

CO₂

fangst og lagring



FANGST OG LAGRING AF CO₂ I DANMARK

For at bremse klimaforandringerne skal vi udlede langt mindre CO₂ til atmosfæren. En af løsningerne er at fange CO₂ og lagre den i geologiske strukturer dybt under os.



Side 7

DANMARKS GEOLOGI ER IDEEL TIL CO₂-LAGRING

I Danmark har vi store mængder sandsten i undergrunden, og de udbredte formationer dybt nede rummer et stort potentiale for at lagre CO₂.



Side 18



Geografisk Orientering

Geografiforbundets
medlemsblad

Medlemskontingent:

Almindeligt medlemskab: 400 kr.
Familie (par): 500 kr.
Studerende: 200 kr.
Institutioner, skoler o. lign.: 600 kr.

Henvendelse om medlemskab/abonnement mv.:

GO Forlag
Østerbrogade 54 C, 2100 København Ø
Tlf. 6344 1683, go@goforlag.dk
Hjemmeside: www.geografiforbundet.dk

Redaktion:

Ansvarshavende redaktør og annoncetegning:
Andreas Egelund Christensen
Tlf. 2670 8038, aec@ign.ku.dk

Anton Grønfeld Wille
Emma Dissing Winzentsen
Jeannette Hinrup
Katrine Ratjen
Marie Bak Rosendahl
Mette Lyhne-Hansen
Nikka Toft Tougaard
Rasmus Skov Olesen
Rose Due
Sanne Lisby Eriksen
Simon Laursen Bager
Teis Hansen
Tilde Marie Rastorp Reinhardt

Anmelderredaktør:

Nikka Toft Tougaard
Kirsebærgrenen 189
5220 Odense SØ
Tlf. 29275522, Nikka.gts@gmail.com

Annoncepriser:

1/1 side: 7.000kr.
1/2 side: 4.000 kr.
Bagside: 7.000 kr.
Andre formater: 2.800-3.100 kr.
Se endvidere annoncearket på hjemmesiden.

Deadlines for 2025: 20/1; 20/4; 20/8; 20/10
GO udkommer medio marts, juni, oktober og december.

© Geografisk Orientering (GO)
Ikke-kommerciel udnyttelse tilladt med kildeangivelse

Kode til registrering på forbundets hjemmeside:
1971GO2008

Layout og ombrydning:

Orla Hjort – www.orlahjort.dk
Tlf. 6130 3832
Tryk: Narayana Press. Oplag: 1400
ISSN 0105-4848

Geografiforbundets styrelse:

Forperson: Lars Bo Kinnerup
Tlf. 5784 8005
lbk@geografiforbundet.dk

Næstforperson:

Iben Dalgaard, ida@geografiforbundet.dk

Kasserer:

Jens Korsbæk Jensen, jkj@geografiforbundet.dk

Kursusudvalg:

Forperson: Iben Dalgaard, ida@geografiforbundet.dk
Myuran Balasubramaniam, mb@geografiforbundet.dk

Fagudvalg:

Forperson: Kristian Nordholm
kn@geografiforbundet.dk
Lars Bo Kinnerup, lbk@geografiforbundet.dk
Mikkel Strange, ms@geografiforbundet.dk
Susanne Rasmussen, sur@geografiforbundet.dk

Suppleanter:

Lise Rosenberg, Lr@geografiforbundet.dk
Mette Starch Truelsen, mst@geografiforbundet.dk

Redaktionens forord

Kampen mod klimaforandringerne kræver en bred vifte af løsninger, og fangst og lagring af CO₂ (CCS – Carbon Capture and Storage) spiller en afgørende rolle i denne indsats. I dette temanummer af Geografisk Orientering retter vi blikket mod, hvordan Danmark – med sin særlige geografi og geologi – kan blive en vigtig aktør i udviklingen af sikre og effektive løsninger til lagring af CO₂.

Vi indleder med en introduktion til fangst og lagring af CO₂, hvor vi gennemgår, hvorfor CCS er nødvendigt for at nå de danske og internationale klimamål, hvordan CO₂ kan fanges fra punktkilder eller direkte fra atmosfæren, og hvordan den kan lagres sikkert i undergrunden. Herefter sætter vi fokus på de forvaltningsmæssige rammer, og udviklingen af et nyt klimaredskab med fokus på fangst, transport og lagring af CO₂, under Energistyrelsen som er ressortmyndighed for CCS.

På baggrund af denne introduktion zoomer vi ind på Danmarks geologiske potentiale for CO₂-lagring. Med fokus på de danske sandstensformationer og de tætte lerlag, som findes både på land og under havet, beskriver GEUS hvordan de undersøger undergrunden for egnede lagre. Som en konkret case bringer vi også et indblik i Project Greensand – et banebrydende pilotprojekt i den danske del af Nordsøen. Her lagres CO₂ for første gang permanent i et tidligere olie- og gasfelt under havbunden. Projektet demonstrerer, hvordan eksisterende infrastruktur kan genbruges til klimaforandringernes fordel og markerer et vigtigt skridt mod storskala lagring af CO₂ i Danmark og Europa.

Dernæst sætter vi fokus på de forskellige teknologier, der kan bruges til at fange CO₂. Først præsenterer Klimaskovfonden deres vigtige arbejde med skovrejsning i Danmark inden vi dykker ned i CO₂-fangst via pyrolyse og biokul. Pyrolyse omdanner biomasse til biokul, som lagrer kulstof næsten permanent i jorden, og rummer store potentialer som en billigere og mere fleksibel løsning end traditionel CCS, men også udfordringer knyttet til biomasseressourcer, energi og regulering diskuteres. Endelig får vi i artiklen om Direct Air Capture (direkte CO₂ fangst) indblik i en ny, uprøvet, men potentielt banebrydende teknologi, som endnu ikke er udrullet i Danmark, men forventes at få stor betydning.

