at mindske de menneskeskabte CO<sub>2</sub>-udledninger, skal vi reducere vores brug af fossil carbon og i stedet bruge carbonbaserede produkter fra biomasse eller indfanget CO<sub>2</sub> fra eksempelvis biogas, røggas fra afbrænding af biomasse, cementproduktion eller direkte fra atmosfæren.

Der er imidlertid få anvendelsesmuligheder, hvor indfanget CO<sub>2</sub> har direkte nytte, og det er derfor vigtigt at forstå, at CO<sub>2</sub> i de fleste tilfælde skal genoplades (reduceres, som det hedder i kemiske termer) med energi for at have værdi. Carbon i CO<sub>2</sub> findes på den mest oxiderede form overhovedet, og der kan ikke trækkes yderligere energi ud af molekylet. Derfor må der tilføres energi for at fremstille nyttige molekyler som brændstof eller kemiske platformmolekyler af CO<sub>2</sub>.

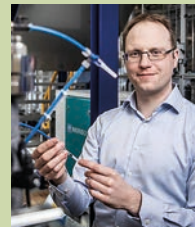
Det er her talen falder på "Power-to-X"-teknologier (PtX). Helt overordnet går Power-to-X ud på at omsætte elektrisk energi til kemisk energi. Den altdominerende teknologi til dette er i dag elektrolyse af vand (vandsplætning) til dioxygen (O<sub>2</sub>) og hydrogen (H<sub>2</sub>), hvor den kemiske energi ligger i H<sub>2</sub>-molekylet. H<sub>2</sub> kan

i visse tilfælde bruges direkte, men da samfundets etablerede værdikæder alt overvejende baserer sig på carbonbaserede produkter, er det vigtigt at kunne overføre den kemiske energi fra H<sub>2</sub> til CO<sub>2</sub> og dermed danne grundlaget for at kunne videreføre mange af vores carbonbaserede værdikæder selv i en fossilfri økonomi.

## Biologisk CO<sub>2</sub>-omsætning

Paletten af teknologier til CO<sub>2</sub>-omdannelse med H<sub>2</sub> er bred, men her vil vi særligt fokusere på de biologiske. Levende organismer bruger CO<sub>2</sub> primært med to formål. Enten til at opbygge biomasse eller til at ånde (respirere). Konceptet med at bruge CO<sub>2</sub> til at opbygge biomasse er mest kendt fra fotosyntesen, hvor planter med energi fra sollys omdanner CO<sub>2</sub> til glucose og videre til en lange række kom-

## Om forfatterne



Michael Vedel Wegener Kofoed er lektor, ph.d., ved Institut for Bio- og Kemiteknologi, Aarhus Universitet. Han er tilknyttet The Novo Nordisk Foundation CO<sub>2</sub> Research Center – CORC – og forsker i bioteknologi til løsninger indenfor energi og miljø, med fokus på omdannelse af CO<sub>2</sub> fra industrielle kilder. [mvk@bce.au.dk](mailto:mvk@bce.au.dk)



Lars Ditlev Mørck Ottosen er Professor og institutleder, ph.d., Institut for Bio- og Kemiteknologi, Aarhus Universitet. Han er tilknyttet The Novo Nordisk Foundation CO<sub>2</sub> Research Center - CORC. Han forsker i bioteknologi til løsninger inden for energi og miljø [ldmo@eng.au.dk](mailto:ldmo@eng.au.dk)



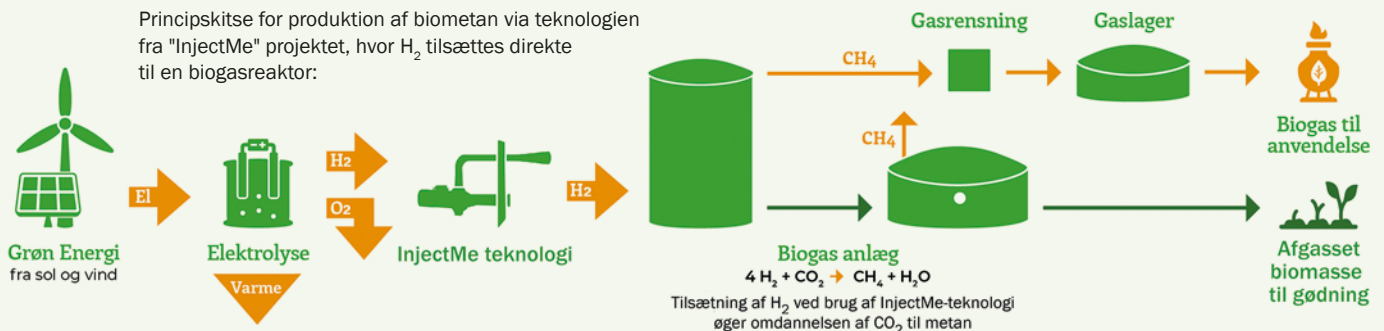
Fotos: Lars Kruse

## Metaniseringsprojekter

På Aarhus Universitet har vi udviklet metaniserings teknologi, sammen med den danske virksomhed Landia A/S, hvor hydrogen tilsættes direkte til en biogasreaktor. Teknologien udvikles på nuværende tidspunkt i projektet "InjectMe", der er et samarbejde med Landia A/S, University of Queensland og Aarhus Universitet og som støttes af Energistyrelsen (EUDP). På billedet (tv) ses den 30 m<sup>3</sup> store biogasreaktor, der danner rammen for en stor del af forsøgene i projektet.

I et andet projekt, APPLAUSE, udvikler vi metaniserings teknologi, hvor hydrogen og CO<sub>2</sub> tilsættes til en bioreaktor. Reaktoren på billedet (th) bruges til at omsætte CO<sub>2</sub> i biogas med hydrogen, dannet via elektrolyse af vand produceret fra elektrolyse-enheden til højre.

Principskitse for produktion af biometan via teknologien fra "InjectMe" projektet, hvor H<sub>2</sub> tilsættes direkte til en biogasreaktor:



plekse molekyler. Andre biologiske processer kræver ikke lys, frugtbar jord, vand og næringsstoffer, men omdanner CO<sub>2</sub> via kemisk energi. I denne kategori dominerer mikroorganismene. Igen skelner man mellem organismer, som primært bruger CO<sub>2</sub> til at opbygge biomasse via tilførsel af kemisk energi (de kaldes kemolithoautotrofe), og mikroorganismer, som bruger CO<sub>2</sub> som åndingsmiddel. De biomasseopbyggende mikroorganismer har typisk en energidannende proces adskilt fra den biomasseopbyggende proces. Et godt eksempel er knaldgas-bakterier, som oxiderer H<sub>2</sub> med O<sub>2</sub> og bruger noget af energien til at fiksere CO<sub>2</sub> til opbygning af biomasse under anvendelse af principper for CO<sub>2</sub>-omdannelse, som også findes i fotosyntesen. Produktet fra de CO<sub>2</sub>-optagende processer er typisk rå biomasse bestående af forskellige komplekse molekyler,

som eksempelvis kan bruges i foder og fødevareræddikæder.

I forhold til respiration findes der mikroorganismer, der ånder med CO<sub>2</sub> i stedet for O<sub>2</sub>. Det kræver en lidt nærmere forklaring. Vi mennesker, og alle andre organismer baseret på eukaryote celler (celler med en cellekerne), får groft sagt energi ved at forbrænde kulhydrat med O<sub>2</sub> (aerob respiration). Bio-kemisk omorganiseres elektroner fra carbonet i kulhydrat til oxygenet, og de resulterende produkter er CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O samt kemisk energi til organismens livsprocesser. I oxygenfrie miljøer kan nogle mikroorganismer udnytte andre oxiderede stoffer som nitrat, jernforbindelser eller CO<sub>2</sub> i stedet for oxygen (anaerob respiration). Et godt eksempel på en naturlig proces, hvor mikroorganismer spiser hydrogen og ånder med CO<sub>2</sub>, er metandannelse.

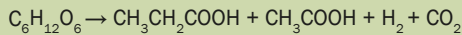
Denne energigivende proces består i, at disse mikroorganismer (kaldet metanogener) bruger elektroner fra H<sub>2</sub> til at reducere CO<sub>2</sub> til H<sub>2</sub>O og CH<sub>4</sub> via komplekse stofskifteprocesser. En anden nyttig proces i samme kategori er den acetogene proces, hvor mikroorganismer (kaldet acetogener) via cellulære processer danner eddikesyre (CH<sub>3</sub>COOH) fra H<sub>2</sub> og CO<sub>2</sub>.

### Industriell anvendelse af metanogener og acetogener

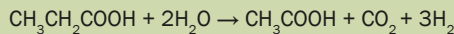
Forskere arbejder på at udnytte både metanogener og acetogener til produktion af henholdsvis metan og eddikesyre via CO<sub>2</sub> fra industrielle kilder. Disse mikroorganismer findes i både naturlige og tekniske systemer, for eksempel i oxygenfrie zoner i søbunde (ferskvandssedimentet), hvor de blandt andet medvirker til at omsætte det organiske materiale, der kommer fra døde alger og dyr. En del af de bobler, man ser fra

## Mikrobiologi i biogasreaktoren

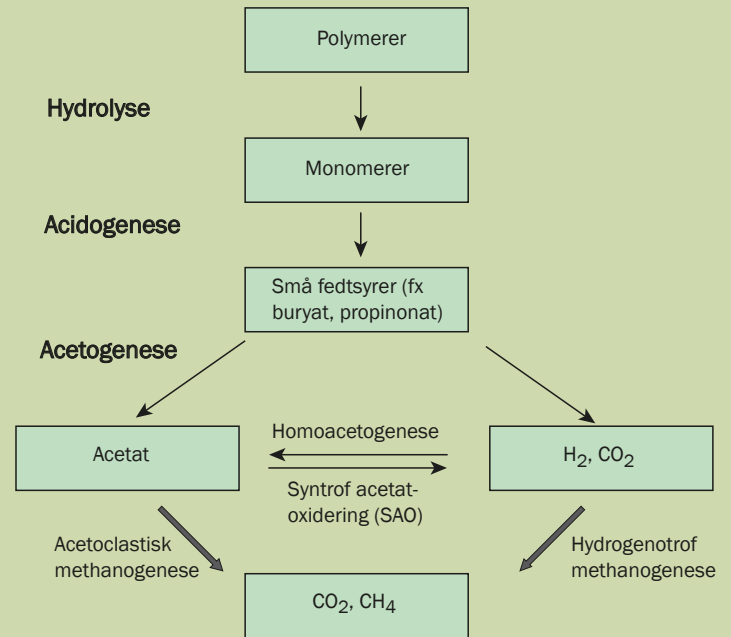
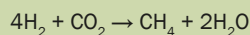
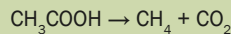
Processen i en biogasreaktor består af flere trin, der alle katalyseres af mikroorganismer. Under hydrolysen nedbrydes makromolekylernerne til deres enkeltkomponenter. Kulhydrater nedbrydes eksempelvis til di- og monosakkarider. Denne proces sker via enzymer, der udskilles af mikroorganismene i biogasreaktoren. Monomererne kan efterfølgende omdannes til små fedtsyrer igennem mikrobiologiske fermenteringsprocesser (acidogenese). Der foregår mange forskellige fermenteringsprocesser i reaktoren. Her ses et eksempel på omdannelse af glukose til propionsyre og eddikesyre m.m.:



De små fedtsyrer kan nedbrydes videre til eddikesyre (acetat), hydrogen og CO<sub>2</sub>, via endnu et fermenteringstrin (acetogenese). Herunder ses eksempelvis på nedbrydning af propionsyre til eddikesyre, hydrogen og CO<sub>2</sub>.



Afhængig af forholdene i reaktoren kan eddikesyre omdannes til hydrogen og CO<sub>2</sub>, men H<sub>2</sub> og CO<sub>2</sub> kan også omdannes til eddikesyre. De ovenstående trin katalyseres alle af bakterier, mens det sidste trin i omdannelsen af H<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> og eddikesyre til metan katalyseres af en anden gruppe mikroorganismer, nemlig arkæer (Archaea).



Mikrobielle trin involveret i nedbrydningen af organisk materiale til biogas.

Den endelige sammensætning vil blandt andet afhænge af, hvilke typer biomasse der i starten blev tilsat til reaktoren. Men koncentrationen af metan i biogassen ud af reaktoren vil normalt være 55-60%, med cirka 40-45% CO<sub>2</sub>. Ud over metan og CO<sub>2</sub> vil gassen også indeholde ammoniak og svovlholdige gasser (primært svovlbriente).

sedimentet, er bobler af metan, der produceres af metanogener.

Metanogener og acetogener findes også i tarmsystemet hos mennesker og dyr. I klima-sammenhæng er der her fokus på metan-emission fra gylle eller fra køer, fordi metanogener i køernes tarmsystem producerer metan, der udledes til atmosfæren via køernes bøvser. Metanogener og acetogener bruges dog også aktivt i biogasindustrien, hvor de producerer metan, der kan anvendes i stedet for fossil naturgas. De processer, der sker i biogasreaktorer, minder på mange måder om, hvad der sker i koens vom. Processen kaldes anaerob nedbrydning, fordi den involverer nedbrydning af biologiske materialer (biomasser) uden tilstedeværelse af oxygen. Der er i dag bygget biogasanlæg, som omsætter forskellige typer biomasse, der tidligere er blevet

anset som affaldsprodukter, men som i dag betragtes som ressourcer. Disse inkluderer blandt andet husdyrgødning fra landbruget, slam fra renseanlæg, affaldsprodukter fra fødevarerindustrien og organisk husholdningsaffald.

Under produktionen af biogas pumpes biomasse ind i store reaktorer, hvor en stor del af det organiske materiale i løbet af nogle uger nedbrydes til biogas – en blanding af CO<sub>2</sub> og metan. Metanogenerne, der producerer metanen, kan ofte kun nedbryde små molekyler som H<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, eddikesyre eller andre små organiske molekyler. De kan derfor ikke direkte nedbryde den biomasse, som tilsættes til biogasreaktoren, som ofte består af lange kæder af organiske molekyler (polymerer) i form af cellulose, proteiner eller andre store molekyler (makromolekyler) som fedtstoffer.

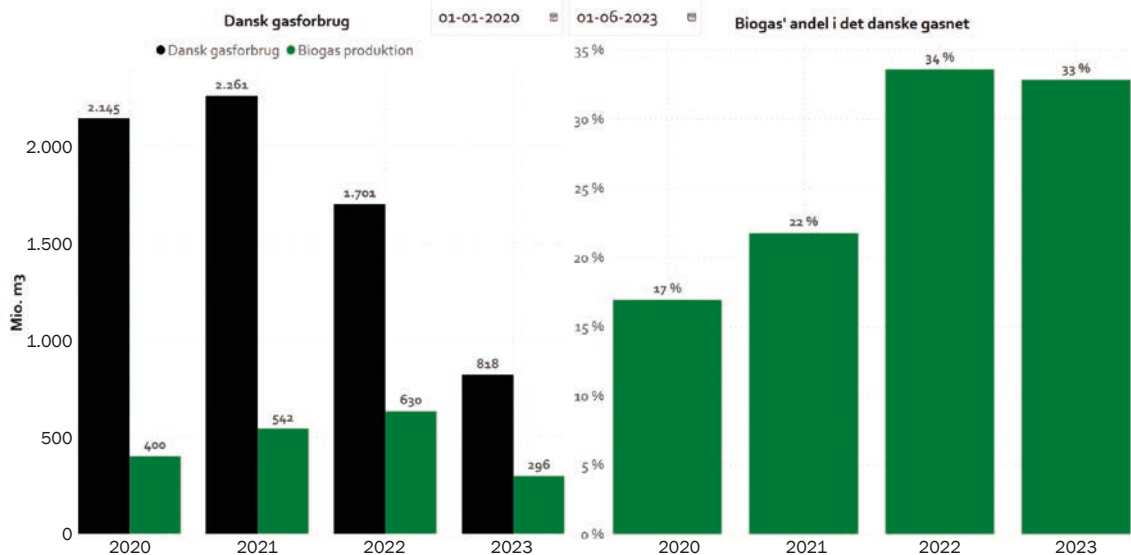
Disse stoffer skal derfor nedbrydes til mindre molekyler, før metanogenerne kan bruge dem.

Mikroorganismene får energi ud af fermenteringsprocesserne og metanogenesisen. Denne energi bruger mikroorganismene til forskellige cellulære processer, herunder vedligeholdelse af deres cellulære maskineri og formering. Selvom der i biogasreaktorer hele tiden tilføjes og fjernes organisk materiale, er der ikke brug for at tilsætte nye mikroorganismer, fordi de formerer sig i reaktoren.

### Biologisk metanisering via hydrogen

Tidligere var den mest almindelige praksis at afbrænde biogassen i en kedel eller motor for at kunne få varme og elektricitet. I dag opgraderer moderne biogasanlæg biogassen til en kvalitet lig den,

Andel af biogas i det danske naturgasnet.  
Kilde: Energinet Data Service: Storage utilization og Storage available capacity, juni 2023.



**Kilder / videre læsning**  
Angelidak, I., Treu, L., Tsapekos, P., Luo, G., Campanaro, S., Wenzel, H., Kougias, P.G., 2018. Biogas upgrading and utilization: Current status and perspectives. *Biotechnol. Adv.* 36, 452–466. doi.org/10.1016/j.biotechadv.2018.01.011

Demirel, B., Scherer, P., 2008. The roles of acetotrophic and hydrogenotrophic methanogens during anaerobic conversion of biomass to methane: A review. *Rev. Environ. Sci. Biotechnol.* 7, 173–190. doi.org/10.1007/s11157-008-9131-1

Energinet, 2023. Nøgletal om den grønne omstilling. URL: [energinet.dk/energidata/status-pa-gron-energi/nogletal-om-den-gronne-omstilling/](https://energinet.dk/energidata/status-pa-gron-energi/nogletal-om-den-gronne-omstilling/)

Jensen, M.B., Ottosen, L.D.M., Kofoed, M.V.W., 2021. H<sub>2</sub> gas-liquid mass transfer: A key element in biological Power-to-Gas methanation. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 147, 111209. doi.org/10.1016/j.rser.2021.111209

Kofoed, M.V.W., Jensen, M.B., Ottosen, L.D.M., 2021. Biological upgrading of biogas through CO<sub>2</sub> conversion to CH<sub>4</sub>, in: Aryal, N., Ottosen, L.D.M., Kofoed, M.V.W., Pant, D. (Eds.), *Emerging Technologies and Biological Systems for Biogas Upgrading*. Elsevier Inc., pp. 321–362. doi.org/10.1016/B978-0-12-822808-1.00012-X

man finder i fossil naturgas (>95% metan). Denne gas kan bruges til at erstatte vores nuværende forbrug af fossil naturgas, til gavn for både klima og forsyningsikkerhed, så man ikke er afhængig af naturgas fra andre lande. Biogassektoren er i dag voksende i både Danmark og resten af Europa. Andelen af biometan på naturgasnettet har derfor også være stigende de sidste par år og udgjorde i 2022 34% af gassen på naturgasnettet.

Den konventionelle opgradering af biogas til naturgaskvalitet benytter separation af metan fra CO<sub>2</sub>, hvor metanen oprenses og injiceres på naturgasnettet, mens CO<sub>2</sub>'en udledes til atmosfæren. Både forskere og virksomheder arbejder i dag på både kemiske og biologiske teknologier, der kan bruges til at omdanne denne CO<sub>2</sub> til andre produkter i stedet for at udlede den til atmosfæren.

På Aarhus Universitet arbejder vi blandt andet på at udvikle løsninger, hvor man bruger de metanogene mikroorganismer, der allerede er til stede i biogasreaktoren til at omdanne CO<sub>2</sub> i biogassen til endnu mere metan. Dette kan eksempelvis gøres ved at tilsætte H<sub>2</sub> til reaktoren, så man hermed stimulerer metanogenerne til at omsætte endnu mere af CO<sub>2</sub>'en til metan.