Vi runder af med et kritisk blik på CO₂ fangst og lagring og de udfordringer, der knytter sig dertil inden vi i en afsluttende case hører om den danske startup Klimate. Tilsammen giver artiklerne et solidt indblik i de muligheder og udfordringer, der knytter sig til CO₂-fangst og -lagring i Danmark – både geologisk, teknologisk og biologisk. Vi håber, at temanummeret vil give inspiration og indsigt i et område, der får stadig større betydning for fremtidens klimainsats.

God læselyst!

På vegne af redaktionen: Simon, Emma, Nikka, Rose & Andreas

Forside: Borerig og skib med CO₂ ved den ubemandede platform Nini W.

Kilde: INEOS Energy.

Næste nummer: Trekantområdet i en globaliseret verden

CO₂ – fangst og lagring

TEMA

- 7 // Fangst og lagring af CO₂ i Danmark
- 13 // Fangst, transport og lagring af CO₂ - udvikling af et nyt klimaredskab
- 18 // Danmarks geologi er ideel til CO₂-lagring
- 26 // Lagring af CO₂ i Nordsøen kan bekæmpe klimaforandringer og blive starten på et dansk erhvervseventyr
- 32 // Skovrejsning er naturens eget klimaredskab – men kan ikke løse klimakrisen alene
- 36 // Pyrolyse og biokul som bidrag til klimaløsningen
- 42 // Skal vi selv til at fange CO₂ fra atmosfæren?
- 46 // CO₂-fangst og -lagring – et kritisk perspektiv

GEO MIX

- 51 // Dagens geograf
- 61 // Månedens link
- 62 // Nye bøger

GEOGRAFFORBUNDET

- 52 // Nyt fra Fagudvalget
- 59 // Generalforsamling - indkaldelse
- 60 // Geografisk Dag 2025
- 61 // Studieture



s. 13

Fangst, transport og lagring af CO₂ - udvikling af et nyt klimaredskab
Energistyrelsen er ressortmyndighed for CCS. Dermed er vi med til at sikre at fangst og lagring af CO₂ implementeres hurtigt, sikkert og forsvarligt i Danmark. Men hvordan gør vi det?



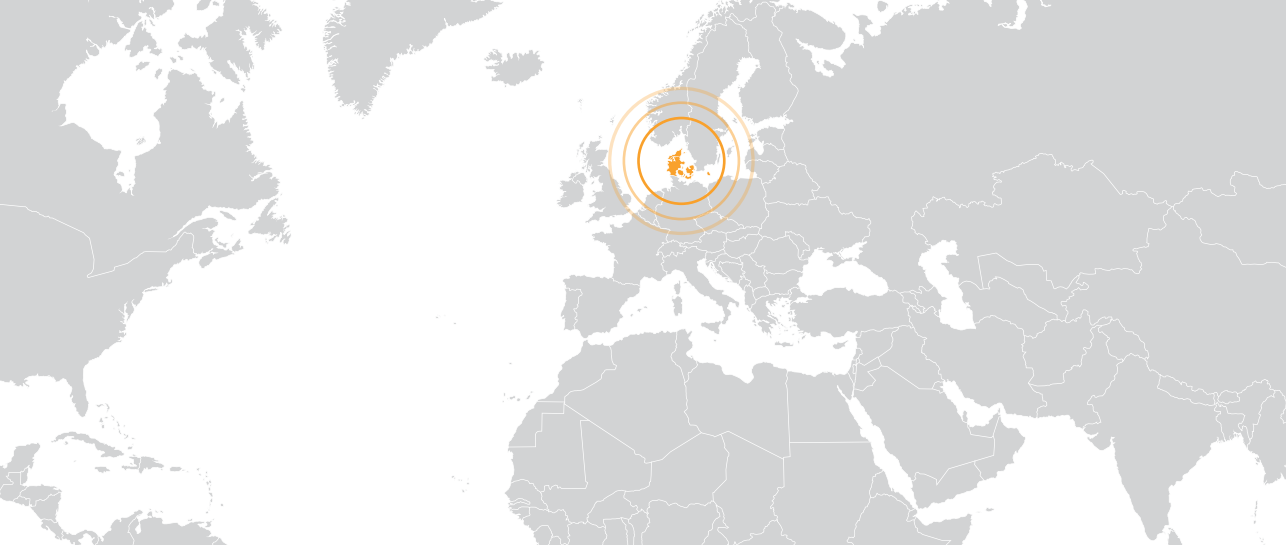
s. 26

Lagring af CO₂ i Nordsøen kan bekæmpe klimaforandringer og blive starten på et dansk erhvervseventyr
Lige nu arbejdes der intensivt på, at Danmark inden længe kan sætte gang i sikker og permanent lagring af CO₂ i Nordsøens undergrund.



s. 32

Skovrejsning er naturens eget klimaredskab – men det kan ikke løse klimakrisen alene
Hvor effektivt et klimaredskab er skov, og kan vi plante os ud af klimakrisen?



Redaktionen



Andreas Egelund Christensen

Ansvarshavende redaktør.
Ph.d. i geografi, International koordinator ved Københavns Universitet og generalsekretær for Det Kongelige Danske Geografiske Selskab



Anton Grønfeld Wille

Geografistuderende, Institut for Geovidenskab og Naturforvaltning, Københavns Universitet



Emma Dissing Winzentsen

Geografistuderende, Institut for Geovidenskab og Naturforvaltning, Københavns Universitet



Jeannette Sophie Hinrup

Cand.scient. i geografi.
Miljøstyrelsen for Råstoffer, Naalakkersuisut- Grønlands Selvstyre



Katrine Ratjen

Cand.scient. i geografi, naturvejleder hos Naturskolerne i Raadvad og Rude skov



Marie Kirstine Bak Rosendahl

Geografistuderende, Institut for Geovidenskab og Naturforvaltning, Københavns Universitet



Mette Lyhne-Hansen

Cand.scient. i geografi.
Social kontrol-vejleder i Københavns Kommune



Nikka Toft Tougaard

Cand.scient. i geografi, miljøsagsbehandler i Region Syddanmark



Rasmus Skov Olesen

Post Doc, Danish Institute for Advanced Study, Syddansk Universitet



Rose Cathrine Due

Geografistuderende, Institut for Geovidenskab og Naturforvaltning, Københavns Universitet



Sanne Lisby Eriksen

BSc i geografi og MSc i Environmental Science, fuldmægtig i Landbrugsstyrelsen



Simon Laursen Bager

Ph.d. i geografi, Bæredygtighedsdirektør, Climate.co



Teis Hansen

Ph.d. i geografi, professor ved Institut for fødevarer og ressourceøkonomi, Københavns Universitet



Tilde Marie Rastorp Reinhardt

Geografistuderende, Institut for Geovidenskab og Naturforvaltning, Københavns Universitet

ÅBENT BREV TIL BØRNE- OG UNDERVISNINGSMINISTEREN

Som følge af de ændringer i uddannelsessystemet, der enten er sket eller er under udvikling har vi i Geografforbundet fundet det nødvendigt at rette henvendelse til Børne- og undervisningsministeren, og derved gøre opmærksom på betydningen af geografi i grundskolen og på ungdomsuddannelserne.

Kære Mattias Tesfaye

Geografi er nødvendig i grundskolen og på ungdomsuddannelserne.

I skrivende stund er flere vigtige emner på dagsordenen i medierne, fx Ukraine, Gaza og Grønland. Geografi kan bidrage til forståelsen af hvordan vores verden er, virker, hænger sammen og ændrer sig. Derfor er geografi i grundskolen og på ungdomsuddannelserne nødvendig, hvilket nedenstående i kort form underbygger:

- Et nødvendigt geografisk beredskab til at kunne orientere sig og finde vej i verden samt at kunne placere begivenheder og oplevelser på sit indre kort hjælper os med at navigere i og håndtere de forandringer i verden vi oplever.
- I en årrække har klima været på dagsordenen og senest er biodiversitetskrise og drikkevand også rykket højt op på dagsordenen. Klima, vand og jordbund er grundlaget for landbaserede økosystemer. Geografi har redskaberne til at åbne for forståelsen af dette.
- Pandemien der i foråret 2020 forårsagede det danske samfunds nedlukning, viste med al ønskelig tydelighed sårbarheden i den globaliserede arbejdsdeling. Geografi kan åbne for forståelse af både sundheds-, forsynings-, handels- og velfærdsmæssige aspekter i dette system.
- Siden Rusland d. 24/2 2022 invaderede Ukraine har begrebet geopolitik været stadigt oftere nævnt, herunder sammen med udtrykket 'en ny verdensorden'. Internationale samarbejder og konflikter begrundet i politiske, historiske, økonomiske og/eller ressourcemæssige forhold er en del af det geografiske repertoire. Her har faget også redskaber til at åbne for forståelse.

- Den grønne omstilling kan bl.a. belyses med arealanvendelse, infrastruktur og energiforsyning og på globalt plan er adgang til råstoffer, forarbejdning og forsyningskæder emner, der jævnligt er under behandling i den offentlige debat. Også på disse områder har geografi redskaberne til at bidrage til forståelse af veje til en mere bæredygtig verden.

Med den kommende EPX, der bl.a. skal være særlig forsyningsvej til professionsuddannelserne, er geografi også af andre grunde end ovenstående nødvendig. Geografi på B-niveau er på Læreruddannelsen adgangsgivende til at uddanne sig til biologi-, geografi-, fysik/kemi- og natur/teknologilærere.

I Geografforbundet stiller vi os naturligvis gerne til rådighed for forsat dialog om undervisningsfaget geografi i børne- og ungdomsuddannelserne.

Børne- og undervisningsministeren har kvitteret for henvendelsen og vores indspark vil indgå i de videre overvejelser på området for den kommende EPX-uddannelse. Ekspertgruppen for fagrækken i EPX afleverer deres svar i december 2025.

Lars Bo Kinnerup
Forperson for
Geografforbundet





BØRNE- OG
UNDERVISNINGSMINISTERIET

Lars Bo Kinnerup (lbk@geografforbundet.dk)

Kære Lars Bo Kinnerup

Tak for din henvendelse på vegne af Geografforbundet med perspektiver på geografifagets rolle i grundskolen og på ungdomsuddannelserne.

Det er vigtigt, at undervisningen på tværs af uddannelsessystemet giver børn og unge de nødvendige forudsætninger for at forstå og forholde sig til globale problemstillinger. Geografi/naturgeografi indgår som et selvstændigt fag i grundskolen og på flere gymnasiale uddannelser og yder her et vigtigt bidrag til elevernes almindelig og studiekompetencer.

Der er endnu ikke taget stilling til fagrækken for den kommende EPX-uddannelse. Med baggrund i *Aftale om en ny erhvervs- og professionsrettet gymnasieuddannelse* er der blevet nedsat en faglig ekspertgruppe, der skal komme med anbefalinger til, hvordan epx-uddannelsen konkret tilrettelægges. Ekspertgruppen skal bl.a. komme med bud på fagrækken for epx. Ekspertgruppen afleverer sine anbefalinger senest 1. december 2025.

Der skal herfra lyde en tak for jeres indspark, som vil blive taget med i de videre overvejelser på området.