Som udgangspunkt virker processen simpel. En vigtig del af udviklingsarbejdet er dog at studere, hvordan tilsætning af den ekstra

hydrogen påvirker de komplekse biologiske processer i reaktoren, samt hvordan man kan tilsætte så store mængder hydrogen, som der er behov for. Sidstnævnte er en fælles udfordring for de biologiske processer, da hydrogen har en meget lav opløselighed i væske. En vigtig del af teknologiudviklingen er derfor at designe systemer, der understøtter overførsel af store volumener af denne uopløselige gas til mikroorganismene, der findes i reaktorens væske. Vi arbejder med forskellige tilgange til denne problemstilling, både i laboratorierne i Aarhus og på Aarhus Universitets testfacilitet på Campus Viborg (Se faktaboks om metaniseringprojekter).

### Mikroorganismer til omdannelse af CO<sub>2</sub> fra røggasser

Vi arbejder også på løsninger, der ikke er direkte koblet til biogas, men kan bruges til at omsætte CO<sub>2</sub> fra andre kilder, overvejende røggasser fra forbrænding. Reaktorerne kan have forskellige designs og driftsforhold, men benytter stadig mikroorganismer, man naturligt vil kunne finde i biogasreaktorer.

Selvom biogas er ideelt til biometanisering via tilsat H<sub>2</sub>, fordi det allerede har et højt indhold af metan og CO<sub>2</sub> og ikke indeholder oxygen, der er giftigt for mikroorganismene, så udgør biogas kun en lille del af den CO<sub>2</sub>, der i dag produceres ved menneskelig aktivitet. Her udgør CO<sub>2</sub> fra røggasser dannet ved for eksempel forbrænding en langt større

del. Således udgjorde den globale udledning af CO<sub>2</sub> i 2021 ifølge det internationale energiagentur (IAE) 36,3 Gigaton fra energiproduktion alene. I modsætning til biogas indeholder røggasser dog store koncentrationer af oxygen og nitrogenforbindelser, mens CO<sub>2</sub>'en kun udgør cirka 8-15% afhængig af brændstof og forbrænding. Både mængden og sammensætningen udgør en signifikant udfordring. Forskere over hele verden arbejder i dag på udvikling af forskellige teknologier til at løse netop dette. Andre forskere undersøger desuden muligheden for at fange CO<sub>2</sub> direkte fra luften. Dette udfordres af den lave koncentration af CO<sub>2</sub> i luft i forhold til koncentrationen i biogas og røggas.

Mikroorganismer har potentialen til at udgøre en vigtig del af fremtidige løsninger til omdannelse af CO<sub>2</sub>. Opgaven består i at forstå mikroorganismernes livsprocesser og krav til ideelle vækstbetingelser og på det grundlag designe og konstruere en teknologi omkring dem, som bedst muligt understøtter deres aktivitet og giver den mest effektive omsætning af CO<sub>2</sub>. De menneskelige udledninger af CO<sub>2</sub> kombineret med vores enorme behov for carbon-baserede kemikalier og brændstoffer betyder dog, at der ikke kun er én løsning på denne globale udfordring. Der er brug for alle tænkelige realistiske teknologier. Fremtidige løsninger vil derfor sandsynligvis være baseret på teknologier både med og uden biologi og i forskellige kombinationer. ■





# DIT STUDIEVALG KRÆVER TID – OG LIDT HJÆLP

Vil du uddanne dig inden for naturvidenskab, har du mange valgmuligheder. På KU kan du få hjælp til dit studievalg på flere måder.

Du kan blandt andet:

- Tage et Uddannelsesstjek
- Få vejledning hos KU Studentercenter
- Gå i studiepraktik
- Blive studerende for en dag
- Se film om uddannelserne

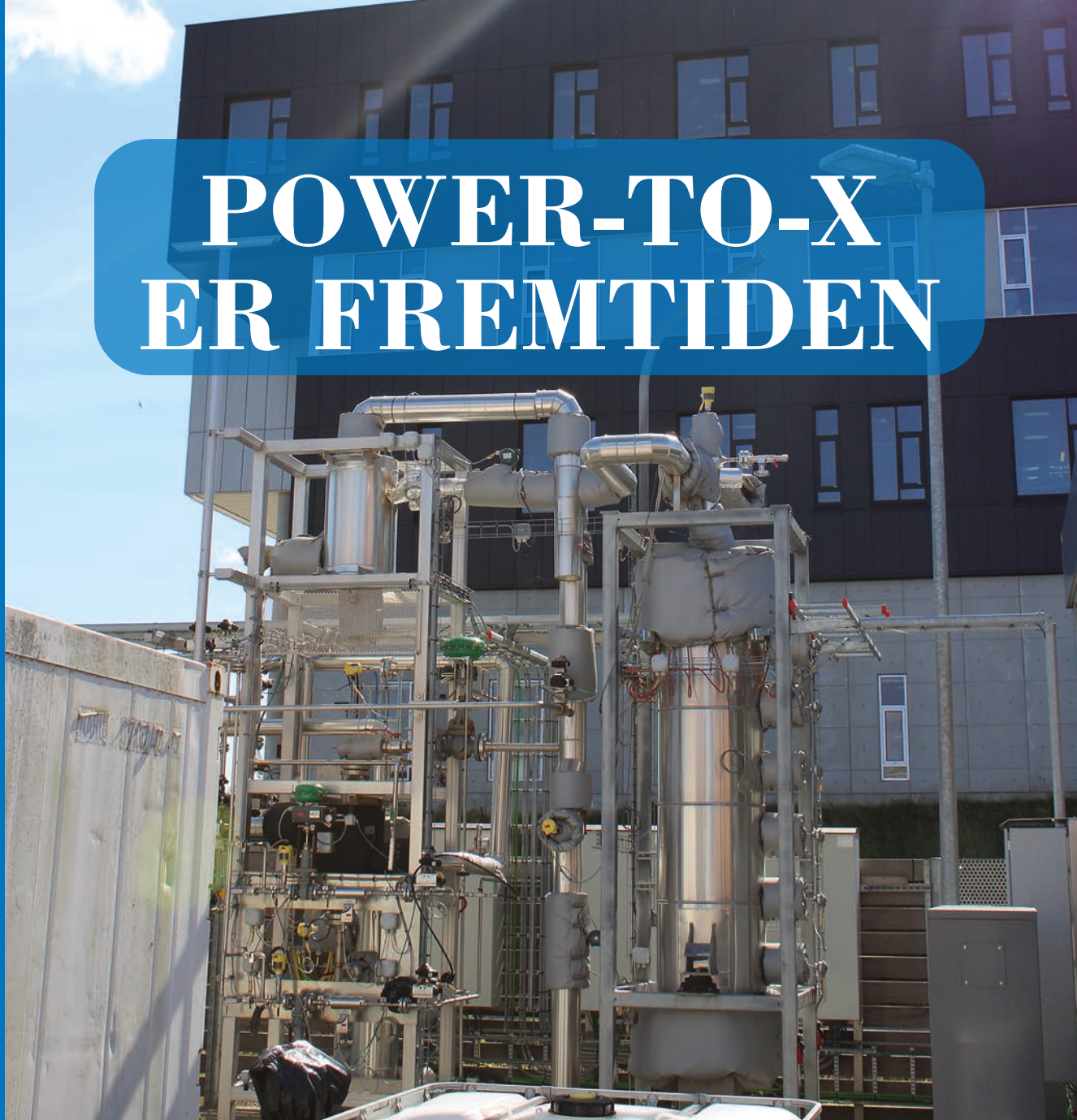
*Læs mere om vores naturvidenskabelige uddannelser og dine muligheder på*

**[studier.ku.dk/science](https://studier.ku.dk/science)**



KØBENHAVNS  
UNIVERSITET

# POWER-TO-X ER FREMTIDEN



Pilotanlæg til produktion af metanol på Aalborg Universitet. Anlægget kan producere cirka 220 tons metanol om året. Der vil altid være et energitab ved at omsætte en energiform til en anden. Et groft skøn over effektiviteten i dette anlæg er 41-68 %, som er et produkt af tre forskellige komponenter: elektrolyse-effektivitet (70-80%) X hydrogenkomprimering (85-95%) X metanolproduktion (70-90%) = 41-68%. Men effektiviteten afhænger af mange faktorer, og der er også andre tab i systemet end de her nævnte. Foto: Samuel Simon Araya

Om forfatteren  
Kristian Sjøgren er  
videnskabsjournalist,  
ksjoegren@gmail.com

Om forskeren



Samuel Simon Araya er lektor, ph.d., ved AAU Energy og leder af Fuel Cell Systems-forskningsgruppen på Aalborg Universitet. Han forsker i eksperimentel karakterisering og modellering af elektrokemiske energikonverteringsenheder, især PEM-brændselsceller og elektrolyser. Hans fokus er at forbedre brint- og brændselscelleløsninger samt produktion af e-brændstoffer via power-to-X-teknologier. ssa@energy.aau.dk

**Power-to-X handler om at udnytte overskudselektricitet til nyttige formål, hvor det første skridt mod X'et altid er omdannelsen af elektrisk energi og vand til hydrogen. Danmark er med helt fremme indenfor udviklingen af fremtidens energiløsninger med power-to-X.**

**F**remtiden kræver i den grad nye energiløsninger. Og rundt om i verden forskes der intenst i udvikling og implementering af nye energiløsninger, der i stedet for energiafhængighed af "sort guld" fra undergrunden fokuseres på udvikling og implementering af de energiformer, der er rigeligt af, fordi de er vedvarende. Her taler vi om

vind-, sol- og vandenergi. En lysende stjerne på himlen indenfor de interessante energiløsninger er power-to-X, der i store træk går ud på at bruge vedvarende energiressourcer til ikke bare at varme vores huse op, tænde lys i vores lamper og føre vores elektriske biler fremad, men også til at lave brændstoffer til transportsektoren og kemikalier til alle tænkelige industrier på en

klimavenlig og politisk ukompliceret måde.

Faktisk er Danmark førende indenfor udviklingen af power-to-X-teknologier, og lektor Samuel Araya fra AAU Energy på Aalborg Universitet mener, at hele verden snart kommer til at kigge mod vores lille land for at finde løsninger på globale problemstillinger.

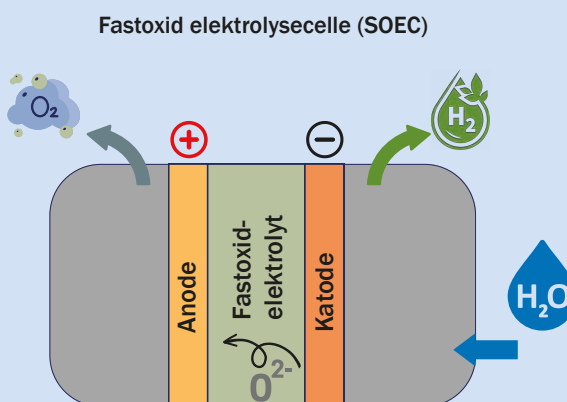
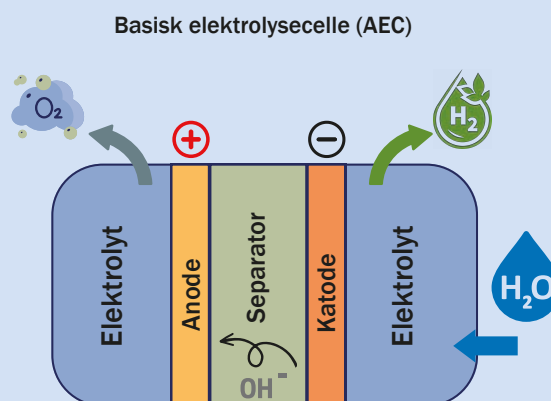
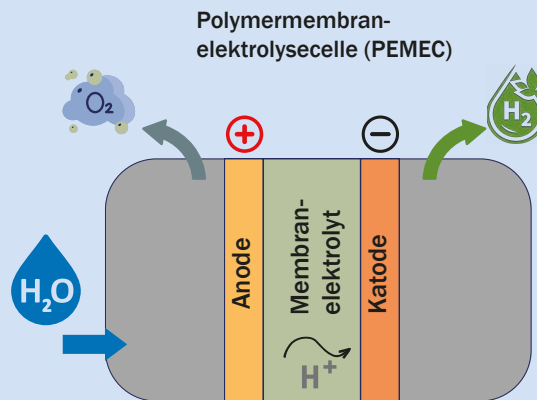
## Elektrolyse er hjørnестenen i power-to-X

Elektrolyse spiller en afgørende rolle i Power-to-X-konceptet, hvor ved elektricitet omdannes til forskellige energiformer og kemiske brændstoffer. Elektrolyse er en elektrokemisk proces, hvorved en ikke-spontan reaktion drives ved anvendelse af en ekstern elektrisk strøm. I Power-to-X-systemer anvendes elektrolyse til at producere hydrogen (H<sub>2</sub>) eller andre hydrogenbaserede brændstoffer, for eksempel metan (CH<sub>4</sub>), metanol (CH<sub>3</sub>OH) eller ammoniak (NH<sub>3</sub>), ved at udnytte vand (H<sub>2</sub>O) som kilde til at lave hydrogen.

Den typiske elektrolysecelle består af to elektroder – en anode og en katode – nedsænket i en elektrolytopløsning. Ved hjælp af en ekstern strømkilde tilføres en positiv ladning til anoden og en negativ ladning til katoden. Ved anoden opstår oxidation, hvor vandmolekyler dekomponeres til oxygen (O<sub>2</sub>) og en positivt ladet hydrogenion (H<sup>+</sup>). Denne proces kaldes anolyse. Ved katoden opstår reduktion, hvorved hydrogenionerne (H<sup>+</sup>) fra anolysen og elektronerne fra den eksterne strømkilde reagerer og danner hydrogen (H<sub>2</sub>). Denne proces kaldes katolyse.

Der findes to hovedtyper af elektrolyseceller: Basiske (alkaliske) elektrolyseceller (AEC) anvender en basisk elektrolyt som kaliumhydroxid (KOH) eller natriumhydroxid (NaOH), mens Polymermembran-elektrolyseceller (PEMEC) anvender en polymermembran som elektrolyt, for eksempel en perfluorosulfonsyre-membran. PEMEC er mere velegnet til Power-to-X-anvendelser på grund af dens højere effektivitet, hurtigere respons til skift i elektricitet og muligheden for at arbejde ved højere tryk. Foruden de nævnte hovedtyper findes der også andre nyere elektrolyseceller, blandt andet SOEC (solid oxide electrolyzer cell), der anvender keramiske fastoxidmaterialer som elektrolyt.

Elektrolyse i Power-to-X-konceptet muliggør lagring og omdannelse af overskudsstrøm fra vedvarende energikilder som sol- og vindenergi. Brugen af hydrogenbaserede brændstoffer som output giver mulighed for langtidslagring og transport af energi på en effektiv måde. De producerede brændstoffer kan anvendes som brændstof til brændselsceller, genindføres i naturgasnettet eller anvendes som råmateriale til kemisk produktion. Den kontinuerlige forskning og udvikling indenfor elektrolysefelter såsom elektrodekatalyse, membranmaterialer og systemoptimering har bidraget til at forbedre effektiviteten og reducere omkostningerne ved elektrolyseprocessen. Overgangen til bæredygtige og klimavenlige energisystemer afhænger i høj grad af den videre udvikling af elektrolyseteknologier og integrationen med Power-to-X-konceptet.



»Selvom det går langsomt med udviklingen af power-to-X-teknologier og implementeringen af dem i verden, er jeg optimistisk på Danmarks vegne. Vi er gode til at investere i disse teknologier, og der er politisk opbakning, ligesom vi allerede nu er ved at implementere power-to-X i en række projekter. Det vil bringe Danmark i en gunstig position inden for kommercialisering

af power-to-X-teknologi og bringe os tættere på målet om at blive klimaneutral«, fortæller Samuel Araya.

### Hydrogen er en hjørnестen i power-to-X

Power-to-X i en klimavenlig sammenhæng er helt simpelt muligheden for at benytte elektricitet fra vedvarende energiformer fra vind, sol og hav til at lave alt muligt

andet, som kan bruges i en lang række applikationer og inden for en lang række industrier.

For eksempel kan power-to-X være, at man benytter overskuds-elektricitet fra vindmøller til at drive den kemiske proces, som trækker hydrogen (brint) ud af vand. Processen hedder elektrolyse og er den bærende bjælke i hele

power-to-X-tankegangen. Hydrogen kan lagres direkte i tanke og for eksempel bruges i transportindustrien til at drive biler fremad, eller det kan omdannes til andre former for brændstoffer til fly eller skibe. På den måde kan overskudselektricitet opbevares og udnyttes fremfor at gå til spilde.

Samuel Araya forklarer, at power-to-X altid har omdannelsen af elektrisk energi og vand til hydrogen som det første skridt mod X'et. Herefter er mulighederne nærmest uendelige.

»Med power-to-X kan man som eksempel lave metanol, som Mærsk benytter i deres nyeste skibe som e-fuel. Danmark har blandt andet stort fokus på netop at benytte power-to-X til at lave bæredygtig metanol med et mindre klimaaftryk. Man kan også lave bæredygtigt flybrændstof eller plastik eller andre kemiske komponenter til brug i industrien. I rigtig mange sektorer har man brug for forskellige energiformer, der ikke kan erstattes med vindenergi, men hvor vindenergien kan udnyttes til at omdanne vand til hydrogen til de energiformer, der er behov for,« siger han.

Power-to-X kan også spille en stor rolle indenfor fjernvarme. Danmark er et af de lande i verden med det mest veludviklede fjernvarmenet, og netop fjernvarmenettet har en unik mulighed for at opsamle det betydelige energispild, der er ved de vedvarende energiformer og ved power-to-X, hvor op imod 25 procent af energien ved elektrolysen bliver

omdannet til varmeenergi. Den energi risikerer at forsvinde ud i det rene ingenting, men kan opfanges og udnyttes til at holde huse varme om vinteren.

Selvom der fortsat er store usikkerheder omkring, hvor etableret power-to-X bliver i Danmark, viser forskellige fremskrivninger, at overskudsvarme fra elektrolysen i power-to-X-anlæg kan dække op imod 20 procent af det danske behov for fjernvarme. Som eksempel er det på tapetet i Aalborg at bygge et power-to-X-anlæg, der foruden at producere 130.000 tons metanol årligt også skal forsyne Aalborg Kommune med 130 GWh overskudsvarme, hvilket er nok til at dække syv procent af kommunens behov og opvarme 5.000 husstande. Anlægget forventes færdigbygget i 2028.

### God udnyttelse af overskudsenergi

En helt central komponent i power-to-X-tankegangen er, at den energi, som går ind i elektrolysen, er overskudsenergi. I Danmark har vi som eksempel ofte overskud af elektricitet fra vindmøller. Det sker ikke overraskende på dage med meget vind, og på de dage forsøger vi at sælge vores overskudselektricitet til vores nabolande. I fald at de ikke har behov for den elektricitet, som vi gerne vil sælge, lukker vi vindmøllerne ned. Andre lande kan have overskud af solenergi eller havenergi og står med lignende problemer.

Tanken bag power-to-X er, at når der er overskudselektricitet i netværket,

og når den overskudselektricitet kommer fra sol, vind og hav, skal vi ikke lukke ned for vindmøller og solcelleanlæg, men derimod sende elektriciteten i retning af elektrolyseanlæg, der kan lave den om til hydrogen. I modsætning til elektricitet, som ikke for nuværende kan opbevares på en meningsfuld måde, kan man nemlig opbevare hydrogen meget let, indtil der er behov for det.

Ifølge Samuel Araya handler power-to-X ikke bare om at bruge elektricitet mere smart. Det er faktisk en decideret nødvendighed, hvis vi overhovedet skal have en chance for at reducere vores CO<sub>2</sub>-udledning med 70 procent inden 2030 og blive klimaneutrale inden 2050.

»Derfor skal vi ikke bare se på kapaciteten af den vedvarende energi, som vi producerer i dag, og som kun nogle dage er i overskud i form af ekstra elektricitet. Vi skal også udbygge netværket af vedvarende energi, så vi ikke kun tænker power-to-X som en løsning på et overskudsproblem, men tænker i at forsyne power-to-X specifikt. Lige nu giver det kun mening at køre power-to-X, når der er meget vind, mens det ikke gør det, når der ikke er vind. Vores energinetværk skal være af en sådan kapacitet, at det hele tiden giver mening at køre power-to-X,« siger Samuel Araya.

### Danmark har fokus på produktion af metanol

I Danmark har forskning og investorer haft et særligt øje til udvikling af power-to-X-teknologi til at lave metanol og de relevante produktionsfaciliteter. Vi har således allerede i dag produktionsfaciliteter, der kan lave i omegnen af 220.000 ton metanol om året. Der er dog blot tale om et demonstrationsanlæg, og tallet blegner da også lidt i forhold til den mængde metanol, der skal bruges i verden, hvilket er flere hundrede millioner tons.

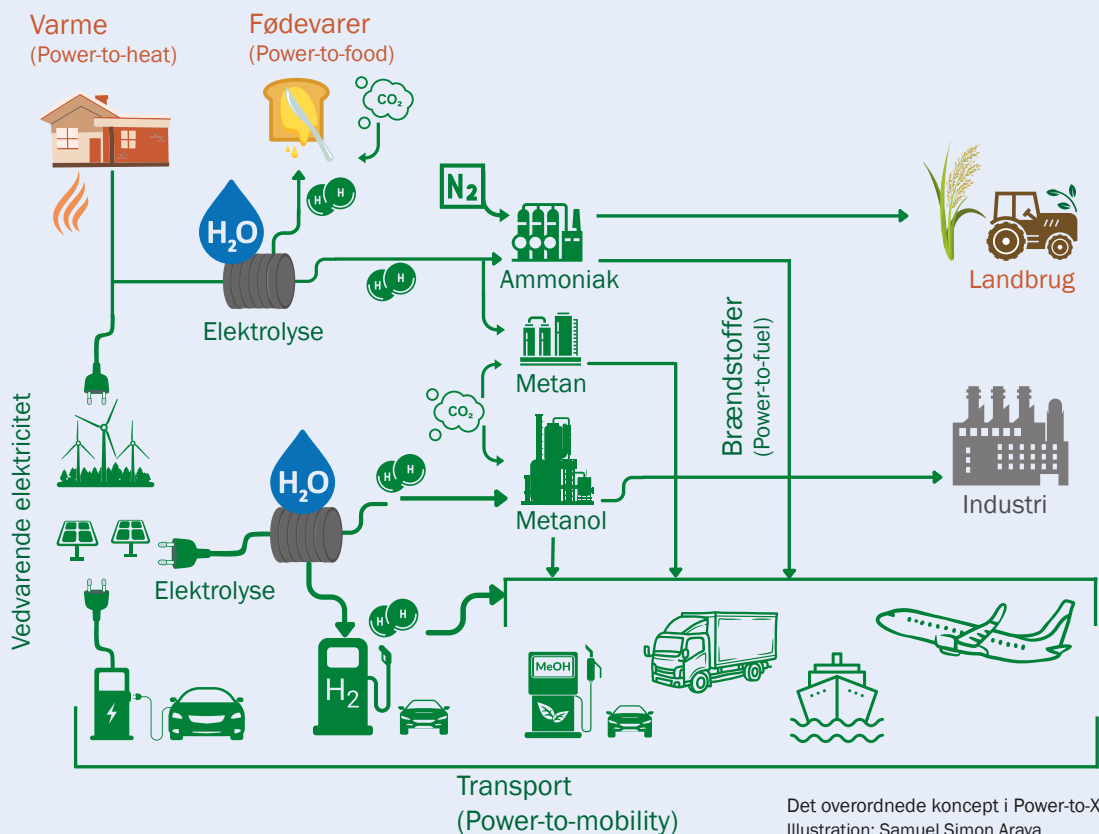
Metanol bliver blandt andet brugt i alt fra køleelementer i køleskabe til brændstof og indenfor produk-

## 44 aktive projekter:

I Danmark er der for nuværende 44 aktive projekter inden for produktion eller forbrug af power-to-X-løsninger. Den samlede hydrogenproduktionskapacitet i projekter allerede i drift er på 2,41 MW, og 1.266 personer er ansat inden for power-to-X-projekterne. I øjeblikket overgår Danmarks produktionskapacitet vores forbrugskapacitet, hvilket betyder, at Danmark eksporterer det meste af det brændstof, som bliver produceret på danske power-to-X-anlæg. Det drejer sig blandt andet om hydrogen, e-metanol, e-ammoniak og e-kerosen (flybrændstof).

Kilde: Hydrogenbranchen

## Potentielle anvendelser af power-to-X



### Brændstoffer til transportsektoren:

Power-to-X-teknologier kan bruges til at producere brændstoffer, der kan erstatte fossile brændstoffer i transportsektoren. Hydrogen kan anvendes som brændstof til brændselsceller eller blandes med naturgas og anvendes i brændstofceller. Derudover kan syntetiske brændstoffer som metan og metanol også fremstilles ved elektrolyse og anvendes i køretøjer med forbrændingsmotorer.

### Energilagring:

Power-to-X-teknologier muliggør lagring af overskudsenergi i form af hydrogen eller syntetiske brændstoffer. Denne lagring giver fleksibilitet til at udjævne variationer i energiforsyningen og sikre en stabil forsyning af elektricitet. Brændstofferne kan senere omdannes til elektricitet igen ved hjælp af brændselsceller eller forbrændes i kraftværker.

### Industrielle anvendelser:

Power-to-X-teknologier har potentialet til at forsyne industrien med bæredygtige og CO<sub>2</sub>-neutrale råmaterialer. For eksempel kan hydrogen anvendes som rengøringsmiddel eller i kemiske processer, mens syntetiske brændstoffer kan bruges som råmateriale til produktion af plastik, kemikalier og andet i industrier, der normalt er afhængige af fossile brændstoffer.

### Power-to-Gas:

Power-to-X kan integreres i gasnettet ved at injicere

hydrogen eller metan, der er produceret ved elektrolyse, direkte i det eksisterende naturgasnet. Denne konverteringsproces kaldes Power-to-Gas. Det muliggør energilagring og distribution af vedvarende energi i stor skala og kan udnyttes til opvarmning, elektricitetsproduktion eller transport.

### Elektricitetsproduktion:

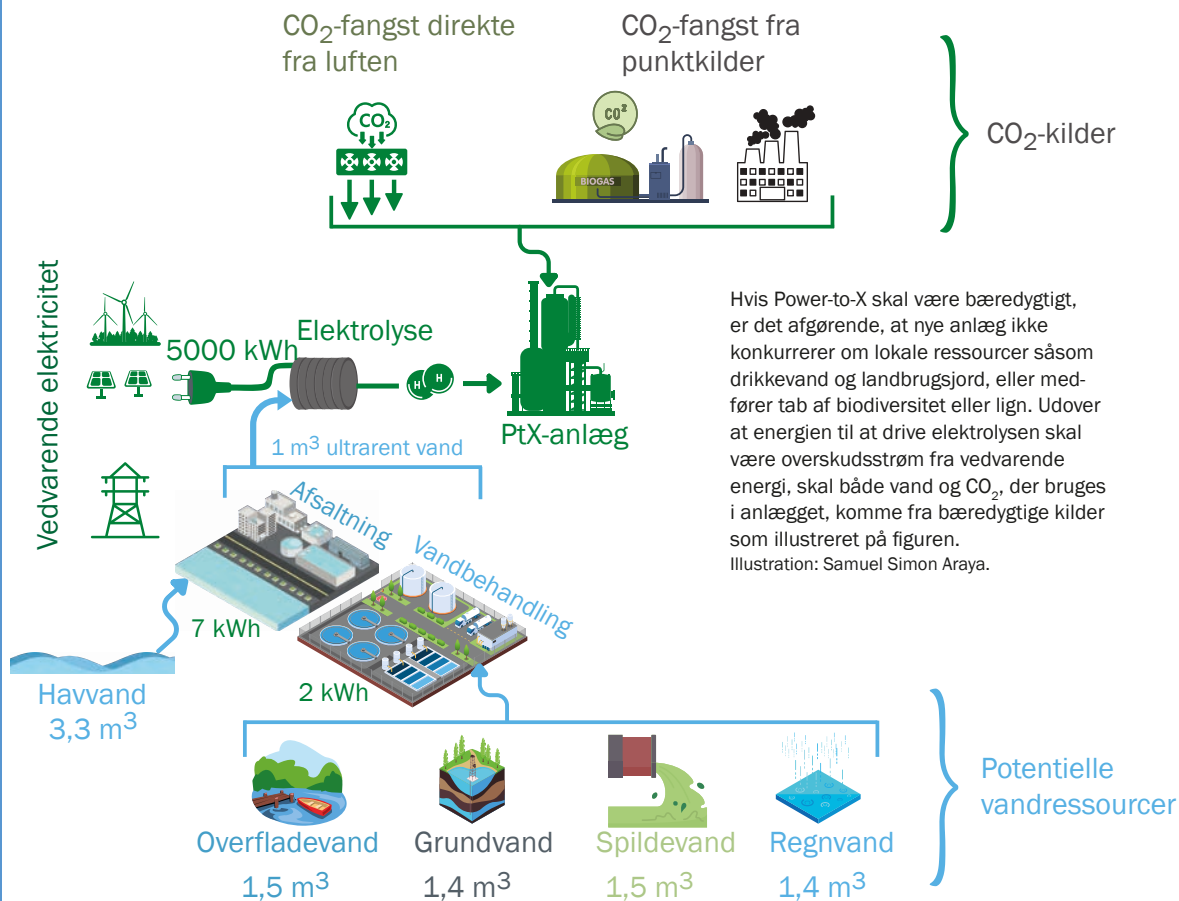
Power-to-X kan også bidrage til elektricitetsproduktion ved at omdanne hydrogen tilbage til elektricitet gennem brændselsceller. Denne metode kan anvendes i mikro-grids eller som backup-kraftværker, hvilket øger fleksibiliteten og pålideligheden af energiforsyningen.

### Landbrugssektoren:

Power-to-X-teknologier kan have gavnlig anvendelse i landbrugssektoren. Brændselsceller, der anvender hydrogen produceret ved elektrolyse, kan levere elektricitet og varme til gårde og gartnerier. Derudover kan syntetisk ammoniak produceret ved elektrolyse anvendes som gødning.

### Off-grid og fjerntliggende områder:

Power-to-X-teknologier kan være en gamechanger for off-grid og fjerntliggende områder uden adgang til stabil elektricitet. Ved at udnytte vedvarende energikilder som sol og vind kan Power-to-X levere en pålidelig energikilde, der kan forsyne samfund og industrier med elektricitet og brændstoffer, uafhængigt af traditionelle energinet.



Videre læsning  
 Rapport om Power to X fra Aalborg Universitet:  
 Simon Araya, Samuel; Cui, Xiaoti; Li, Na; Liso, Vincenzo; Sahlin, Simon Lennart (2022): Power-to-X Technology overview, possibilities and challenges. AAU.

tionen af forskellige kemikalier til brug i blandt andet landbruget. Samuel Araya arbejder selv med udvikling af brændselsceller, der kører på metanol, og som kan lave elektricitet på steder væk fra elektricitetsnetværket. Metanol kan også bruges til at lave andre typer af brændstoffer som e-diesel eller e-brændstof til fly.

Grøn metanol er dog omkring dobbelt så dyr som tilsvarende metanol fra undergrunden, og derfor er der ifølge Samuel Araya behov for politiske tiltag, så power-to-X ikke skal konkurrere med sorte løsninger og tabe den konkurrence. Det kan for eksempel være ved, at det skal koste mere at forbrænde metanol fra fossile kilder sammenlignet med prisen på at forbrænde grøn metanol.

I det hele taget er de største problemer for udrulningen af power-to-X-teknologier ikke den tekniske knowhow, men derimod politiske initiativer til at skabe incitamenter for at investere i produktionsfaciliteter baseret på power-to-X.

»Jo større produktionsfaciliteter, vi kan lave, jo længere kan vi bringe prisen på for eksempel grøn metanol ned, men mange projekter i Europa har svært ved at komme i gang eller bliver sat på pause, fordi der endnu ikke er klarhed over profitabiliteten, og hvad kulstof egentlig skal koste. Hvis vi kan få det på plads, vil det hjælpe på investeringslysten,« siger Samuel Araya.

### Kan også trække CO<sub>2</sub> ud af atmosfæren

Selvom den politiske vilje kommer helt i hus, er der stadig rum til forbedringer i selve power-to-X-teknologien, så den bliver mere effektiv. Blandt andet er der inden for selve elektrolysedelen af power-to-X rum til teknologiske forbedringer, der gør processen mere effektiv og dermed billigere. I store træk kan man sige, at prisen på at konvertere vand til hydrogen bestemmer, om power-to-X er konkurrencedygtigt i forhold til mindre bæredygtige kilder til energi. Prisen på hydrogen afgøres derfor at selve effektiviteten af den elektrokemiske proces – og så selvfølgelig også prisen på elektricitet.

En anden udfordring – eller mulighed om man vil – er, at i produktionen af metanol skal der bruges carbon i form af CO<sub>2</sub>. Det kulstof skal helst komme fra kilder, der ikke leder til yderligere CO<sub>2</sub>-udledning. Derfor kan den benyttede CO<sub>2</sub> for eksempel komme fra fabrikker, der installerer systemer til at indfange CO<sub>2</sub> i deres skorstene. Power-to-X-anlægget i Aalborg har planer om at genanvende 180.000 tons CO<sub>2</sub> pr år fra affaldsforbrænding. Det store mål er dog, at produktionen af metanol kan køre ved hjælp af teknologier, der kan indfange CO<sub>2</sub> direkte fra atmosfæren og derved ikke bare sikre, at der ikke bliver udledt mere CO<sub>2</sub>, men at der derimod kan reduceres i verdens CO<sub>2</sub> i atmosfæren.

»For nuværende er prisen på de teknologier, der kan trække CO<sub>2</sub> ud af atmosfæren, ret høj, og der er også her et behov for at udvikle teknologien for at gøre den mere effektiv og billigere, og så skal vi også udvikle anlæg, der kan gøre det i stor skala,« siger Samuel Araya.

# PRØV DIN DRØMME- UDDANNELSE

---

Kom i studiepraktik  
på AU i uge 43

Få et realistisk billede af uddannelsen og mød nuværende studerende, der er klar til at dele deres oplevelser.

Test om din drømmeuddannelse er noget for dig, og oplev på egen krop, hvordan det er at være studerende på Aarhus Universitet.

Tilmeld dig nu på [studiepraktik.dk](http://studiepraktik.dk)



AARHUS UNIVERSITET





# KEMISKE UDFORDRINGER VED CO<sub>2</sub>-FANGST

Fangst af CO<sub>2</sub> direkte fra luften og fra røggasser bliver et vigtigt værktøj til at nedbringe atmosfærens indhold af CO<sub>2</sub> i fremtiden. Effektiviteten af de materialer – såkaldte sorbenter – som CO<sub>2</sub> skal binde sig til og efterfølgende frigives fra igen, er helt afgørende for mulighederne i denne teknologi. Derfor arbejder kemikere hårdt på at udvikle nye og bedre sorbenter.

## Om forfatterne:

Aleksa Petrovic er ph.d.-studerende og arbejder med at udvikle nye sorbenter til brug i Post Combustion Capture, som tackler de væsentlige begrænsninger ved eksisterende sorbenter.  
ap@chem.ku.dk

Anders Grundtvig Utzon er ph.d.-studerende og arbejder med at udvikle nye sorbenter til Direct Air Capture.  
agu@chem.ku.dk

De er begge tilknyttet lektor Ji-Woong Lee's forskningsgruppe ved Kemisk Institut, Københavns Universitet.



De to forfattere.

**F**ør den industrielle revolution var koncentrationen af CO<sub>2</sub> i atmosfæren omkring 0,028 % (280 ppm) – i dag er den 0,042% (420 ppm) og stigende. Hvis vi vil undgå, at den høje koncentration af CO<sub>2</sub> får den globale temperatur til at stige mere end 1,5-2 °C, må vi have denne udvikling vendt. På sigt er det derfor nødvendigt at indfange CO<sub>2</sub> direkte fra atmosfæren. Selvom koncentrationen af CO<sub>2</sub> er den højeste nogensinde, udgør CO<sub>2</sub> som allerelevanter nævnt ikke nogen stor andel af atmosfæren. Faktisk er kun 1 ud af 2400 molekyler i luften CO<sub>2</sub>, hvilket

kan få CO<sub>2</sub>-fangst fra atmosfæren – på fagsproget kaldet Direct Air Capture (DAC) – til at synes som en proces, der kan sammenlignes med at finde en nål i en høstak.

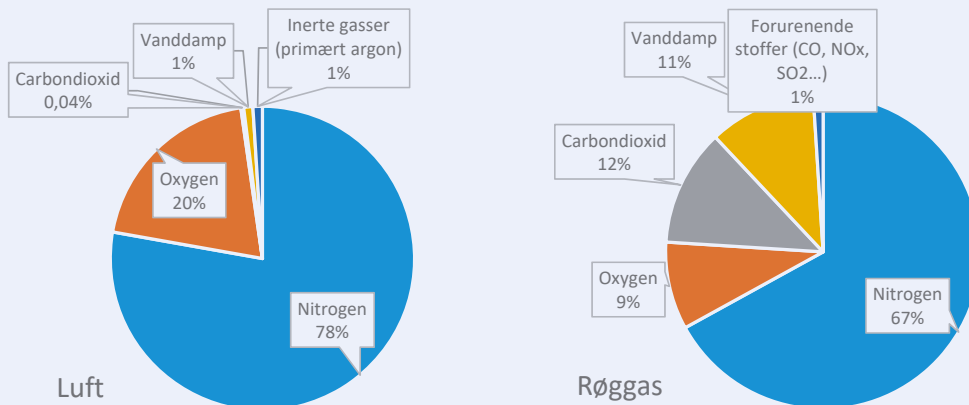
Direct Air Capture er en samlebetegnelse for processer, der sigter på at opsamle CO<sub>2</sub> fra atmosfæren så effektivt som muligt. I praksis eksponerer man luft for specialiserede materialer, kaldet *sorbenter*, som selektivt kan binde sig til CO<sub>2</sub> og dermed adskille det fra luftens øvrige komponenter som nitrogen, oxygen, argon, mv. Når materialet har indsamlet en tilstrækkelig stor

mængde CO<sub>2</sub>, kan CO<sub>2</sub>'en frigives på en kontrolleret måde ved at varme materialet op, hvilket samtidig gør materialet klar til en ny indsamlingscyklus. Den frigivne CO<sub>2</sub> kan derefter lagres i for eksempel underjordiske CO<sub>2</sub>-lagre eller anvendes i den kemiske industri.

En beslægtet strategi for CO<sub>2</sub>-fangst kaldes Post Combustion Capture (PCC), som går ud på at fange CO<sub>2</sub> fra punktkilder, dvs. hvor den produceres, før den når op i atmosfæren. Herved reducerer man altså emissionerne. Eksempelvis kan man fange CO<sub>2</sub> fra røggasser, der



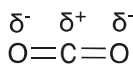
## Energiomkostninger ved CO<sub>2</sub>-fangst



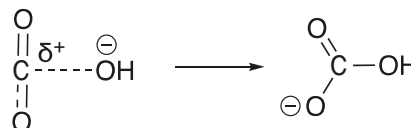
Figuren viser sammensætningen af henholdsvis atmosfærisk luft (tv) og røggas (th). Termodynamikkens love dikterer, at det i udgangspunktet er mere energikrævende at adskille CO<sub>2</sub> fra en fortyndet kilde (såsom luft) sammenlignet med en koncentreret kilde (som røggas). De nøjagtige værdier for energiomkostningerne afhænger af en række forskellige faktorer, men groft sagt kræver det minimum 20 kJ/mol at adskille CO<sub>2</sub> fra luft og 7 kJ/mol fra røggas. I praksis er energiomkostningerne dog langt højere for begge processer. Det kræver f.eks. enorme mængder energi at frigive CO<sub>2</sub> igen fra sorbenterne efter fangsten – for et system til Post Combustion

Capture kræves i størrelsesordenen 80-100 kJ/mol. Denne høje værdi skyldes dels den høje bindingsenergi mellem CO<sub>2</sub>- og sorbentmolekylerne, og dels vands varmekapacitet. Varmekapacitet er et udtryk for, hvor meget energi, der kræves for at hæve temperaturen af et stof. For eksempel kræver det 4,19 kJ at hæve temperaturen på 1 kg vand med 1 °C, mens olivenolie kun kræver 1,97 kJ. Den mest udbredte sorbentblanding brugt i Post Combustion Capture består af 30% (w/w) monoethanolamin (MEA) og 70% vand, hvorfor det meste af energien til at frigive CO<sub>2</sub> går til at bringe det vandige opløsningsmiddel til kogetemperatur.

ellers var blevet udledt i atmosfæren. Da koncentrationen af CO<sub>2</sub> er meget højere fra punktkilder end i atmosfæren, er det billigere og mere gennemførligt med kendte teknologier.