Med venlig hilsen

Mattias Tesfaye

30. april 2025
Sagsnr.: 25/12002

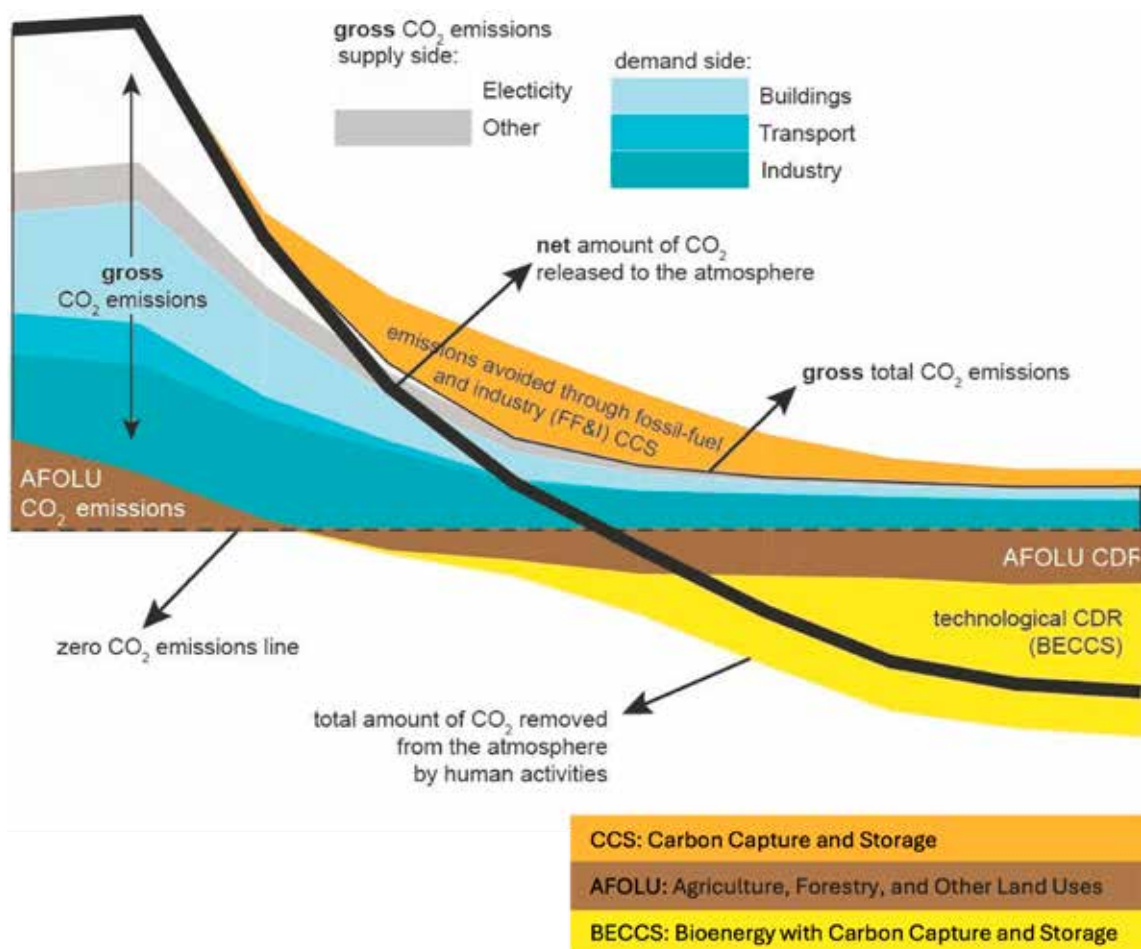
Ministeren
Frederiksholms Kanal 21
1220 København K

Telefon: +45 33 92 50 00
Mail: uvm@uvm.dk
www.uvm.dk

CVR-nr.: 20453044

FANGST OG LAGRING AF CO₂ I DANMARK

For at bremse klimaforandringerne skal vi udlede langt mindre CO₂ til atmosfæren. En af løsningerne er at fange CO₂ og lagre den i geologiske strukturer dybt under os. Danmarks geologi er særligt god til netop det.



Drivhusgassen CO₂ udgør kun 0,04 % af atmosfæren, men det er den vigtigste klimagas med en meget stor indflydelse på klimaet. Siden begyndelsen af den industrielle revolution i 1750 er indholdet af CO₂ i atmosfæren steget med mere end 50 %, hvilket har ledt til en stigning i den globale gennemsnitstemperatur på over 1,5°C. De afledte effekter af temperaturstigningerne er blandt andet intense storme, ekstrem tørke, afsmeltning af gletsjere og iskapper, og stigende havniveau. Klimaforandringerne betragtes i dag som den væsentligste trussel mod menneskers sundhed på globalt plan.

I 2020 besluttede et bredt flertal i Folketinget, at Danmarks netto-udledning af CO₂ skulle gå i nul senest i 2050. FN's klimapanel og det danske Klimaråd anbefaler fangst og lagring af CO₂. Dette løser ikke udfordringerne alene. Men sammen med udfasning af olie og gas som energikilde og reduktion af udledningen fra transport, landbrug og industri, er fangst og lagring af CO₂ nødvendig for at opfylde danske og internationale klimamål.

Fangst og lagring betegnes CCS efter det engelske Carbon Capture and Storage. I denne artikel kan du læse om, hvad CO₂-fangst og -lagring går ud på, og hvad status er på det i Danmark og globalt.

Hvordan fanger man en gas?

Man kan filtrere CO₂ ud af røggasser fra punktkilder som f.eks. kraftværker og tung industri, hvor koncentrationen af CO₂ er relativt høj. Der er forskellige metoder til at gøre det, hvoraf de længst udviklede bygger på kemisk absorption. Ved absorption skylles røggassen i en opløsning indeholdende et kemisk stof med passende egenskaber til formålet. Opløsningen, som i kemisk jargon kaldes et solvent, binder i første omgang CO₂, men forbindelsen brydes senere i processen, så man får adskilt solvent og næsten ren CO₂. Solventet kan derefter bruges igen. I de fleste tilfælde bruges aminosyrer som solvent. Med denne teknologi er det muligt at fange 90 % eller mere af CO₂'en fra røggassen. Selvom teknologien er kendt, er der dog i et vist omfang behov for

forbedring af de allerede eksisterende teknologier for blandt andet at nedsætte energibehovet.

Man kan også filtrere CO₂ direkte ud af luften, som omgiver os, selvom dette er en endnu mere energikrævende proces på grund af den lave koncentration af CO₂ i atmosfæren. Derudover kan man bruge planter til at opfange CO₂ fra atmosfæren og omdanne biomassen til biokul, som kan lagres i jorden, eller til grønne brændstoffer, som f.eks. kan bruges i transportsektoren. I processen fra biomasse til brændstof frigives CO₂, som kan indfanges og lagres.

Uanset om man har fanget CO₂ fra punktkilder, atmosfæren eller i processen med omdannelse af biomasse til brændstof, kan gassen efterfølgende komprimeres og pumpes ned i de geologiske lag dybt under os.

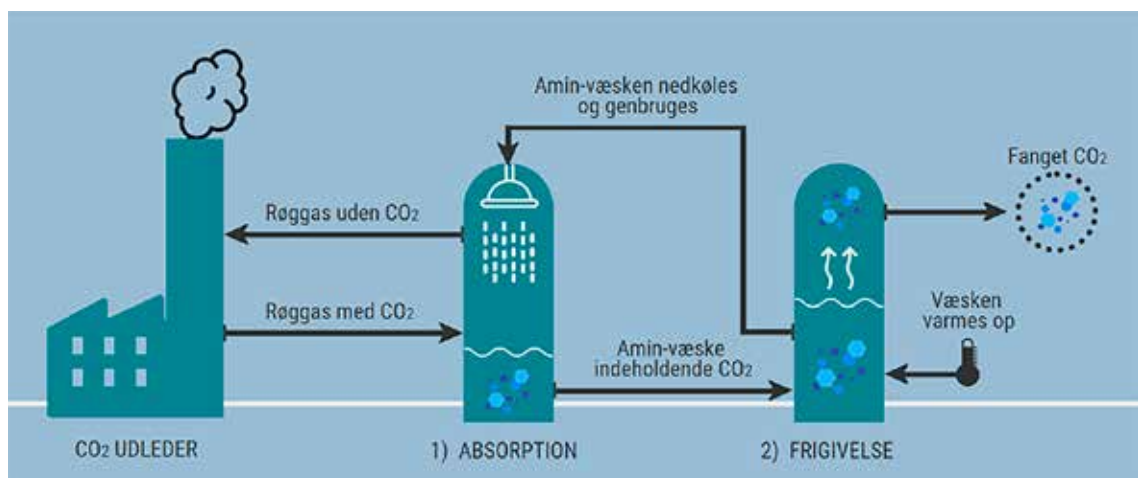
Hjælper det så at begrave problemet?

Når det kommer til CO₂, kan man faktisk begrave problemet, og det er ikke så mærkeligt, som det måske lyder. For grunden til at vi i dag har for meget CO₂ i atmosfæren, er, at vi igennem mange år har hentet olie og gas op af netop undergrunden for at få energi og brændstof. Når man pumper CO₂ ned i undergrunden, kommer den sådan set bare tilbage, der hvor den kom fra.

Olie og gas har igennem millioner af år været lagret i undergrunden i geologiske strukturer, som har kunnet holde på den opadstigende væske eller gas. Den danske undergrund har mange af sådanne strukturer, hvilket gør den særdeles velegnet til at lagre CO₂. Mange steder i verden bruger man i dag undergrunden til lagring af naturgas. I Danmark har man erfaring med lagring af naturgas i en geologisk struktur i nærheden af Stenlille i det centrale Sjælland, hvor man har pumpet naturgas ned og op igen i mere end 40 år.

For at kunne lagre CO₂ i undergrunden har man brug for en porøs og gennemtrængelig sedimentær bjergart, ofte en sandsten, som man kan fylde med gas (se artikel om CO₂-lagring senere i denne udgave

Figur 1. Grafen viser, hvordan man vil kunne reducere de globale CO₂-udledninger. I den nærmeste fremtid kan det ske ved hjælp af reduktion af udledningen fra energiproduktion (hvid og grå) og byggeri, transport og industri (blålige farver) samt fangst og lagring af CO₂ fra industrielle kilder (orange). På sigt vil negativ CO₂-udledning kunne opnås ved hjælp af landbrug, skovbrug og anden arealanvendelse (brun, AFOLU står for Agriculture, Forestry, and Other Land Uses samt fangst og lagring af CO₂ ved produktion af biomasse fra biologiske kilder og efterfølgende lagring (gul, BECCS står for Bioenergy with Carbon Capture and Storage) Kilde: IPCC, 2018.



Figur 2. Grafisk fremstilling af processen til fangst af CO₂ ved hjælp af aminosyrer. Røggassen føres ind i et absorptionstårn, hvor den skylles i amin-væske, hvorved CO₂ bindes. Derefter føres amin-væske indeholdende CO₂ til et andet tårn, og væsken varmes op til 120°C, hvorved CO₂ bliver frigivet fra væsken. Den gentagne opvarmning og nedkøling er energikrævende, hvorfor der forskes i at forbedre teknologien. Kilde: Energistyrelsen.

af GO, red)). Når man pumper CO₂ ned i en sandsten under tryk vil gassen fordele sig i de mange bitte-små porerum mellem sandkornene og efterhånden fylde sandstenen med gas, ligesom man kan fylde en svamp med vand. Sandstenen er selve lageret - et reservoir - for gassen. Oven på reservoiret er der brug for et tæt låg som kan holde på gassen, så den ikke stiger opad igen. Dette låg - seglet - udgøres ofte af en lersten, som gassen ikke kan trænge igennem. Indtil videre er de områder, som er udpeget som potentielle CO₂-lagre i den danske undergrund, steder hvor reservoir og segl findes i en lukket struktur - lidt som en omvendt skål - for at man kan være sikker på, hvor gassen er, når den først er pumpet ned i undergrunden. Reservoirets størrelse vil være forskellig fra lager til lager og afhænge af den lokale geologi.