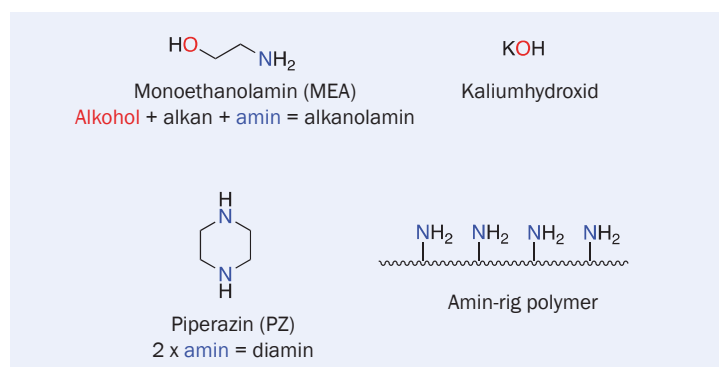
Elektronegativitet af C: 2,55  
Elektronegativitet af O: 3,44



2. Molekylær struktur af CO<sub>2</sub> og dets reaktion med hydroxid.

### Kemien i CO<sub>2</sub>-fangst

De fleste sorbenter fanger CO<sub>2</sub> via en mekanisme, der kan sammenlignes med tiltrækningen mellem modsatrettede poler på en magnet. Et CO<sub>2</sub>-molekyle har en lineær struktur, hvor carbonatomet er placeret midt mellem to oxygenatomer (figur 2). Da carbon er mindre elektronegativ end oxygen, kommer carbonatomet i CO<sub>2</sub> i elektronunderskud og bliver dermed delvis positivt ladet. Sorbenter er typisk basiske materialer, der indeholder et elektronrigt atom, som bærer en delvis eller fuld negativ ladning. Når et CO<sub>2</sub>-molekyle og et sorbentmolekyle nærmer sig hinanden, binder det elektronrige atom i sorbenten sig til det elektronfattige atom i CO<sub>2</sub>. Det er i det væsentlige på denne

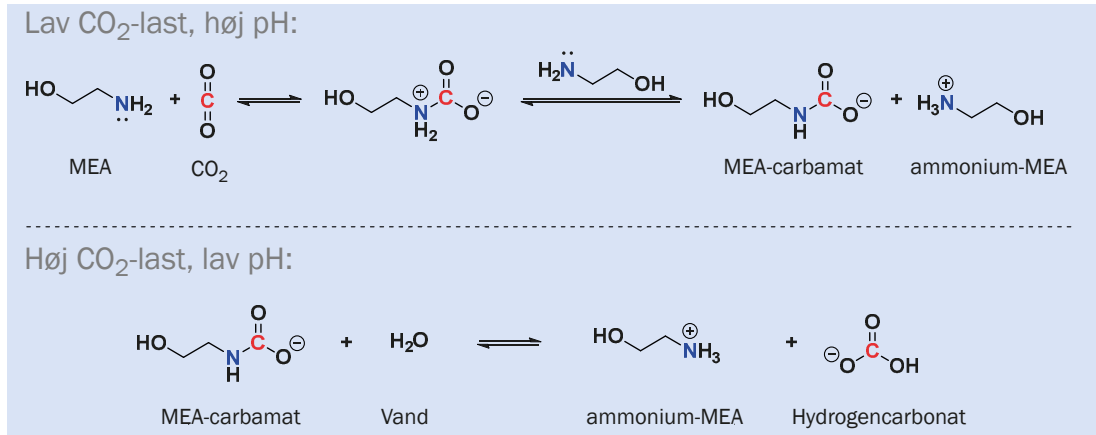


3. Almindeligt brugte sorbenter til Post Combustion Capture og Direct Air Capture.

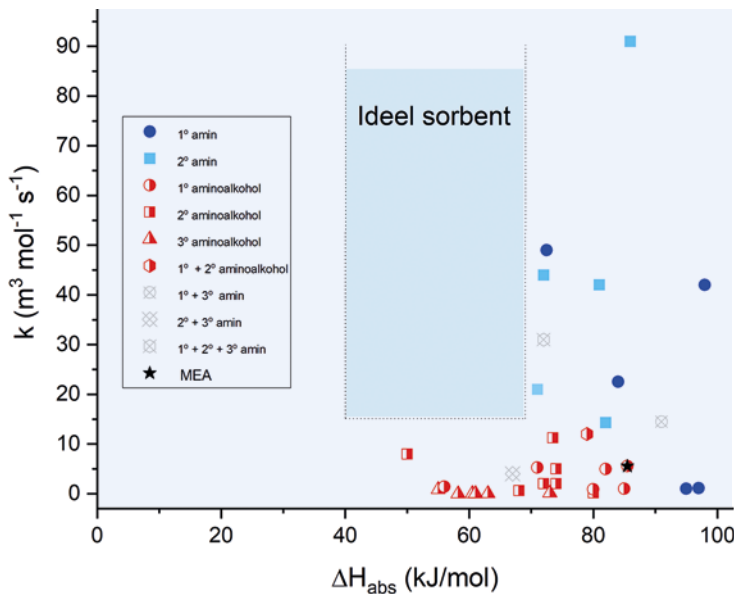
måde, at sorbenter “fanger” CO<sub>2</sub>.

Sorbenter kan enten være væsker eller faste stoffer og anvendes ofte i en vandig opløsning eller aflejres på et porøst, fast stof. De mest udbredte sorbenter til Post Combustion

tion Capture er vandige opløsninger af alkanolaminer og diaminer (figur 3). Til Direct Air Capture er det mere almindeligt at bruge vandige opløsninger af alkalimetallhydroxider (for eksempel KOH eller NaOH) eller porøse faste materialer, der inde-



4. Kemiske reaktioner ved CO<sub>2</sub>-fangst med monoethanolamin (MEA).



5. Figuren viser, hvordan forskellige sorbenter placerer sig i et plot baseret på deres bindingsstyrke til CO<sub>2</sub> (1.-aksen) og den hastighed, hvormed de opfanger CO<sub>2</sub> (2.-aksen). Værdierne for hastighed er i høj grad en funktion af mange parametre og skal blot forstås som en omtrent værdi. Selvom plottet giver et simplificeret billede, tjener det som en rå guide til, hvad kemikere stræber efter, når de designer nye sorbenter.

Illustration: Eugenio Gandolfo

holder en høj densitet af amino-grupper.

Reaktionen mellem vandig monoethanolamin (MEA) og CO<sub>2</sub> er den mest udbredte kemiske reaktion i forbindelse med Post Combustion Capture (figur 4). I denne reaktion danner det elektronrige nitrogenatom i MEA en binding til det elektronfattige carbonatom i CO<sub>2</sub>. Produktet af denne reaktion er kendt som et carbamat. "MEA-carbamatet" kan derefter reagere med vand, hvilket giver ammonium-MEA og hydrogencarbonat.

Reaktionen kan vendes ved at opvarme opløsningen til 115 °C. Opvarmningen svækker tiltrækningskræfterne mellem CO<sub>2</sub> og sorbenten, hvilket frigiver CO<sub>2</sub>. Derved regenereres MEA samtidig til en ny cyklus.

### Kemikernes udfordringer

Vores opgave som kemikere er nu at designe og syntetisere nye og bedre sorbenter samt at demonstrere, at disse kan fange CO<sub>2</sub> i laboratorieforsøg. For at være egnet som sorbent skal et materiale hurtigt og effektivt opfange CO<sub>2</sub> samtidig med, at energiforbruget til at frigive CO<sub>2</sub> og regenerere materialet skal minimeres. Derudover skal materialet være billigt, være muligt at masseproducere og have en lang levetid under de barske forhold, som det kan blive budt i den daglige drift. Desuden skal sorbent-materialet designes specifikt til opgaven – altså om det skal bruges til Direct Air Capture eller Post Combustion Capture.

Uanset, om CO<sub>2</sub>-kilden er luft eller røggas, er det en stor udfordring for

kemikere at designe et sorbent, der opfanger CO<sub>2</sub> hurtigt og samtidig forbruger en minimal mængde energi under regenerering. Det skyldes, at de fleste sorbenter, der hurtigt opfanger CO<sub>2</sub>, også binder CO<sub>2</sub> meget kraftigt, hvilket betyder at det kræver tilsvarende mere energi at frigive CO<sub>2</sub> igen. Kemikere forsøger derfor at identificere den "perfekte" sorbent, der fanger CO<sub>2</sub> hurtigt, men som ikke binder det for stærkt (figur 5).

I denne jagt anvendes grundlæggende kemiske principper kombineret med computermodellering til at styre designet af mere effektive sorbenter, der balancerer energiforbruget ved regenerering og fangsthastigheden samt andre vigtige egenskaber. På den måde har kemikere blandt andre identifi-

ceret fire lovende forbindelser som kandidater til næste generation af sorbenter (figur 6).

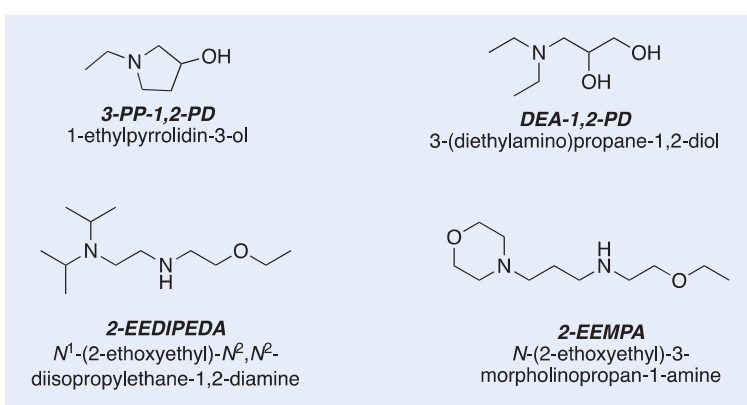
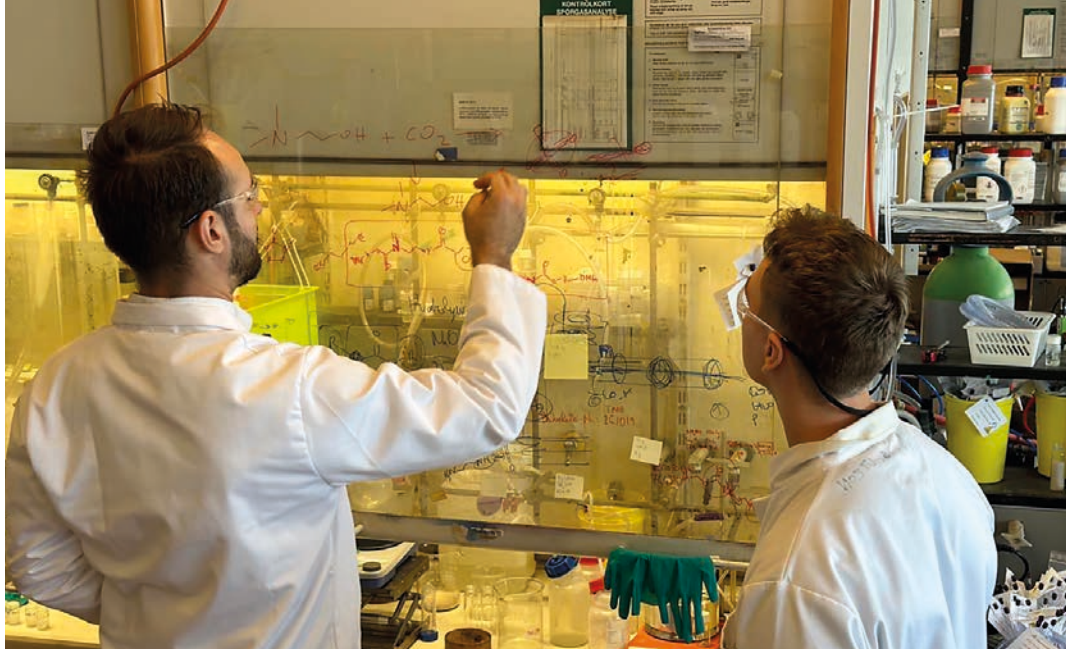
Alle disse materialer er designet til at minimere omkostningerne og maksimere CO<sub>2</sub>-opsamlings effektiviteten. For eksempel er den ene af disse sorbenter, 2-EEDIPEDA, en væske, der kan laves ud fra billige udgangsmaterialer og regenereres ved kun 87 °C (sammenlignet med 115 °C for MEA). Disse egenskaber gør dette materiale til en lovende kandidat til Post Combustion Capture.

En alternativ tilgang til at håndtere energiforbruget forbundet med regenerering er at udvikle sorbenter, der kan regenereres på anden måde end ved at varme det op. Det kan for eksempel være ved hjælp af redoxprocesser, pH-varianter, trykvarianter eller ændringer i luftens fugtighed (figur 7).

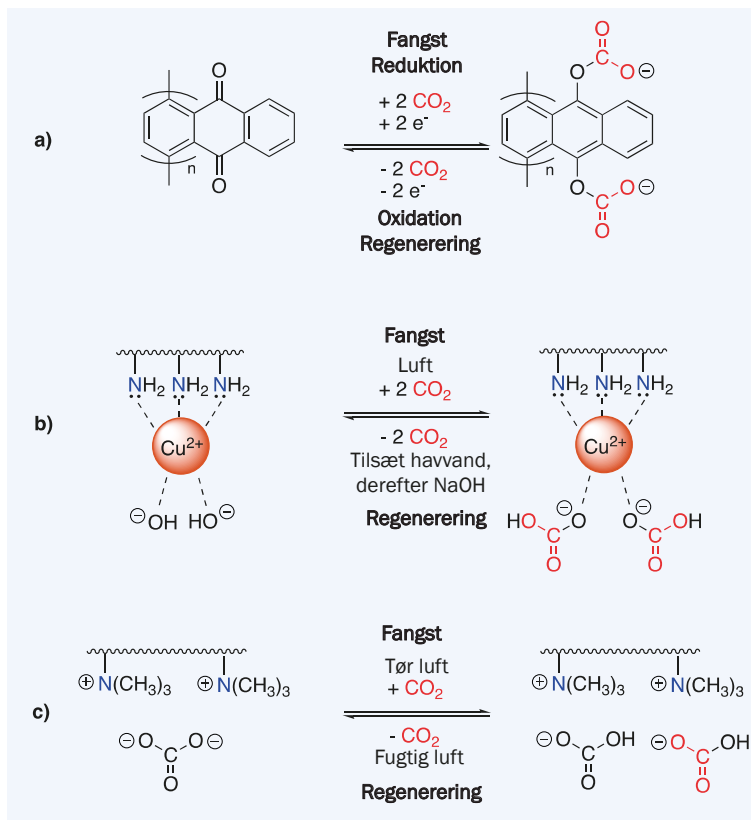
Den største faldgrube ved disse teknologier er, at de er relativt dyre i forhold til opvarmning og derudover er relativt vanskelige at skalere op. Men alle disse teknologier er stadig i deres vorden, og der er et stort potentiale for at videreudvikle dem.

**Mål: Fang 1 gigaton CO<sub>2</sub> årligt**  
Ifølge det Internationale Klimapanel IPCC er det afgørende at fange mindst 1 gigaton CO<sub>2</sub> årligt gennem den kombinerede udnyttelse af Direct Air Capture og Post Combustion Capture. Men i dag er CO<sub>2</sub>-opsamlings teknologier ikke så avancerede eller effektive, som de skal være for at kunne have en væsentlig global indflydelse. Så skal vi nå i mål med at fange 1 gigaton CO<sub>2</sub> årligt, kræver det udvikling af ny teknologi, og det haster.

Som det er fremgået af denne artikel, er det udvikling af nye og bedre sorbenter, der sætter grænsen for, hvor langt vi kan komme – og hvor hurtigt vi kan nå i mål – med Direct Air Capture og Post Combustion Capture. Derfor arbejder vi kemikere hårdt på at designe og teste den næste generation af sorbenter. ■



6. Fire forbindelser med optimerede egenskaber til CO<sub>2</sub>-fangst



7. Figuren viser indfangnings-/regeneringscyklusserne for tre teknologier, der ikke skal varmes op for at regenerere.: a) regenerering ved oxidationsreaktion; b) regenerering ved tilsætning af havvand og NaOH; c) regenerering ved udsættelse for fugtig luft.

Aleksa og Anders i laboratoriet. Foto: Gulbarg Hadaf.

**Videre læsning:**  
En bog som relativt pædagogisk gør rede for mål og udfordringer ved at udføre Direct Air Capture ved brug af kemiske metoder: Direct Air Capture of CO<sub>2</sub> with Chemicals. (2011).

En god review artikel, som opsummerer stort set al forskning frem til 2017 inden for PCC ved brug af "vand-fattige" solventer: Heldebrant, D. J., et al (2017). Water-Lean Solvents for Post-Combustion CO<sub>2</sub>-Capture: Fundamentals, Uncertainties, Opportunities, and Outlook. In Chemical Reviews (Vol. 117, Issue 14, pp. 9594–9624). American Chemical Society. doi.org/10.1021/acs.chemrev.6b00768

En artikel, som diskuterer problemer ved opskalering af strukturelt komplicerede aminer: Bara, J. E. (2012). What chemicals will we need to capture CO<sub>2</sub>? Greenhouse Gases: Sci Technol., 2(5), 162–171. doi.org/10.1002/ghg

En review artikel: Erans, M., et al (2022). Direct air capture: process technology, techno-economic and socio-political challenges. In Energy and Environmental Science (Vol. 15, Issue 4, pp. 1360–1405). Royal Society of Chemistry. doi.org/10.1039/d1ee03523a



# JAGTEN PÅ DEN RENE CO<sub>2</sub>

**I Power-to-X kan CO<sub>2</sub> indgå som værdifuld ressource i fremstillingen af produkter som metanol og forskellige brændstoffer. Hvis der skal være god økonomi i denne produktion, kræver det dog, at CO<sub>2</sub>-strømmene er meget rene. Og det er en væsentlig udfordring.**

## Om forfatterne



Morten Thellefsen er kemiingeniør, ph.d. hos Topsoe A/S, hvor han er projektleder for R&D aktiviteter med CO<sub>2</sub> rensning. Han har arbejdet i over 20 år med udvikling af teknologi til svovl fjernelse fra røggasser og produktion af svovlsyre.  
mfn@topsoe.com



Martin Østberg er kemiingeniør, ph.d. hos Topsoe A/S. Han har arbejdet med teknologi og katalysatorer til fremstilling af hydrogen og syntesegas herunder P2X i over 20 år. Arbejder i R&D projektet for rensning af CO<sub>2</sub>.  
mro@topsoe.com

**I** Power-to-X (P2X) dækker "X" over en lang række kemiske produkter. Vi skelner imellem produkter, der ikke indeholder carbon som hydrogen og ammoniak (NH<sub>3</sub>), og carbon-holdige produkter som metan (CH<sub>4</sub>), metanol (CH<sub>3</sub>OH) og carbonhydrid-baserede brændsler (benzin, flybrændstof, diesel). De sidste kræver, at der etableres et kredsløb af carbon. Dette kredsløb vil typisk indeholde carbondioxid (CO<sub>2</sub>) som en fødestrøm til produktion af X, der så ved forbrug gendannes til CO<sub>2</sub>. Den anden fødestrøm til de carbon-holdige produkter er hydrogen (H<sub>2</sub>). Det interessante ved disse carbon-holdige produkter er, at de har en høj energitæthed, og det er i høj grad relevant, da det er dyrt og besværligt at oplagre og til dels transportere store energi-mængder som

hydrogen, der har lav energitæthed, fordi det er på gasform.

Produktionen af disse carbonholdige kemikalier kræver en række katalytiske processer. Fælles for katalysatorerne, der benyttes til denne omdannelse af elektrisk energi (power) til kemisk energi i X, er, at de er følsomme over for kemiske stoffer, der påvirker deres funktion (katalysator-gifte) og derved begrænser katalysatorens funktion og levetid. En katalysator til et kemisk anlæg til Power-to-X forventes at have minimum et par års levetid. H<sub>2</sub> vil typisk produceres ved elektrolyse af vand (H<sub>2</sub>O) og vil være af relativ god kvalitet med hensyn til katalysatorernes følsomhed. Anderledes forholder det sig med CO<sub>2</sub>-strømmen til anlægget. Selv om der bruges en rensset CO<sub>2</sub>-fødestrøm

med 99,9% CO<sub>2</sub>, kan de sidste 0,1% eller endda de sidste 0,001% være meget kritiske for katalysatorerne i anlægget og være afgørende for, om processen kan forløbe. Vi vil her gennemgå en række forskellige CO<sub>2</sub>-kilder, der kan være en mulig fødestrøm til et P2X-anlæg og reddegøre for de kritiske stoffer, der kan stå i vejen for en succesfuld produktion af et carbon-holdigt produkt i anlægget.

Når vi omtaler CO<sub>2</sub>-kilder karakteriserer vi dem i dag som *bæredygtige* eller *ikke bæredygtige*. De bæredygtige er ofte bio-baserede og kan være CO<sub>2</sub> fra gæring og fermentering, CO<sub>2</sub> fra biogas-produktion, CO<sub>2</sub> fra biomasseforbrænding og endelig direkte CO<sub>2</sub>-fangst fra luften (direct air capture, DAC). Ikke bæredygtige CO<sub>2</sub>-strømme kan være

CO<sub>2</sub> fra cement- og metalproduktion, herunder stålværker, CO<sub>2</sub> fra forbrænding af fossile brændstoffer (kul, olie, naturgas), CO<sub>2</sub> fra kemisk produktion herunder produktion af hydrogen og ammoniak baseret på fossile fødestrømme. Forbrænding af affald vil resultere i en blanding af bæredygtig og ikke-bæredygtig CO<sub>2</sub> og er derfor svær at karakterisere.

I dag er det sådan, at hvis et P2X-produkt skal anses for at være grønt (bæredygtigt) skal CO<sub>2</sub>-kilden være bæredygtig.

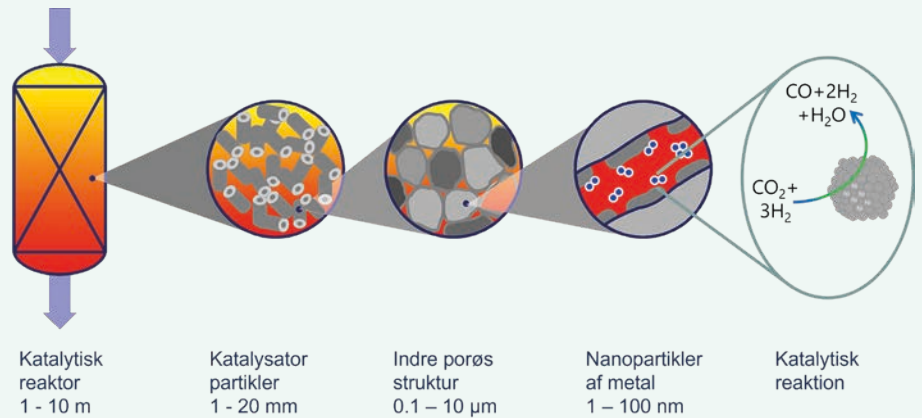
### CO<sub>2</sub> fra fermentering

En af de mulige fødestrømme, som anses for at være temmelig "ren" er CO<sub>2</sub> fra fermentering. Den indeholder svovlkomponenter som hydrogensulfid (H<sub>2</sub>S), dimethylsulfid ((CH<sub>3</sub>)<sub>2</sub>S) og muligvis andre i ppm-niveauer (dvs. omkring 0,0001 %). Det er lavt nok til brug af CO<sub>2</sub>'en til fødevarer, for eksempel sodavand, men det er for højt niveau for katalysatorer. CO<sub>2</sub> fra fermentering vil også indeholde etanol (op til 0,01 vol %) og metanol. Og der vil være spor af andre carbonhydrider (aldehyder, etylethanoat, ketoner samt BTX (benzen, toluen, xylen). Da der tilføres luft til fermenteringen (aerob fermentering), giver dette også spor af NO<sub>x</sub> og SO<sub>2</sub>.

Katalysatorerne kræver, at niveauet af svovlkomponenter kommer ned på cirka 10 ppb (0,000001 %) Andre stoffer kan accepteres i ppm-niveau (0,0001%). Da denne CO<sub>2</sub>-strøm som nævnt er ren nok for fødevarerproduktion, vil den have en højere værdi end andre CO<sub>2</sub>-strømme, der kræver rensning. Men selv med denne renhed skal der til et P2X-anlæg yderligere rensning til for at fjerne primært svovlkomponenterne.

Svovlniveauet stiger markant, hvis CO<sub>2</sub>-kilden kommer fra en anaerob fermentering, for eksempel biogasproduktion. Biogas indeholder foruden metan cirka 35 - 45 vol% CO<sub>2</sub>. Her kan være op til 0,1-1,0 vol% svovlkomponenter, primært

## Katalysatorer til Power-to-X

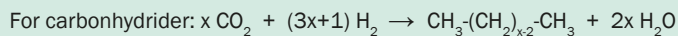
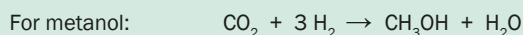
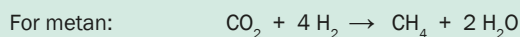


Der bruges ofte nikkel-baserede katalysatorer til at omdanne CO<sub>2</sub> og H<sub>2</sub> til den gas, der kan danne metanol og carbonhydrider. Nikkel er fordelt som nano-partikler i en porøs bærer af keramik, hvor reaktanter kan adsorberes på nikkelloverfladen, og den katalytiske reaktion kan finde sted. Svovl sætter sig (adsorberer) også på nikkelloverfladen, hvilket medfører en kraftig reduktion af muligheden for, at den katalytiske reaktion kan forløbe. Faktisk bestemmes det katalytiske overfladeareal af en nikkel-baseret katalysator ud fra mængden af svovl, katalysatoren kan binde til sig. Det kaldes svovl-kapacitet.

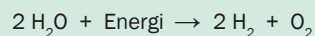
Grundstrukturen er en keramisk struktur med små kanaler (porer), der hjælper til at give en meget stor overflade (op til 200 m<sup>2</sup>/g svarende til 28 fodboldbaner per kg). Det hjælper til at opnå en stor overflade, hvor der kan være mange nano-partikler og dermed en stor nikkelloverflade.

## Katalytiske processer

Den katalytiske proces, der producerer et carbonholdigt produkt, er kendetegnet ved en af følgende kemiske reaktioner:



H<sub>2</sub> laves ud fra elektrolyse af vand, der kan skrives således:



En stor del af energimængden, der benyttes til fremstillingen af H<sub>2</sub>, går til at fjerne oxygen fra CO<sub>2</sub>-molekylet, hvorved vand gendannes. Derfor taber vi en del af energien, når den elektriske energi konverteres til kemisk energi.

hydrogensulfid (H<sub>2</sub>S). Det kræver, at der foretages en grovrensning, der reducerer niveauet ned til cirka 1 ppm før en finrensning fjerner resten af svovlkomponenterne ned til det ønskede niveau på under 10 ppb. Der vil også være ammoniak i gassen, men denne er ikke kritisk for katalysatorerne, da det typisk reagerer (dekomponerer) til H<sub>2</sub> og nitrogen (N<sub>2</sub>) på katalysatoren, hvor

H<sub>2</sub> er en af reaktanterne og N<sub>2</sub> er inert for den katalytiske proces. Carbonhydrider omsættes effektivt i fermenteringen, og niveauet af andre carbonhydrider vil være minimalt (dvs. ikke målbart).

### CO<sub>2</sub> fra røggasser

CO<sub>2</sub> kan også opsamles fra røggasser fra forbrændingsprocesser. Fordelen er, at røggasser indeholder



Et luftfoto af et olieraffinaderi ved nattetide. Mon det afløses af anlæg der håndterer CO<sub>2</sub> og P2X i fremtiden? Foto: Shutterstock.

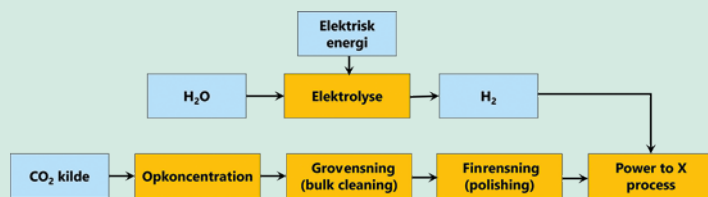


Illustration af power to X processer fra CO<sub>2</sub> kilde til produkt.

## Farven af H<sub>2</sub>

H<sub>2</sub> er i virkeligheden en farveløs gas, men den gives "farver" for at skelne mellem oprindelsen. Kemisk set er der ikke forskel. H<sub>2</sub> dannet ud fra naturgas eller anden carbonhydrid med damp reformering kendetegnet som **sort** H<sub>2</sub>, da der udledes betydelig mængder CO<sub>2</sub> ved processen. Disse anlæg kan designes, så den producerede CO<sub>2</sub> opsamles, så omtaler vi den producerede H<sub>2</sub> som **blå** H<sub>2</sub>. Endelig er der produktion af helt CO<sub>2</sub>-fri H<sub>2</sub> f.eks. ved elektrolyse af vand eller ud fra biobaserede kilder. Dette omtales som **grøn** H<sub>2</sub>.

betydelig mængder CO<sub>2</sub>, så det er lettere at opnå en høj koncentration end ved at opsamle CO<sub>2</sub> fra atmosfærisk luft. Røggasser vil ofte have CO<sub>2</sub>-koncentrationer på mellem 10 og 15 vol% CO<sub>2</sub>, og ved at tilføre beriget luft eller endda ren dioxygen (O<sub>2</sub>) til forbrændingen kan koncentrationen øges betydeligt. Ved afbrænding i ren O<sub>2</sub> fås i princippet en gas kun bestående af H<sub>2</sub>O og CO<sub>2</sub>, hvorfra vandet kan kondenseres, og

man derved kan opnå en tæt ved 100% CO<sub>2</sub>-gasstrøm. Det er dog dyrt at producere rent O<sub>2</sub>, og høje forbrændingstemperaturer stiller store krav til konstruktionsmaterialer af brænder og brandkammer.

Hvis det afbrændte materiale er biomasse, får man som tidligere nævnt en bæredygtig CO<sub>2</sub>-strøm. Processerne til at opsamle/opkoncentrere CO<sub>2</sub> afhænger ikke af,

hvad der brændes af. Her udnytter man, at CO<sub>2</sub> er en sur gas, som kan opsamles af en basisk væske, oftest en amin-opløsning, eller basisk materiale som brændt eller læsket kalk (CaO / Ca(OH)<sub>2</sub>). Typisk vaskes røggassen med den basiske væske, der fanger CO<sub>2</sub>'en sammen med andre sure komponenter, for eksempel SO<sub>2</sub> og NO<sub>x</sub>. Ved ændring af tryk (lavere) og/eller temperatur (højere) i et andet apparat kan CO<sub>2</sub>'en frigives fra væsken, som så kan recirkuleres og opsamle nyt CO<sub>2</sub> fra røggassen. Den rene CO<sub>2</sub>-strøm kan så bruges til P2X-formål eller pumpes ned i undergrunden. For faste stoffer, der danner et karbonat som kalk (CaCO<sub>3</sub>), skal der ofte varmes en del mere op for at kalcinere (frigive CO<sub>2</sub>) og gendanne oxidet (CaO).

Ved produktion af cement kalcineres en stor mængde CaCO<sub>3</sub>, der udover røggassens CO<sub>2</sub> fra det brugte brændsel, bidrager til en røggas med et højt CO<sub>2</sub>-indhold. Aalborg Portlands cementfabrik er derfor kendt som den største CO<sub>2</sub>-udleder i Danmark. Røggassen er med sit høje CO<sub>2</sub>-indhold meget attraktivt at opkoncentrere. Den er dog ikke bæredygtig, heller ikke CO<sub>2</sub> fra kalk regnes som værende bæredygtig, da det er deponeret CO<sub>2</sub>, der gendannes.

Kvaliteten (renheden af CO<sub>2</sub>-strømmen) afhænger meget af, hvad der renses for i processen specielt af SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, CO og HCl. Der vil også være spor af metaller som kviksølv, arsen og selen, som også er gifte for en katalysator. Derfor kan der være store udfordringer med at opnå den ønskede renhed til brug i en katalytisk proces af denne CO<sub>2</sub>-strøm.

Der er også en lang række metalproducerende anlæg (stålværker mm.), der producerer lignende CO<sub>2</sub>-strømme, når metalmalmen skal omdannes til flydende rent metal. Denne proces kræver, at man tilføjer carbon i form af koks, som under høj temperatur vil omdanne malmen til rent metal under

CO <sub>2</sub> - kilde	Bæredygtig	Brugbarhed til P2X	Kommentar
Fermentering (aerob)	Ja	**/**	Nogle kræver kun finrensning
Fermentering (anaerob)	Ja	**	Indeholder meget svovl kræver både bulkrensning og finrensning
Røggas (biobrændsel)	Ja	*	Afhængigt af brændsel, indeholder mange komponenter
Røggas (fossilt)	Nej	*	Afhængigt af brændsel, indeholder mange komponenter
Oxyfuel forbrænding	Nej (ja ved biomasse)	*/**	Dyr pga. ren oxygen, kan være relativt ren
Cement	Nej	*/**	Mange komponenter, men høj CO <sub>2</sub> -koncentration
Metal produktion	Nej	*	Mange komponenter
Direkte fra luft (Direct air capture)	Ja	**	Renheden meget afhængigt af lokation. Dyr proces
Kemisk produktion af H <sub>2</sub> / NH <sub>3</sub>	Nej	***	Svovlfri og høj koncentration
Kemisk produktion af etylenoxid	Nej	**	Indeholder alkener, oxygen-holdige carbon-hydrider og klorider. Høj CO <sub>2</sub> -koncentration

Tabellen viser en oversigt over CO<sub>2</sub> kilder, om de er regnet for bæredygtige eller ej. \*\*\* betyder at de er velegnet til katalytisk brug, \*\* moderat brugbare, mens \* er kompliceret at benytte til katalytisk produktion og derved mere omkostningstunge.

dannelse af CO<sub>2</sub>. Røggassen fra disse processer vil svinge i indhold af andre komponenter, som ligesom for cementanlæg kan vanskeliggøre finrensning til produktion baseret på katalytiske processer.

### CO<sub>2</sub>-fangst fra luft

Renheden af CO<sub>2</sub>-strømme, der laves ved at trække CO<sub>2</sub> ud direkte fra luft, vil faktisk afhænge af, hvor det foregår. Metoden svarer meget til, hvordan vi tager CO<sub>2</sub> ud af røggas, det vil sige vaske CO<sub>2</sub> ud af luften eller fange CO<sub>2</sub> på et fast stof. Vi ved, at der er forhøjet niveau af NO<sub>2</sub> i byer med meget biltrafik, ligeledes vil der være mere SO<sub>2</sub>, hvis der er industri, der udleder SO<sub>2</sub> i nærheden. Ligeledes gælder andre kemiske stoffer, der kan vaskes med ud af luften. På grund af den meget lave CO<sub>2</sub>-koncentration i atmosfæren, er det ret dyrt at danne CO<sub>2</sub>-strømme på denne måde.

Endelig produceres CO<sub>2</sub> som et biprodukt i flere kemiske anlæg

herunder produktion af hydrogen, ammoniak og etylenoxid. For de to første kan der produceres blå hydrogen og ammoniak ved at opfange CO<sub>2</sub>-produktion fra en traditionel fødestrøm (naturgas, nafta eller andet fossilt). Denne CO<sub>2</sub> er helt uden svovl, da det er fjernet ved den katalytiske proces og indeholder typisk ikke kritiske stoffer for katalysatorer.

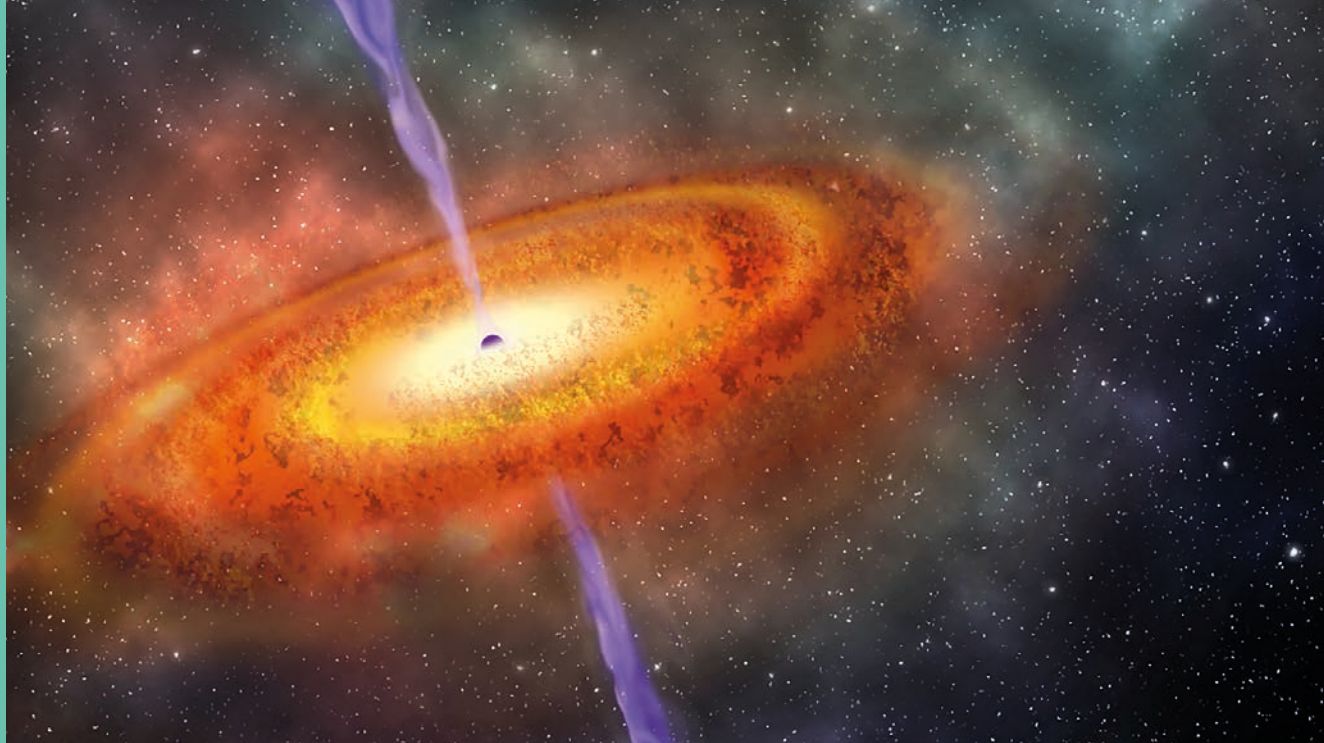
I tabellen er der lavet en opsummering af mulige CO<sub>2</sub>-kilder til Power-to-X, der viser, at den bedste og billigste CO<sub>2</sub>-strøm er fra kemisk produktion af hydrogen eller ammoniak, da den allerede er rensset for de mest kritiske stoffer. Af de biologiske bæredygtige CO<sub>2</sub>-strømme, er den bedste fra aerob fermentering, men denne er også populær til andre anvendelser og kan derfor være højere i pris. Den produceres også kun få steder i verden (USA og Brasilien) i tilstrækkeligt store mængder til at danne grundlag for at bygge et P2X-anlæg.