Tilsammen udgør reservoir og segl et lagringskompleks. Toppen af reservoiret skal ligge i mindst 800 meters dybde, fordi CO₂ på denne dybde kommer på væskeform og fylder 300 gange mindre, end den gør på jordoverfladen. De fleste egnede geologiske strukturer i den danske undergrund ligger lidt

dybere, på 1–1,5 km dybde. Kombinationen af porøs sandsten og tæt lersten har vi mange steder i den danske undergrund.

Før man går i gang med at lagre CO₂ i undergrunden, er der behov for grundige undersøgelser for at sikre, at de geologiske betingelser er på plads. Man skal vide med sikkerhed, at den geologiske struktur er velegnet og stor nok, at sandstenen i strukturen har de rette egenskaber, samt at det ovenliggende lag af lersten er tæt og tykt nok til at fungere som en forsegling af lageret. Det er vigtigt med et ordentligt datagrundlag og omhyggelige planer for, hvordan reservoiret fyldes med CO₂, og hvordan man holder øje med, at den bliver dernede. Hele processen skal godkendes og kontrolleres af Energistyrelsen, som er myndigheden på området.

CCS i Danmark

Den danske undergrund er særdeles velegnet til at lagre CO₂. Det skyldes, at vores geologi de fleste steder består af kilometerdybe geologiske bassiner med sedimentære bjergarter, hvoraf en stor del er egnede reservoirbjergarter i form af sandsten, og gode



Figur 3. Illustration af CCS-værdikæden fra fangst over transport til lagring af CO₂. CO₂ fanges fra industrielle punktkilder, biomasseanlæg eller direkte fra luften. Derefter komprimeres det og transporteres via rørledninger, lastbiler eller skib. Til sidst pumpes CO₂ ned gennem dybe borer til et egnet reservoir i en geologisk formation. Reservoiret skal ligge på mindst 800 meters dybde, fordi CO₂ på den dybde kommer på væskeform og fylder 300 gange mindre end ved jordoverfladen. Kilde: GEUS.

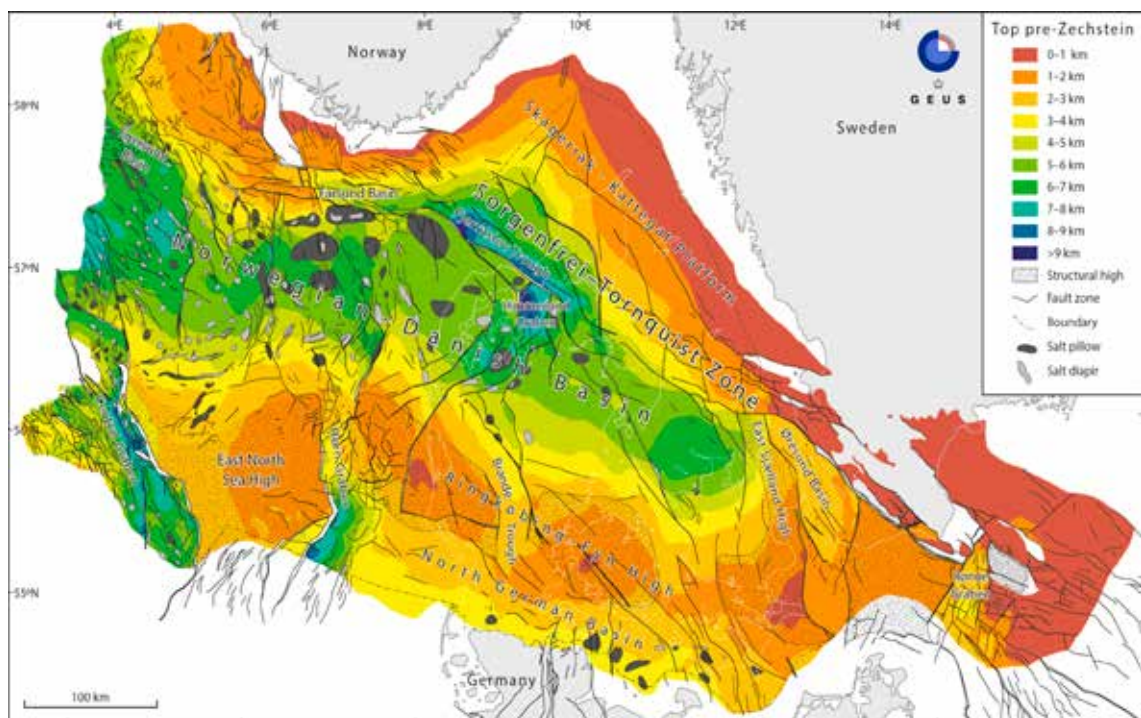
seglbjergarter i form af tykke lag af uigennemtrængelig lersten. GEUS estimerer, at der i den danske undergrund vil kunne lagres, hvad der svarer til den mængde CO₂, Danmark ville sende ud i atmosfæren over flere hundrede år, hvis vi fortsatte med udledningen på det nuværende niveau.

Ud over de egnede geologiske lag har den danske undergrund den fordel, at der mange steder er lukkede strukturer, som er dannet i forbindelse med bevægelser af salt i den dybeste del af de sedimentære bassiner. Selvom den danske undergrund er velegnet til lagring af CO₂, har CCS ikke altid været anset som en gangbar løsning herhjemme.

Fangst og lagring bygger på teknikker, som man har kendt til og brugt i årtier. I 1970'erne begyndte man at pumpe CO₂ ned i undergrunden i USA. Formålet var dengang at øge produktionen af olie, såkaldt enhanced oil recovery (EOR). I dag findes der globalt set mere end 30 kommercielle anlæg til fangst og lagring af CO₂, mens yderligere mindst 150 anlæg er under udvikling eller opførelse. En del af disse CCS-anlæg bruges dog til EOR, hvilket ikke længere er tilladt i Danmark.