Nogle af de store CO<sub>2</sub>-kilder, som fra cement- og stålproduktion, kræver meget rensning og medfører derfor også betydelige omkostninger at benytte i P2X-produktionen. Ligeledes vil CO<sub>2</sub> fra biomasseafbrænding være omfattet af høje omkostninger for opkoncentrering og oprensning. Selvom sidstnævnte er en bæredygtig CO<sub>2</sub>-kilde, som vil være attraktivt at benytte, kan det være bedre at sende den til oplagring i undergrunden, hvis der er bedre (ikke bæredygtige) kilder til rådighed.

Ud fra kortlægning af CO<sub>2</sub>-kilder og konkrete projekter arbejder vi på Topsoe A/S på at udvikle optimale processer til at udnytte CO<sub>2</sub> katalytisk til produktion af produkter som metan (naturgas), metanol, flybrændstof, benzin med mere. Håndtering (dvs. rensning) af CO<sub>2</sub> er en central del af disse anlæg og en vigtig faktor for at opnå en robust og økonomisk produktion. ■

En kvasar opstår, når store mængder gas falder ned mod et supermassivt sort hul i centrum af en galakse. Gassen lægger sig i en roterende skive omkring det sorte hul og opvarmes, så den begynder at lyse voldsomt.

Illustration: Robin Dienel/Carnegie Institution for Science



# KOSMISKE FYRTÅRNE GIVER NY VIDEN OM TIDLIGE GALAKSER

**Kvasarer er objekter i universet, der kan lyse lige så kraftigt som hundredvis af galakser tilsammen. Astronomerne forsøger nu at udnytte disse kosmiske fyrtårne til at skaffe sig viden om galakserne i det tidlige univers for 10-12 milliarder år siden.**

## Om forfatteren

Af Henrik Bendix, videnskabsjournalist. bendix@vidmere.dk



**DANMARKS FRIE FORSKNINGSFOND**  
INDEPENDENT RESEARCH FUND DENMARK

Artiklen er sponsoreret af Danmarks Frie Forskningsfond | Natur og Univers.

Danmarks Frie Forskningsfond dækker alle videnskabelige hovedområder og uddeler hvert år godt 1 mia. kr. til forskningsprojekter baseret på forskernes egne ideer. Danmarks Frie Forskningsfond består af 84 anerkendte forskere udpeget på baggrund af deres høje faglige kompetence. Formand for Danmarks Frie Forskningsfond | Natur og Univers er professor ved Københavns Universitet, Henrik Grum Kjærgaard. Læs mere på [www.dff.dk](http://www.dff.dk)

**P**rofessor Johan Fynbo fra forskningscenteret DAWN på Niels Bohr Institutet vil rigtig gerne vide mere om galakserne i universets vilde ungdom, men de er svære at blive klog på. Problemet er, at afstanden til de tidlige galakser er vokset i takt med universets udvidelse. Nu er de så langt væk, at det er svært at fange lyset fra dem.

Men astronomerne har fundet ud af, hvordan de kan lære de fjerne galakser bedre at kende, selv om de ikke kan se dem direkte. De efterlader sig nemlig spor i lyset fra de kosmiske fyrtårne, der kaldes kvasarer.

I et nyt forskningsprojekt vil et hold astrofysikere, heriblandt Johan Fynbo, udnytte kvasarerne til at grave sig ned i universets historie. Kvasarlyset kan nemlig give et væld af informationer om galakserne, herunder deres størrelse, indhold og udvikling gennem tiden.

Kvasarer er en forkortelse for "kvasistellare objekter" – et navn, som refererer til, at disse meget fjerne objekter ved første øjekast ligner stjerner. Kvasarer blev opdaget i 1960'erne, efter man var begyndt systematisk at afsøge rummet for objekter, der udsender

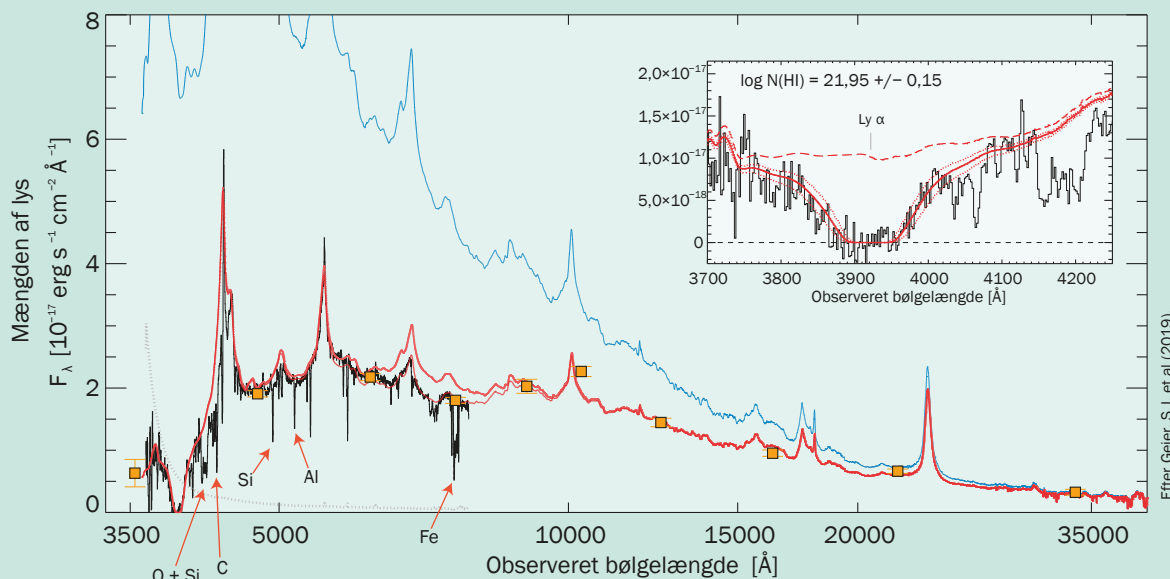
radiobølger. En kvasar kan lyse så kraftigt som hundredvis af galakser tilsammen, og de hurtige variationer i kvasarernes lysstyrke røber, at de har en udstrækning omtrent svarende til Solsystemet.

## Roterende gas lyser voldsomt op

Det store spørgsmål er, hvordan et objekt på størrelse med Solsystemet kan lyse flere billioner gange så klart som Solen. Den sovjetiske fysiker Yakov Zeldovich og den østrigskfødte amerikanske astrofysiker Edwin Salpeter kom med et godt bud på et svar allerede i 1964: Der må være meget store sorte huller på spil.



## Kvasarlyset røber indholdet af en galakse



Efter Geier, S.J. et al (2019).

Når lyset fra en kvasar passerer igennem en galakse, bliver det generelt mere rødt, og noget af lyset bliver absorberet ved specifikke bølgelængder af galaksens gas. Det ses tydeligt i spektret af lyset fra kvasaren QG1218+0832.

Da kvasarlyset ramte galaksen, blev ultraviolet stråling med en bølgelængde på 1215,67 ångstrøm (lyman-alfa-linjen) absorberet af galaksens hydrogenatomer. Dette måles i praksis ved en bølgelængde på godt 3900 ångstrøm. Det skyldes, at lyset har været på vej mod os i mere end 10 milliarder år, og imens har universet udvidet sig. Lyset er derfor blevet rødforskudt, så det nu har 3,226 gange længere bølgelængde. Ved 3900 ångstrøm ses en tydelig dæmpning af lyset. Den indsatte graf viser denne del af spektret i større detalje – udtrykket  $\text{Log}N(\text{HI})=21,95 \pm 0,15$  angiver logarit-

men til søjletætheden af neutral hydrogen langs sigtelinjen (målt per  $\text{cm}^2$ ). I denne galakse er der altså  $10^{21,95}$  neutrale hydrogenatomer per  $\text{cm}^2$  langs sigtelinjen.

Spektrret rummer også tydelige absorptionslinjer fra tungere grundstoffer som silicium, oxygen, carbon, jern og aluminium (nogle af de tydeligste linjer for disse grundstoffer er markeret på figuren). På den måde kan astronomerne se, at den tidlige galakse rummede betydelige mængder af disse grundstoffer. Firkanterne angiver fotometriske målinger. Her måler man fluxen af objektet i bestemte bølgelængdeområder, som dækkes af forskellige filtre.

Den blå linje viser, hvordan kvasarens spektrum havde set ud, hvis lyset ikke var blevet dæmpet af en galakse undervejs.

»Det kan lyde mærkeligt, at et sort hul kan være en kilde til energi. Men det stof, der ligger tæt omkring det sorte hul, bliver meget varmt og lyser helt enormt op. Det er, hvad man kan se som en kvasar,« lyder det fra Johan Fynbo.

Når stof falder ned mod et sort hul, falder det ikke direkte i, men lægger sig i en såkaldt tilvækstskive omkring det sorte hul. Det svarer til, at al vandet i et badekar ikke kan forsvinde ud i afløbet med det samme, når man hiver proppen op. I stedet opstår der en strømhvirvel omkring afløbet.

Stoffet opnår en meget stor hastighed i faldet mod det sorte hul, hvor potentiel energi omdannes til kinetisk energi. Når faldet bremses i tilvækstskiven, bliver den kinetiske energi til varme, og stoffet udsender store mængder elektromagnetisk stråling, lige fra røntgenstråling til radiobølger.

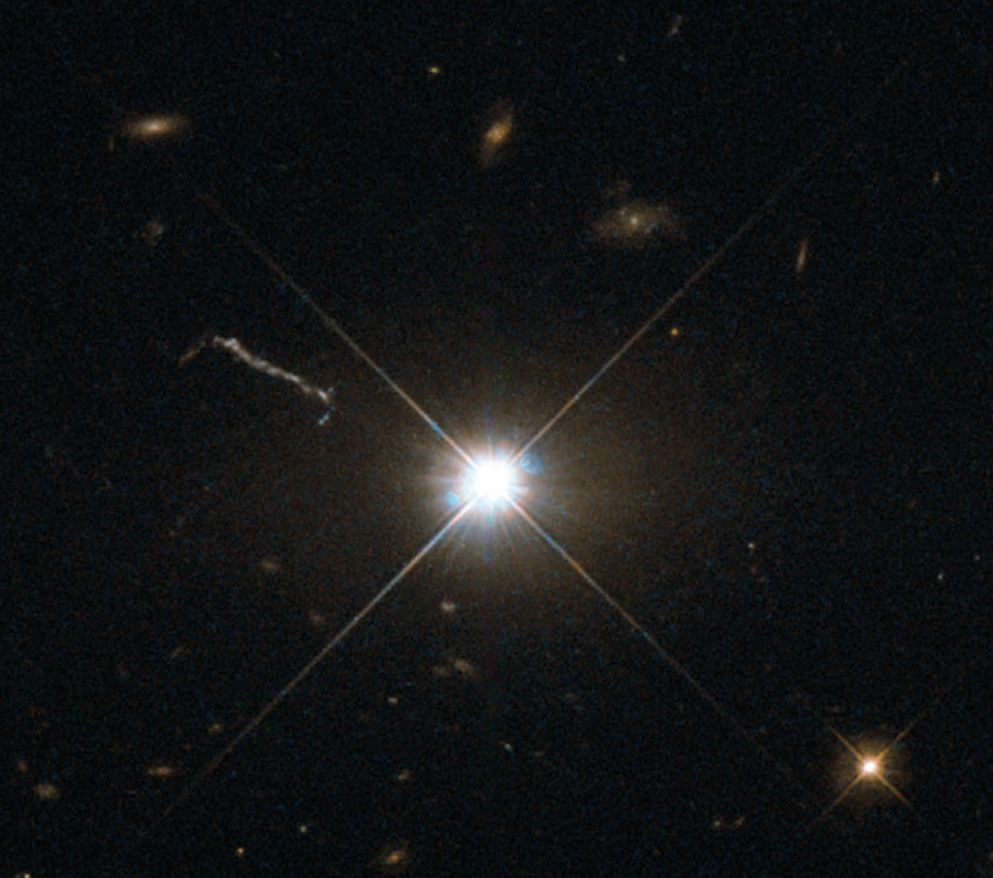
»Skiven af stof omkring det sorte hul har mange forskellige temperaturer. Der er varmest tættest på det sorte hul, og så falder temperaturen, jo længere udad man kommer. Så man får et meget bredt spektrum fra den termiske stråling,« siger Johan Fynbo og tilføjer, at

der også kan observeres såkaldt synkrotronstråling fra ladede partikler, der accelereres i det kraftige magnetfelt, der dannes omkring det sorte hul.

### Lyset fra kvasarer kan passere igennem galakser

Netop fordi kvasarer er så ekstremt lysstærke, kan de ses på meget lang afstand, og når man kigger ud i universet, ser man også tilbage i tiden. Lyset har været 13 milliarder år undervejs fra de fjerneste kvasarer, så de giver et indblik i universets barndom.

Men for Johan Fynbo er det ikke



I et teleskop ligner 3C 273 en stjerne, men det ekstremt lysstærke objekt er i virkeligheden en kvasar – her fotograferet af Hubble-teleskopet. Den er cirka to milliarder lysår herfra og velkendt blandt amatørastrofysikere, for 3C 273 er det fjerneste objekt, det er muligt at få øje på gennem hobbyteleskoper. De fleste kvasarer er dog meget længere væk. Foto: ESA/Hubble & NASA

kan være milliarder af lysår herfra og lyser så meget svagere end kvasaren.

Ud fra størrelsen af dæmpningen kan man beregne antallet af neutrale hydrogenatomer, lyset har passeret igennem på sin vej imod os, og dermed få et mål for galaksens størrelse. Og ved at kigge på, hvor mange kvasarer, der får sit lys dæmpet af galakser, kan man få en idé om tætheden af galakser i universet.

### De fleste tidlige galakser var ganske små

I midten af 1980'erne begyndte astrofysikere med amerikaneren Art Wolfe i front at bruge kvasarlyst til at studere galakser på den måde. Og til at starte med kom resultaterne bag på forskerne:

»Man fandt ud af, at kvasarlyst passerer igennem en galakse meget hyppigere end forventet ud fra tætheden af galakser i det lokale univers. Der var to mulige forklaringer: Enten var galakserne meget større før i tiden, eller også var der mange flere af dem,« forklarer Johan Fynbo og fortsætter:

»Nu var udfordringen at få øje på nogle af de galakser, så man kunne finde ud af, om de var store eller små. Det var noget af det, jeg arbejdede med i min ph.d. i slutningen af 1990'erne. Vi fandt efterhånden ud af, at langt de fleste af de galakser, der dæmper lyset fra kvasarer, må være små dværggalakser.«

»Der er mange flere dværggalakser

## Johan Fynbo

Johan Fynbo er professor i astrofysik ved Niels Bohr Institutet på Københavns Universitet. Han er tilknyttet forskningscenteret The Cosmic Dawn Center (DAWN), der både har til huse på Københavns Universitet og på Danmarks Tekniske Universitet.



Johan Fynbo studerer galakser i det unge univers – dvs. de første 2-3 milliarder år efter Big Bang. Særligt arbejder han med at studere grundstofdannelse i de første galakser. Til det formål udnytter han lysstærke objekter som kvasarer og eftergløder fra gammaglimt. Johan Fynbo er også stærkt engageret i udvikling af nye instrumenter. jfynbo@nbi.ku.dk

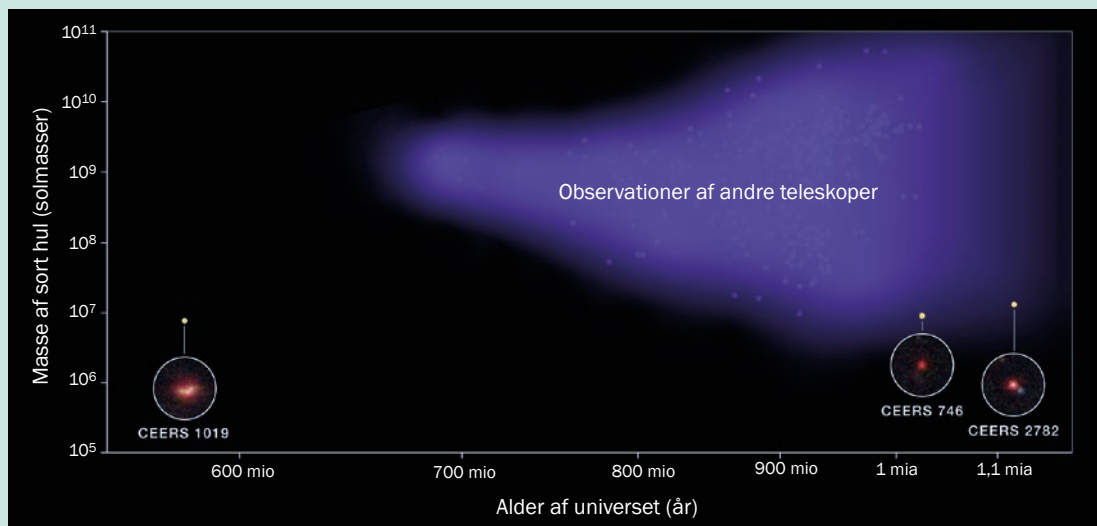
kvasarerne i sig selv, der trækker. Han er mere interesseret i de galakser, som befinder sig mellem kvasarerne, og de teleskoper, der bruges til at observere dem.

»Kvasarerne er spændende, men for mig er de et værktøj til at studere galakser, der er meget langt væk. Hvis lyset fra en kvasar passerer igennem en galakse, vil en del af lyset blive absorberet af galaksens materiale. Når man kigger på spektret fra kvasaren, vil man se

meget kraftige absorptionslinjer fra hydrogen, hvis der ligger en galakse i sigtelinjen,« siger han.

I første omgang kigger forskerne efter det dyk i spektret, der skyldes, at ultraviolet lys fra kvasaren absorberes af neutrale hydrogenatomer, der går fra grundtilstanden til første exciterede tilstand – den såkaldte Lyman-alfa-absorptionslinje. Dykket kan fortælle en hel del om galaksen, som i sig selv kan være uhyre svær at få øje på, fordi den

## De første kvasarer var tidligt på den



Lyset fra CEERS 1019 har været 13,2 milliarder år undervejs. Det røber Webb-teleskopets infrarøde spektroskop, som giver en rødforskydning på 8,679. Credit: NASA, ESA, CSA, Leah Hustak (STScI)

I 2021 præsenterede et internationalt hold astronomer den hidtil fjerneste kvasar, der fik navnet J0313–1806. Kvasaren lyste kraftigt op, da universet blot var 670 millioner år gammel. Først nu, mere end 13 milliarder år senere, er lyset nået frem til os.

Astronomerne anslår, at kvasaren drives af et sort hul med en masse på 1,6 milliarder solmasser. Det er ikke helt nemt at forklare, hvordan et så stort hul kunne nå at være dannet så tidligt i universets historie.

For nyligt blev et endnu fjernere supermassivt sort hul fundet ved hjælp af Webb-teleskopet. Det sorte hul i

galaksen CEERS 1019 har en mere beskedne størrelse, idet massen estimeres til at være ni millioner gange Solens masse, og det var i fuld gang med at vokse sig større ved at sluge gas, da universet var 570 millioner år gammelt.

Den aktive galaksekerne i CEERS 1019 lyser ikke så voldsomt, at forskerne bag opdagelsen kalder den en kvasar. I stedet skriver de i den videnskabelige artikel, der publiceres i *The Astrophysical Journal Letters*, at der kan være tale om en galaksekerne, der senere udvikler sig til en kvasar – en form for forfader (progenitor) til de kvasarer, der opstår senere.

end større galakser som Mælkevejen, og når man går tilbage i tiden, var endnu flere af galakserne små. Det vidste man ikke på det tidspunkt.»

Selv med de største teleskoper kunne astrofysikerne kun sjældent få øje på de galakser, der efterlader absorptionsspektre i kvasarlyset. Det hænger sammen med, at de fjerne dværggalakser lyser så svagt, at de er umulige at få øje på i teleskoper. De er derude, men røber kun deres eksistens ved at dæmpe lyset fra kvasarer.

Ind imellem lykkes det dog at indfange og analysere lyset fra en af de galakser, der set fra Jorden ligger meget tæt på en kvasar. Det kræver et stort teleskop med en høj opløsningsevne, og her kom rumteleskopet Hubble, der blev opsendt i 1990, til hjælp.

### Store galakser rummer tunge grundstoffer

I slutningen af 1990'erne kom endnu et nyt superteleskop til verden, nemlig Very Large Telescope (VLT), flagskibet for Det Europæiske Sydobservatorium (ESO). Observatoriet er placeret på toppen af det 2.625 meter høje bjerg Paranal i Atacama-ørkenen i Chile.

»I august 1999 var der en total solformørkelse i Europa, så de fleste europæiske astronomer blev hjemme. Så kunne jeg, som den første dansker, komme til at observere med det nybyggede VLT-observatorium. Her lykkedes det at fange lyset fra to galakser, der forårsager dæmpning af lyset fra kvasarer,« fortæller Johan Fynbo.

De galakser, som astrofysikerne kan observere direkte, rummer ikke bare hydrogen. I det absorp-

tionsspektrum, de synlige galakser efterlader i kvasarlyset, er der spektrallinjer fra en lang række andre grundstoffer som carbon, oxygen, silicium, jern og mange flere. Disse grundstoffer, der er tungere end helium, er dannet i stjernerne og spredt ud i galaksen, når tunge stjerner er eksploderet som supernovaer.

Men i rigtig mange absorptionspektre for de galakser, der ikke kan ses direkte, er der kun meget svage linjer fra de tunge grundstoffer. Her fandt forskerne frem til, at det må skyldes, at de små dværggalakser, der er svære at få øje på, ikke er store nok til at fastholde de tunge grundstoffer, der skydes ud fra supernovaer.

I supernovaeksplosionen får stoffet en hastighed, der er så høj, at den overstiger undvigelseshastigheden



DANMARKS FRIE FORSKNINGSFOND  
INDEPENDENT RESEARCH FUND DENMARK



Det europæiske teleskop VISTA i Chile er blevet udstyret med en spektrograf, så astronomerne kan analysere lyset fra de cirka 200.000 kvasarer, de forventer at finde ved hjælp af rumteleskopet Gaia. Foto: G. Hühdepohl (atacamaphoto.com)/ESO

fra dværggalakser. De små galakser er ikke massive nok til, at de kan holde på supernovaernes tunge grundstoffer, der i stedet ender i det intergalaktiske rum.

De større galakser bliver til gengæld stadig mere beriget med tunge grundstoffer, efterhånden som tiden går. Ved at måle, hvor kraftige de forskellige spektrallinjer i spektret for en given galakse er, kan forskerne finde ud af, hvad galakserne rummer af grundstoffer. Og ved at måle rødforskydningen af spektrallinjerne kan de finde ud af, hvornår i universets historie, galaksen så sådan ud.

### Kvasarerne står stille på himlen

Lyset fra kvasarerne rummer således et væld af informationer om de fysiske og kemiske egenskaber for galakser i forskellige epoker. Tjekker man mange tusinde kvasarer for absorptionspektre fra galakser, kan man få en statistisk overbe-

visende model for galakserne og deres udvikling gennem universets historie.

Her kommer det internationale forskningsprojekt The 4MOST-Gaia Purely Astrometric Quasar Survey, forkortet 4G-PAQS, ind i billedet. Det har til formål at bruge data fra det europæiske rumteleskop Gaia til at finde kvasarer, der efterfølgende kan studeres nærmere. Projektet ledes af danske Jens-Kristian Krogager, som er uddannet på Niels Bohr Institutet og nu arbejder på forskningscentret for astrofysik i Lyon i Frankrig, og det har deltagelse af Johan Fynbo og flere andre forskere fra Københavns Universitet.

Gaia blev sendt op i 2013 og er stadig i fuld gang med at affotografere himmelrummet igen og igen. Målet er at skabe et detaljeret, tredimensionalt kort over vores galakse. Med Gaia får astronomerne et katalog med position og hastighed for mere

end halvanden milliard af Mælkevejens stjerner, men som sidegevinst fanger rumteleskopet også lyset fra hundredtusindvis af kvasarer.

Stjerner står sjældent stille på himlen. De stjernebilleder, vi ser på himlen i dag, ser helt anderledes ud om 100.000 år, fordi stjernerne bevæger sig i alle mulige forskellige retninger, og det kan Gaia måle. Fordi kvasarerne er så langt væk, ser de til gengæld ud til at stå stille på himlen. Forskerne bag Gaia bruger kendte kvasarer som fikspunkter til at skabe en referenceramme, som stjernerne bevæger sig i forhold til.

Holdet bag 4G-PAQS bruger kataloget fra Gaia til at identificere kvasarer på en ny måde, nemlig ved at fokusere på himmellegemer, der ikke bevæger sig. Bagefter skal kvasarernes spektre analyseres, så forskerne kan finde ud af, om lyset dæmpes af galakserne – og hvilke egenskaber galakserne i så fald har.

## Stort teleskop har fået spektroskopiske superkræfter

I retning af de galaktiske poler er der langt færre stjerner end i Mælkevejens plan, så i første omgang nøjes astronomerne med at kigge på himmellegemer, der ligger inden for 30 grader fra den galaktiske sydpol. På den måde bliver det nemmere at finde kvasarerne blandt de mange stjerner.

Når kvasarerne er lokaliseret, skal lyset fra dem analyseres, og her kommer det europæiske teleskop VISTA (Visible and Infrared Survey Telescope for Astronomy) i brug. Det store teleskop, der er placeret tæt på VLT i Chile, er netop blevet forsynet med en spektrograf kaldet The 4-metre Multi-Object Spectroscopic Telescope (4MOST). Med 4MOST kan astronomerne få spektre fra op til 2400 objekter ad gangen, og i alt regner forskerne bag 4G-PAQS med at analysere lyset fra cirka 200.000 kvasarer.

Det smarte ved denne metode er, at forskerne får alle kvasarerne med – i hvert fald alle dem, som lyser stærkt nok til, at Gaia kan fange dem. Og det er ikke en selvfølge, for normalt finder astronomerne kvasarer ved at kigge efter stjernelignende objekter, der udsender mere ultraviolet og blått lys, end stjerner normalt gør – det er umiddelbart den letteste metode til at skelne mellem en stjerne og en kvasar. Men hvis man finder kvasarer på den måde, går man glip af dem, der fremstår mere røde i det, fordi lyset fra dem har passeret igennem støv.

Når astronomer taler om støv, mener de ikke nullermænd, men partikler mindre end sandkorn – ganske små krystaller dannet af oxygen, silicium, carbon, magnesium og jern. Støvpartiklerne dannes blandt andet i dødskrammerne fra mellemstore stjerner og i supernovaer, og hvis lyset fra kvasarerne passerer igennem store støvskyer, ændrer det farve, siger Johan Fynbo:

»Støvkornene absorberer mere af det blå end af det røde lys. Så



Illustration med det europæiske rumteleskop Gaia, som arbejder på kortlægge stjernerne i Mælkevejen. Kilde: ESA/ATG medialab; baggrund: ESO/S. Brunier

støvet har en rødfarvende effekt. Det kan vi også se for nogle af de kvasarer, der får dæmpet lyset af metalrige galakser – de fremstår røde på grund af støvet i galaksen. Andre er røde, fordi der er støv tættere på kvasarens sorte hul.«

### Universets historie afsløres

På DAWN har forskerne tyvstartet arbejdet med at analysere røde kvasarer, før 4G-PAQS rigtig går i gang. Danmarks Frie Forskningsfond støtter projektet QUDES (quasars in dusty environments) med 2,5 mio. kroner, hvoraf en del er gået til at ansætte ph.d.-studerende Simone Vejlggaard Nielsen. For tiden arbejder hun med de røde kvasarer ved ESO's hovedkvarter i Sydtykland.

Men hidtil har en del af kvasarerne – ikke mindst dem, hvis lys passerer igennem en galakse på vej mod os – undgået astronomernes opmærksomhed. Først med 4G-PAQS-studiet får de alle kvasarerne med, fordi forskerne ikke kigger på farven af objekterne, men kun om de står stille på himlen eller ej.

»Til næste år vil vi begynde at lave en komplet opmåling af kvasarerne i det område af himlen, vi kigger på. Vi vil se, hvordan kvasarpopulationen ser ud, når kvasarerne er fundet uden farveudvalgsriterier,« siger Johan Fynbo og fortsætter:

»Når datasættet ikke er forstyrret af udvalgs effekter, kan vi begynde at undersøge, hvor mange af kvasarerne, der får lyset dæmpet af galakser. Og så kan vi finde ud af, hvor mange af de galakser, der var i universet få milliarder år efter big bang, der er rige på tunge grundstoffer.«

Lige efter big bang var der kun hydrogen, helium og en lille smule litium i universet. Resten af grundstofferne er kommet til senere. Med 4G-PAQS kan forskerne få svar på, hvordan grundstofindholdet i galakserne har udviklet sig gennem milliarder af år, og hvordan variationen blandt galakserne har været i tidens løb.

Desuden vil det store forskningsprojekt give masser af ny viden om kvasarerne i sig selv. Astronomerne vil bedre kunne bedømme antallet og størrelsen af dem og dermed også massen af de supermassive sorte huller i universets ungdom, og de får indsigt i, hvordan kvasarerne dannes og udvikler sig. Og så er der jo altid en chance for, at der dukker helt nye og spændende ting op, som aldrig er set før, slutter Johan Fynbo:

»Hvis der er en ny form for ekstragalaktisk objekt, som står stille på himlen, så vil vi se det. Vi har mulighed for at finde noget uventet.« ■

### Videre læsning:

Geier, S.J. et al (2019): Gaia-assisted selection of a quasar reddened by dust in an extremely strong damped Lyman-absorber at  $z = 2.226$ . *Astronomy & Astrophysics*, Vol. 625, id.L9

Verdensbilledet i forandring – et hundredårigt perspektiv. Redigeret af Lone Bruun, Johan Fynbo, Michael Quaade og Nicolai Vestergaard-Hansen. Forlaget Epsilon, 2016.



**DANMARKS FRIE FORSKNINGSFOND**  
INDEPENDENT RESEARCH  
FUND DENMARK

Saldur-bækken ligger i Matscher-dalen, i den italienske alpeprovins Bolzano, i Sydtyrol. Foto: Dean Jacobsen.

# VANDKRAFT VERSUS VANDMILJØ

Et opløftende eksempel fra  
De italienske Alper

## Om forfatterne



Alberto Scotti er ph.d. og tidligere forsker ved 'Institute for Alpine Environment – Eurac Research' i Bolzano, Italien. Nu konsulent ved APEM Ltd. England. A.Scotti@apemltd.co.uk



Roberta Bottarin er ph.d. og vice-institutleder ved Institute for Alpine Environment – Eurac Research i Bolzano, Italien. Roberta.bottarin@eurac.edu



Dean Jacobsen er lektor og sektionsleder ved Ferskvandsbiologisk Sektion, Biologisk Institut, Københavns Universitet. djacobsen@bio.ku.dk

**Behovet for CO<sub>2</sub>-neutral energi har skabt en voldsom vækst i antallet af vandkraftværker på verdensplan. Det har rejst bekymring for konsekvenserne for biodiversiteten og økologien i de vandløb, hvor værkerne anlægges.**

**Vi har fulgt en gletsjærfødt alpebæk før og efter etableringen af et lille vandkraftværk og beretter om ingen målbare effekter på vandløbets økologi.**

**D**er er i disse år et sandt boom i anlæggelse af vandkraftværker, og det gælder nærmest overalt på kloden. Forklaringen er naturligvis et stigende behov for bæredygtig, klimaneutral energi. Vandkraftværker er ofte placeret i bjergegne, fordi man der har større faldhøjde og dermed mere energi til rådighed, og Alperne er et område med rigtig, rigtig mange af slagsen.

Der findes to grundlæggende forskellige typer af vandkraftværker. *Magasinkraftværker* ligger altid i forbindelse med en dæmning og et bagvedliggende vandreservoir. Turbinerne er placeret ved dæmningen, og vandet ledes ikke væk fra floden. *Magasinkraftværker* lagrer

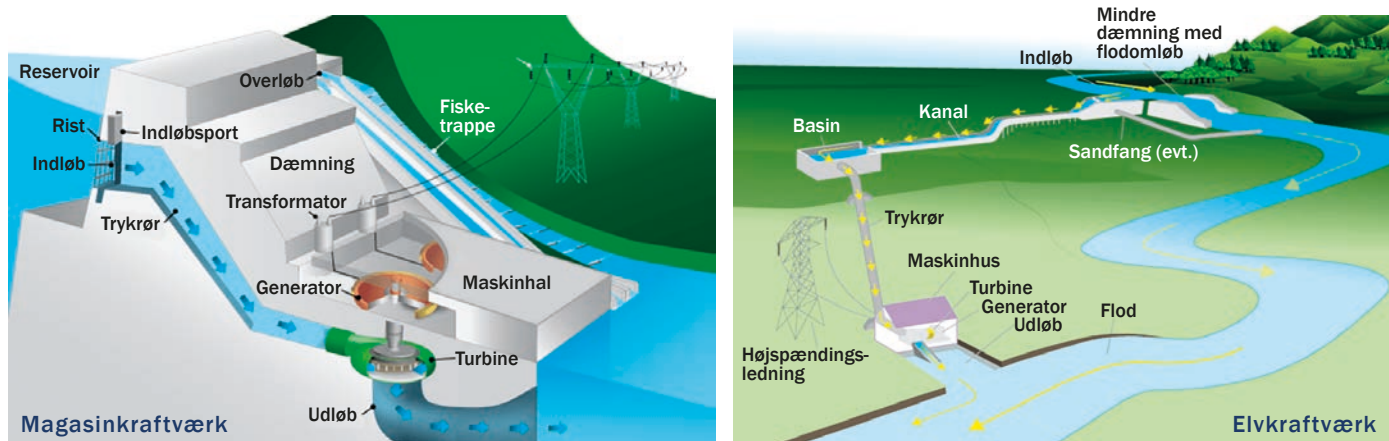
vand i overskudsperioder, som kan bruges til produktion af strøm i perioder med lidt vand. Denne type vandkraftværk udgør typisk et markant landskabeligt indgreb, med store effekter på den opstemmede flods økologi.

*Elvkraftværker* leder vand væk fra floden gennem rør til turbinerne, som kan ligge langt fra vandindtaget og uden for vandløbet selv. Vandføringen i floden varierer med nedbør og afsmeltning, hvilket betyder at energiproduktionen bliver større i perioder med meget nedbør og snesmeltning, mens det mindskes i perioder med tørke. Det væsentlige er, at floden med denne type anlæg ikke er totalt opstemmet bag en dæmning. Det er også

afgørende, at der flyder vand uden om vandindtaget, således at vandløbsstrækningen mellem vandindtaget og udløbet fra turbinen længere nede ikke er helt tørlagt. Der er flere undervarianter af elvkraftværk-typen, men de anses ofte for at være generelt mindre ødelæggende for både landskab og flod-system. På trods af dette er der alligevel en del undersøgelser, som faktisk har påvist negative effekter på floders biodiversitet og økologi.

## Undersøgelser i Saldur-bækken

Et eksempel på et elvkraftværk finder vi i Saldur-bækken, som ligger i Matscher-dalen (se foto) i den italienske alpeprovins Bolzano, i Sydtyrol. Saldur-bækken afvander et område på 101 km<sup>2</sup>, er cirka 21,5 km



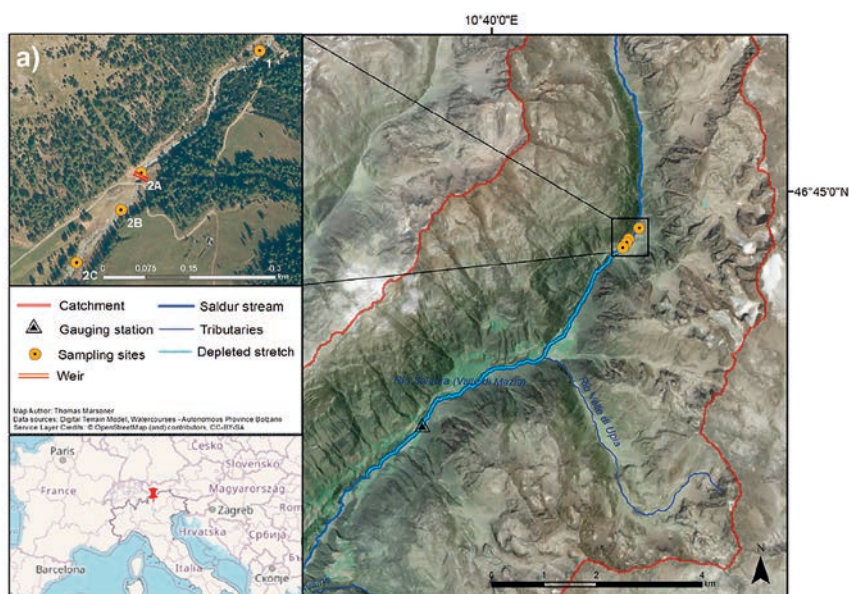
Figur 1. Schematisk fremstilling af de to primære typer af vandkraftværker - magasinkraftværk og elvkraftværk (som det i Saldur-bækken). Credit: U.S. Department of Energy.

Figur 2. A) Placeringen af prøvetagningslokaliteterne langs Saldur-bækken i Matschertal.

Lokalitet 1 fungerede som upåvirket kontrolsted, mens lokalitet 2A var umiddelbart opstrøms for opstemningen, lokalitet 2B umiddelbart nedstrøms for opstemningen og lokalitet 2C cirka 150 m nedstrøms for opstemningen og udløbsrøret fra afvandningstankene. Derudover var der to prøvetagningslokaliteter (2D og 3, som ikke er vist på kortet) henholdsvis cirka 3 og 6 km nedstrøms for opstemningen.

På hver lokalitet blev bundlevende smådyr indsamlet som 12 kvantitative prøver indenfor en 20-50 m strækning af vandløbet

B) Forstørret overblik over vandindtagets placering i 2000 meters højde og de omkringliggende prøvetagningslokaliteter.



lang, og udspringer fra Matscher-gletsjerens smeltevand. Mange sektorer er afhængige af Saldur-bækkens vand, husholdninger, turisme, akvakultur, men frem for alt landbrug og vandkraftproduktion.

Elvkraftværket blev etableret i 2014-2015, og selve vandindtaget ligger i 2000 meters højde og består af en rist med hældning placeret henover bækken (en såkaldt Tyrolean-dæmning, se foto næste side). Derpå ledes vandet via en brønd under risten og gennem et rør til turbinen, som ligger 456 højdemeter længere nede, hvor vandet ledes tilbage til bækken.

Saldur-bækken og dens opland har været en del af det prestigefyldte økologiske monitoringsnetværkILTER siden 2014. Et af kravene til at blive optaget i dette netværk er tilgængeligheden af langtidssdata. Siden 2010



har Institute for Alpine Environment of Eurac Research regelmæssigt (dvs. nogle gange om året) taget prøver af bundlevende smådyr langs Saldur-bækken. Disse smådyr er rigtig gode som biologiske indikatorer for miljøtilstand. Der findes ikke fisk i den øvre del af bækken. Formålet med disse undersøgelser var at



Foto: Dean Jacobsen

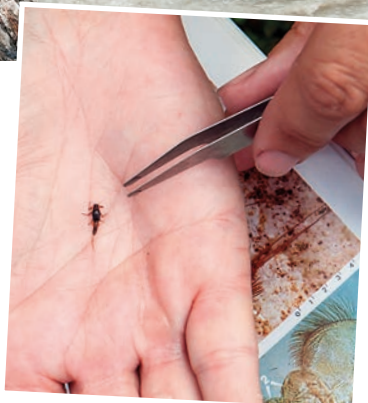
Figur 3. Vandindtaget, en såkaldt tyroler-dæmning, til vandkraftværket på Saldur-bækken. Bækkens hydrologiske dynamik er præget af snesmeltning i juni og juli og af gletschersmeltning primært i august. En målestation i 1.632 meters højde – cirka 11 km fra gletsjerudspringet – viser en typisk vandføring på omkring 0,6 m<sup>3</sup>/s om vinteren, men denne stiger til 5-10 m<sup>3</sup>/s om sommeren med toppe på op til 15 m<sup>3</sup>/s i tilfælde af kraftige regnsky. Der ledes i gennemsnit 0,36 m<sup>3</sup>/s og maksimalt 0,90 m<sup>3</sup>/s til turbinen, og det genererer i gennemsnit ca 2MW og maksimalt 3,4 MW. Det giver en årlig energiproduktion på 12 GWh, hvilket svarer nogenlunde til et par gennemsnit-landbaserede danske vindmøller.