Det første CCS-projekt i Danmark fandt sted i 2007–2011, da Vattenfall foretog undersøgelser med henblik på at indfange CO₂ fra Nordjyllandsværket og lagre det i en geologisk struktur 1750 meter under overfladen lidt øst for Aalborg. Ideen blev mødt af store folkelige protester. Mange mente, at lagringen af CO₂ i undergrunden bare ville være en undskyldning for at fortsætte brugen af olie og gas, og andre var bekymrede for, om CO₂-lagringen kunne påvirke deres nærmiljø. Derudover var der usikkerhed om lovgivningen på området. I 2011 blev lagring af CO₂ i den danske undergrund faktisk ulovliggjort, mens EOR derimod stadig var tilladt.

I årene efter forbuddet mod CO₂-lagring i Danmark skete der ikke meget på området i Danmark, selvom udviklingen af CCS begyndte at få fart i andre lande. Først efter 2020, efter vedtagelsen af Danmarks Klimalov, begyndte tingene at tage fart. Klimaloven blev fulgt op med en samlet dansk CCS-strategi med en køreplan for fangst, transport og lagring af CO₂ i 2021, og med vedtagelse af rammevilkår for CO₂-lagring i 2022. Samme år blev den første licensrunde for CCS gennemført, og to



Figur 4. Kort over Danmark, der viser tykkelsen af de sedimentære lag, som ligger oven på grundfjeldet. Særligt tykke sedimentære lag findes i det Norsk-Danske Bassin, som dækker en stor del af Jylland, Kattegat og Sjælland, samt i den nordlige del af det Nordtyske Bassin, som dækker det sydlige Jylland, det Sydfynske Øhav samt Lolland-Falster. I kortet ses ligeledes saltstrukturer (runde, grå former), som ligeledes spiller en rolle i forbindelse med CO₂-lagring, da mange velegnede strukturer til CO₂-lagring er dannet over en saltpude. Kilde: GEUS, modificeret fra Vejlbæk & Britze (1984).

konsortier fik tilladelse til at foretage undersøgelser med henblik på CO₂-lagring i Nordsøen.

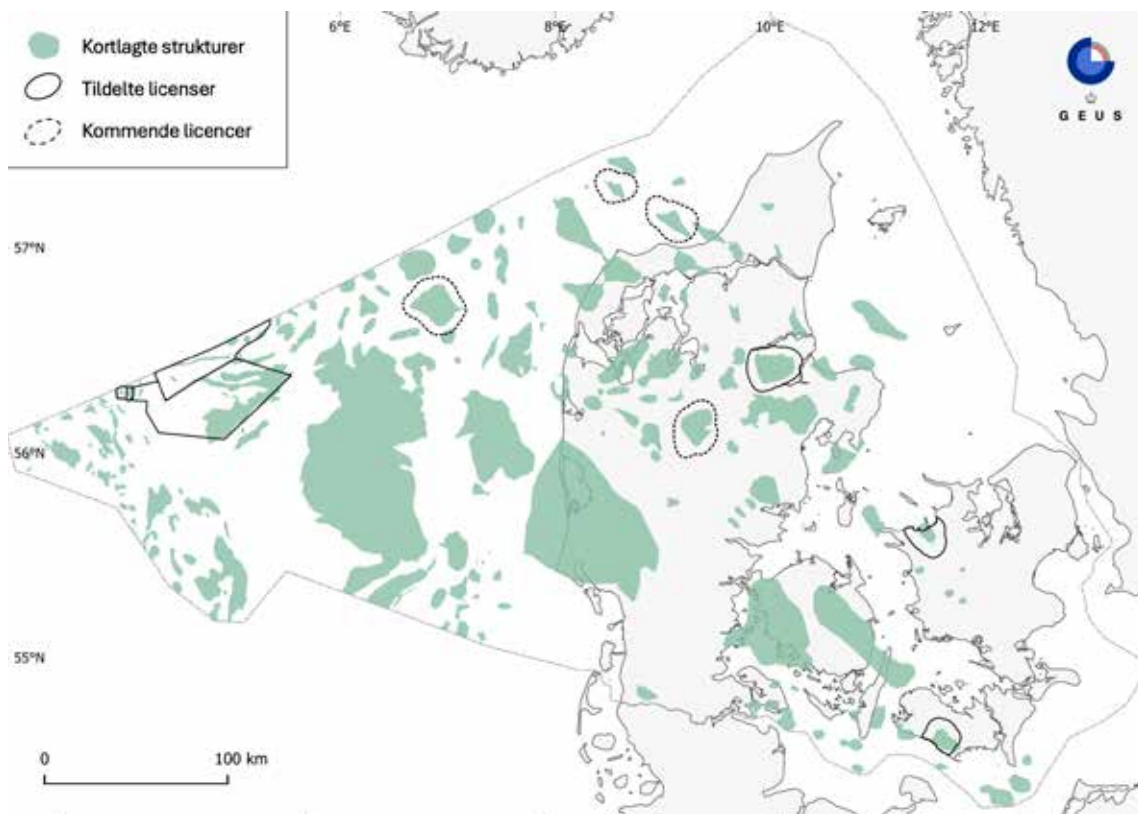
Selvom Danmark kom langsomt fra start, er der sket meget i løbet af de seneste år, hvor myndighederne har arbejdet med at sikre lovgivning og offentlig støtte til udvikling af CCS i Danmark. GEUS fik i 2022–2024 midler til at foretage indledende undersøgelser af fem områder på land og tre kystnære områder i Skagerrak. Formålet med undersøgelserne var at vurdere, om de udvalgte strukturer så ud til at være egnede til lagring af CO₂, samt hvor meget CO₂ de i givet fald kunne holde på. Baseret på GEUS' undersøgelser blev det besluttet at lade virksomheder søge om licens til at foretage yderligere efterforskning med henblik på CO₂-lagring i strukturerne. I dag er der tildelt tre efterforskningslicenser på land, og det forventes, at der vil blive tildelt yderligere en licens på land samt tre licenser i kystnære områder i 2025. Hvis den igangværende efterforskning i de tildelte licensområder viser sig at være positiv,

forventer man at den første lagring af CO₂ på land i Danmark vil ske i 2029.