Figur 4. Øverst: Indsamling af prøver af den bundlevende smådyrsfauna i Saldur-bækken.

Eksempel på et af medlemmerne af smådyrsfaunaen – her en nymfe af døgnfluen *Baetis sp.*

Fotos: Eurac Research/Ivo Corrà.



etablere et datasæt, der i et langsigtet perspektiv kan give indsigt i økologien i gletsjerfødte vandløb, samt at overvåge, hvordan dette følsomme økosystem vil reagere på virkningerne af klimaforandringer. Men undersøgelserne giver samtidig en god basis for at undersøge eventuelle effekter af vandkraftværket på vandløbets fauna.

Derfor iværksatte vi i 2015 en undersøgelse med det specifikke formål. I perioden fra 2015 (året før vandkraftværket blev taget i drift) og til 2019 indsamlede vi hvert år i april-maj og september-oktober bundlevende smådyr på seks forskellige prøvetagningssteder langs vandløbet. I disse måneder er mængden af smeltevand lav, og procentdelen af indvundet vand forholdsvis højere, og dermed også potentialet for at opdage en skadelig miljøpåvirkning. I alt indsamlede og identificerede vi i denne undersøgelse 34.836 organismer.

### Ingen effekt på vandløbets fauna

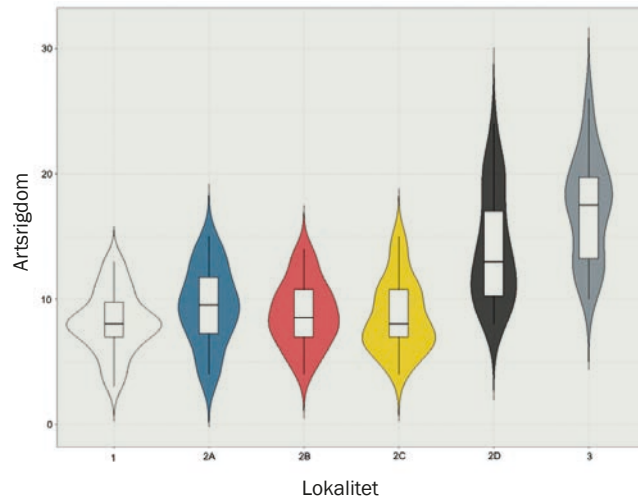
Vi vurderede potentielle ændringer i faunaens tæthed, artsdiversitet, sammensætning og funktionalitet ved hjælp af en række statistiske teknikker. For eksempel blev hele samfundet analyseret ved hjælp af en "før-efter-kontrol-påvirkning" (BACI)



Figur 6. Violinplot af artsrigdom på de seks undersøgelseslokaliteter langs Saldur-bækken. Diagrammet opsummerer resultaterne af alle prøvetagningerne gennem det 5-årige studie.

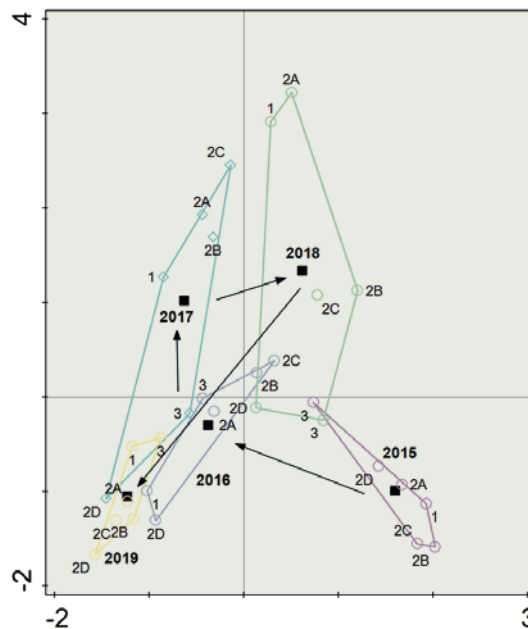
Der er naturligvis spredning/variation i data, og bredden af "violin" repræsenterer fordelingen af resultaterne for de mange prøver taget både før og efter etableringen af vandkraftværket. Den midterste vandrette streg i boxen angiver medianværdien, og de lodrette 50 % percentiler over og under medianværdien.

Det er tydeligt, at hverken den gennemsnitlige artsrigdom eller variation på lokaliteterne tæt på vandindtaget (2A, 2B, 2C) adskiller sig signifikant fra den upåvirkede kontrollokalitet 1. Længere nedstrøms, på lokalitet 2D og 3, stiger artsdiversiteten, hvilket er typisk for gletsjer-fødte vandløb.



Figur 7. Resultatet af en NMDS ordination ("Non-metric Multidimensional Scaling") på sammensætningen af smådyrsfaunaen på de 6 prøvetagningslokaliteter i løbet af de 5 år. Hver cirkel repræsenterer gennemsnittet for den lokalitet det pågældende år. Cirkler, som ligger tæt på hinanden, har en fauna, som i høj grad udgøres af de samme arter, mens cirkler, som ligger langt fra hinanden, indikerer stor forskel i sammensætning. De sorte firkanter angiver midtpunktet for hele vandløbet det pågældende år, og pilene hvordan faunaen generelt varierer fra år til år.

Det er tydeligt, at den upåvirkede kontrollokalitet 1 varierer lige så meget i tid som de andre lokaliteter, og at den tidlige variation langt overstiger variationen mellem lokaliteter indenfor et givent år. Lokaliteter tæt på vandindtaget (2A, 2B, 2C) flytter generelt rundt sammen med lokalitet 1.



model på antallet af arter samt flere forskellige diversitetsindeks. Ingen af dem viste nogen effekt af vandkraftværket. Vi fandt en vis variation fra år til år, men variationen var lige stor på en formodet upåvirket kontrollokalitet længere oppe ad vandløbet og på de lokaliteter, der potentielt kunne være mest påvirket lige omkring vandindtaget. Det tyder på, at variationen skyldtes naturlige årsager, der ikke var relateret til vandkraftværkets tilstedeværelse og drift (figur 6). Heller ikke artssammensætningen af samfundene ændrede sig systematisk som følge af vandkraftværket, men udviste også stor tidlig variation (figur 7).

Vi undersøgte også, om vandkraftværket kunne have påvirket faunaens funktionalitet (dvs. med fokus på, hvad arterne gør i økosystemet). Den analysemetode, vi benyttede, går ud på at beregne det vægtede gennemsnit for samfundet af et sæt funktionelle indekser. Ingen af de udvalgte funktionelle eller biologiske træk, der potentielt kunne have ændret sig efter opstarten af vandkraftværket (som arternes præference for underlagstype eller strømforhold, fourageringsmåde, mobilitet, livsstadie i vand, generationslængde) viste en forskel på tværs af tid (dvs. før og efter implementering

af vandkraftværket) eller rum (dvs. kontrollokaliteter sammenlignet med påvirkede lokaliteter). At der ikke var nogen ændringer i det funktionelle aspekt af smådyrsfaunaen tyder på, at ingen af de vigtige økosystemfunktioner, som faunaen deltager i (såsom nedbrydning af organisk stof) eller er afhængige af (såsom produktion af bundlevende alger) blev påvirket af vandkraftværket.

### Kan Saldur-undersøgelsens resultater generaliseres?

Ikke ubetinget. De fundne resultater er specifikke for Saldur-bækken og kan ikke uden videre overfø-

### Videre læsning

Couto, T. B., & Olden, J. D. (2018). Global proliferation of small hydropower plants—science and policy. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 16(2), 91-100.

Kelly-Richards, S., Silber-Coats, N., Crotoft, A., Tecklin, D., & Bauer, C. (2017). Governing the transition to renewable energy: A review of impacts and policy issues in the small hydropower boom. *Energy Policy*, 101, 251-264.

Kuriqi, A., Pinheiro, A. N., Sordo-Ward, A., Bejarano, M. D., Garrote, L. (2021). Ecological impacts of run-of-river hydropower plants—Current status and future prospects on the brink of energy transition. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 142. doi.org/10.1016/j.rser.2021.11083

Lange, K., Meier, P., Trautwein, C., Schmid, M., Robinson, C. T., Weber, C., & Brodersen, J. (2018). Basin-scale effects of small hydropower on biodiversity dynamics. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 16(7), 397-404.

Scotti, A., Jacobsen, D., Stefan, V., Tappeiner, U., & Bottarin, R. (2022a). Small hydropower—small ecological footprint? A multi-annual environmental impact analysis using aquatic macroinvertebrates as bioindicators. Part 1: Effects on community structure. *Frontiers in Environmental Science*, 1022.

Scotti, A., Jacobsen, D., & Bottarin, R. (2022b). Small hydropower—small ecological footprint? A multi-annual environmental impact analysis using aquatic macroinvertebrates as bioindicators. Part 2: Effects on functional diversity. *Frontiers in Environmental Science*, 1022.

res til vandløb af andre typer. At Saldur-bækken er gletsjer-født med den særlige hydrologi, som det medfører, er formentlig temmelig afgørende, idet samfundsmønstrene primært er drevet af den dynamiske påvirkning fra afsmeltningen. Hvis vandløbet havde haft en bestand af vandrende fisk, for eksempel ørreder, kan vi heller ikke udelukke, at denne var blevet negativt påvirket af spærringen. Imidlertid har gletsjerfødte vandløb typisk ikke fisk i de øvre strækninger, og denne vandløbstype er jo temmelig almindelig højt oppe i Alperne, så forholdene i Saldur-bækken er ikke usædvanlige.

Den specifikke konstruktion og drift af vandkraftværket er også væsentlig for de fundne resultater. Vandløbets dynamik og kontinuitet blev ikke væsentligt påvirket af vandkraftværket, selv på den strækning med mindre vand, altså mellem vandindtaget og udløbet fra turbinen. Her er det afgørende, at selskabet, som driver vandkraftværket, til enhver tid respekterer de begrænsnin-

ger for den andel af vandløbets egen vandføring, som må ledes til turbinerne.

For at minimere påvirkninger af vandløbets økologi er det nemlig vigtigt, at vandløbet altid får lov at beholde den del af sin vandføring, som er fastsat af miljømæssige årsager (det såkaldte "environmental flow") – i Saldur-bækken skal der til enhver tid løbe minimum 96 L/s, plus 20% af maksimal vandføring i sommerens afsmeltningssperiode. Det gælder særligt i perioder, hvor vandløbets egen vandføring er lav (dvs. uden for smeltesæsonen), men hvor det er særlig fristende for vandkraftværket at "stjæle" alt vandet for at opretholde en vis el-produktion. Ligeledes er designet og højden af dæmningen væsentlig for at undgå en for kraftig stuvning af vandet bag dæmningen. Derudover er det sandsynligt, at områdets og vandløbets store hældning også bidrog til at minimere den potentielle påvirkning fra vandkraftværket ved at fremme den kontinuerlige strømning af turbulent vand.

## Fordele og ulemper ved vandkraftværker

Denne undersøgelse viser, at under de rigtige betingelser kan små vandkraftværker bidrage med klima-neutral og vedvarende energi med små eller ingen målbare miljømæssige negative effekter i vandløbet. Dertil kommer, at når først anlægsarbejdet er overstået, så kan små elvraftværker, som det ved Saldur-bækken, konstrueres, så man dårligt lægger mærke til dem i landskabet og dermed har en minimal skæmmende effekt. Ulempen er naturligvis, at de små vandkraftværker ikke leverer så meget energi, og der derfor skal bygges mange af dem, før det batter.

I modsætning hertil står de store vandkraftværker med vandreservoarer bag ofte enorme betondæmninger. Dem er der langt færre af, men de leverer langt størstedelen af energien. Til gengæld har de flere negative effekter, det være sig ændringer i hydrologisk regime, vandtemperatur, spærring i vandløbets kontinuitet, men også med hensyn til kulstofneutralitet. ■

## Ny bachelor på SDU

### Kunstig intelligens

#### Er du nysgerrig på optimering, logik, maskinlæring, programmering, etik, algoritmer og matematik?

Med en bachelor i Kunstig intelligens fra Syddansk Universitet får du kompetencer, som allerede nu er efterspurgt i virksomheder og organisationer i Danmark og udlandet.

Du behøver ikke at kunne programmere, når du starter på uddannelsen. Du skal bare have interesse i at lære det, ligesom du skal have flair for at tænke logisk og matematisk.

Læs mere om uddannelsen på [sdu.dk/kunstig-intelligens](https://sdu.dk/kunstig-intelligens)



## Undervisningsmaterialer

Du kan finde ekstramateriale på [aktuelnaturvidenskab.dk](http://aktuelnaturvidenskab.dk), som er beregnet på undervisningen i gymnasieskolen.

### Grønlands indlandsis

Dette materialet er et forslag til to moduler á 70 minutter. Som baggrund indgår artiklen *Indlandsisens fortid og fremtid* fra *Aktuel Naturvidenskab* nr. 6, 2020. Materialet tager inspiration fra foredraget om *Hvad Grønlands indlandsis lærer os* fra foråret 2023 af glaciolog Dorthe Dahl-Jensen i serien *Offentlige Foredrag i Naturvidenskab*.

De enkelte øvelser fokuserer for eksempel på betydningen af relevante ord og begreber, at aflæse figurer samt at benytte Google Earth til at vurdere konsekvenser af mulige vandstandsstigninger ved afsmeltning af Indlandsisen.

Modulerne kan indgå i et større forløb om istider eller klimaforandringer og er tiltænkt naturgeografi C/B niveau.

### Kaffe

Materialet indeholder et forslag til to moduler på 70 minutter om kaffe – med fokus på kaffedyrkning og mere generelt på arealanvendelse. Materialet har inspiration fra foredraget om *Kaffe* fra foråret 2023 ved forskerne Aske Bosselmann, Anders Barfod og Kjeld Hermansen i serien *Offentlige Foredrag i Naturvidenskab*. I forløbet bruges artiklen *En god kop kaffe med en bismag af lattergas* af Bo Elberling og Abeline Bentzon-Tarp fra *Aktuel Naturvidenskab* nr. 2, 2023. Derudover indgår som baggrundsmateriale forskellige klip fra Youtube (på engelsk). Modulerne kan indgå i et større forløb om Landbrug eller Regnskoven og er tiltænkt naturgeografi C/B niveau.

Materialet er udarbejdet af projektgruppen på Viborg Katedralskole for *Aktuel Naturvidenskab* i forbindelse med projektet *Brobygning på første række* finansieret af Novo Nordisk Fonden.

## ABONNEMENTS-SERVICE

Har du fået ny adresse eller ønsker du at bestille et abonnement på bladet?

Kontakt os på telefon:  
3036 0662 / 3715 2094  
E-mail: [abo@aktuelnaturvidenskab.dk](mailto:abo@aktuelnaturvidenskab.dk)

Abonnement kan også bestilles via hjemmesiden: [aktuelnaturvidenskab.dk](http://aktuelnaturvidenskab.dk)

Husk at melde flytning til ny adresse. Vi modtager desværre ikke automatisk besked om din nye adresse.

### Til nye abonnenter:

Bestil en intro-pakke med otte helt nye numre plus abonnement i et år (6 numre) for kun 354,- kr. inkl. porto & ekspedition.

## OM AKTUEL NATURVIDENSKAB

### Styregruppe

- **Astrid C. Johansen**, kommunikationskonsulent Roskilde Universitet
- **Birgitte Lyhne Broksø**, kommunikationschef, Det Natur- og Biovidenskabelige Fakultet, Københavns Universitet
- **Mikkel Linnemann Johansson**, teamleder, Det Naturvidenskabelige Fakultet, Syddansk Universitet
- **David Lundbek Egholm**, professor, Faculty of Natural Sciences, Aarhus Universitet

Eftertryk kun efter aftale. Citat kun med tydelig kildeangivelse. Synspunkter, der fremføres i bladet, kan ikke generelt tages som udtryk for redaktionens holdning.

Layout: Jørgen Dahlgaard

Tryk: Jørn Thomsen Elbo A/S

ISSN: 1399-2309 (papirudgaven),  
1602-3544 (web)

Oplag: 5.000



### Redaktionsgruppe

- **Astrid C. Johansen**, Roskilde Universitet
- **Birgitte Svennevig**, Det Naturvidenskabelige Fakultet, Syddansk Universitet
- **Carsten Rabæk Kjaer**, *Aktuel Naturvidenskab*
- **Jørgen Dahlgaard**, *Aktuel Naturvidenskab*
- **Michael Skov Jensen**, Københavns Universitet

### Redaktion:

Telefon: 3036 0660 (Carsten) / 3036 0662 (Jørgen)

E-mail: [red@aktuelnaturvidenskab.dk](mailto:red@aktuelnaturvidenskab.dk)

Hjemmeside: [aktuelnaturvidenskab.dk](http://aktuelnaturvidenskab.dk)

### Postadresse:

Aktuel Naturvidenskab,  
Ny Munkegade 120, Bygning 1520,  
DK-8000 Aarhus C

### Omslagsfoto:

Udsnit af et stort olieraffineri.  
Foto: Shutterstock.

Al henvendelse til:  
Aktuel Naturvidenskab,  
Ny Munkegade 126, 8000 Aarhus C  
E: [abo@aktuelnaturvidenskab.dk](mailto:abo@aktuelnaturvidenskab.dk)  
T: 87152094

# Klik-kemi som kollektivt kunstværk

Af Carsten R. Kjaer, Aktuel Naturvidenskab

Naturvidenskabelige opdagelser bidrager ikke bare til ny erkendelse og teknologisk udvikling – de kan også inspirere til kunstneriske udfoldelser. Og hvad kan næsten være mere kunstnerisk inspirerende end en frisk dansk Nobelpris?

I løbet af sommeren har gæster på biblioteker i Aarhus og Danmarks Tekniske Museum i Helsingør haft muligheden for at deltage i fremstillingen af et kollektivt kunstværk i form af et godt to kvadratmeter stort broderi inspireret af princippet i klik-kemi. Broderiet er en kunstnerisk fortolkning af den kemiske reaktion kobberkatalyseret azid-alkyn cycloaddition, som den danske kemiker Morten Meldal modtog Nobelprisen i kemi for i 2022.

Ideen til projektet kommer fra naturvidenskabsformidler Matilda Tjellidén ved Aarhus Kommune, og den er videreudviklet i samarbejde med tekstilkunstner Lene Bruun Kolff.

»Projektet med "Klik Kemi Broderi" går ud på at skabe et rum, hvor vi sammen kan tale om kemi og om nogle af de modeller, som naturvidenskaben anvender, alt imens vores hænder arbejder på et fælles værk. Naturvidenskab er for alle, og de resultater, som danske forskere opnår, kan vi alle føle ejerskab over og være stolte af«, fortæller Matilda Tjellidén.

Den helt konkrete inspiration er en faglig illustration af reaktionen, som blev publiceret i forbindelse med Nobelprisuddelingen, og som er gengivet i Aktuel Naturvidenskab nr. 5/2022.

»Vi har så i en meget dynamisk proces lavet en genfortolkning af denne illustration ud fra den præmis, at værket både skal være smukt at se på og fagligt korrekt i den forstand, at alt, hvad der er med på værket, kan begrundes i den videnskab, der ligger bag. Det har været en fantastisk proces, hvor inspirationen til udviklingen af værket er kommet fra alle mulige mennesker,« siger Matilda Tjellidén, der selv

har en baggrund som fysik/kemi-lærer.

I processen har publikum både kunnet komme med ideer til, hvad der skulle med på værket og til at udfylde skitserne med broderi. I skrivende stund har cirka 200 personer i alle aldre bidraget til at skabe værket, og der vil stadig blive arbejdet på det frem til 1. januar 2024.

»Så der er stadig mulighed for at komme og deltage i skabelsesprocessen på DOKK1 i Aarhus eller andre biblioteker i Aarhus, som værket kommer rundt til. Og vi kan også finde ud af at tage værket med ud på andre lokaliteter, hvis nogen gerne vil lægge hus til skabelsesprocessen, og det passer ind i programmet,« slutter Matilda Tjellidén (e-mail: [tkrma@aarhus.dk](mailto:tkrma@aarhus.dk)). ■



Foto: Matilda Tjellidén.