Man kan mene, at det ikke betyder noget, om man arbejder på at lagre CO₂ i Danmark, da vores udledning kun udgør lidt mere end en promille af den globale udledning. Men det, at de danske myndigheder har åbnet op for lagring på land, har vakt betydelig interesse fra andre lande i Europa. Det er langt billigere at drive et CO₂-lager på land, hvor det er enklere at etablere infrastrukturen til CO₂-lagring, og man er tættere på kilden.

Kan CO₂-lagring påvirke grundvandet eller miljøet omkring os?

Når man vil lagre CO₂ på land, stiller det særlige krav til at undgå en påvirkning af det miljø, som omgiver os. CO₂ er ikke giftigt og heller ikke eksplosivt, men opsivende CO₂ vil i værste fald kunne forurene grundvandet, og måske nå nogle af de mange grundvandsmagasiner, som forsyner os med



Figur 5. Kort over Danmark, som viser kortlagte geologiske strukturer, som GEUS vurderer, kan være egnede til CO₂-lagring (grønne strukturer). De tildelte licensområder til efterforskning med henblik på CO₂-lagring er markeret med sort omrids, mens de licensområder, som pt. er i udbud (per april 2025), er markeret med stiplede sort omrids. Kilde: GEUS og Energistyrelsen.

drikkevand. Grundvandsmagasiner består typisk af sandede lag, der ligger som lommer i forskellige størrelser rundt omkring i den overfladenære del af den danske undergrund. Det ferske grundvand går ned til cirka 100 meters dybde, hvorunder grundvandet bliver salt. Et CO₂-lager skal ligge mindst 800 meter nede og vil typisk være på 1-2,5 kilometers dybde. Der er altså tykke geologiske formationer mellem den lagrede CO₂ og det dybeste grundvand,

og når boringerne, som skal føre CO₂'en ned i reservoiret, skal etableres, bliver der taget hensyn til grundvandsmagasinerne. Der vil dog være krav om detaljeret monitoring for at sikre og dokumentere, at der ikke sker en påvirkning af for eksempel grundvandet over CO₂-lageret.

Marie Keiding
Geofysiker og
chefkonsulent ved GEUS



FANGST, TRANSPORT OG LAGRING AF CO₂

- udvikling af et nyt klimaredskab

Energistyrelsen er ressortmyndighed for CCS. Dermed er vi med til at sikre at fangst og lagring af CO₂ implementeres hurtigt, sikkert og forsvarligt i Danmark. Men hvordan gør vi det?



Borerig og skib med CO₂ ved den ubemandede platform Nini W. Beslutningen om at etablere det første dansk CO₂-lager blev taget i december 2023 af INEOS Energy. INEOS Energy og partnere gennemførte den første injektion af CO₂ i undergrunden i Danmark i marts 2023. Pilotprojektet blev gennemført ved Nini W, et af de tidligere olieletter i den danske Nordsø. (kilde: INEOS Energy).



Biogasanlæg. Biogas indeholder typisk 60-65 % metan (CH_4) og 35-40 % kuldioxid (CO_2). Før biogassen tilsluttes gasnettet renses den for CO_2 på biogasanlægget. Den fangede CO_2 udledes lige nu til atmosfæren (kilde: Henrik Sulsbrück).

Fangst, transport og lagring af CO_2 (CCS) er en ny aktivitet i Danmark - i hvert fald i stor skala. Vi fanger allerede i tusindvis tons CO_2 om året rundt om i Danmark i forbindelse med rensning af biogas til gasnettet, det bliver bare udledt til atmosfæren igen. Der kører lastbiler rundt med CO_2 i Danmark til primært fødevarer- og medicinalindustrien. I Norge har man siden midt 90'erne sikkert lagret CO_2 , f.eks. i forbindelse med opgradering af naturgas fra Sleipner-feltet. Men vi har ikke fanget CO_2 i million-tons-per-år-skalaen, og vi har ikke geologisk lagring af CO_2 i Danmark. Det skal vi kunne gøre.

CCS er nemlig et nødvendigt klimaredskab, der supplerer udfasningen af fossile brændsler, udbredelsen af vedvarende energi, energieffektivisering, elektrificering, omstilling af landbruget og udvikling af nye grønne brændsler. CCS er også et enestående redskab til at skabe de store, negative CO_2 -udledninger, der er nødvendige for at Danmark kan være klimaneutral i 2050.

Efter nogle stille år på CCS-området efter imple-

menteringen af EU's CCS-direktiv (2009) i den danske undergrundslov (2011) har der derfor siden juni 2020 været et stærkt og bredt politisk ønske om at CCS skal bidrage som klimaredskab for at Danmark når vores drivhusgasreduktionsmål.

Ønsket om at CCS skal være muligt i Danmark og at det skal ske hurtigt i stor skala, har skabt et øget fokus og efterspørgsel på klare forvaltningsmæssige og økonomiske rammer for CCS i Danmark.

De forvaltningsmæssige rammer

Udgangspunktet for forvaltningen af CCS i Danmark er en stribe eksisterende love og regler der tilsammen danner rammerne om sikker og natur- og miljømæssigt forsvarlig CO_2 -fangst, -transport og -lagring. CCS er en aktivitet som går på tværs af mange sektorer og områder, og er dermed, afhængigt af projektet, omfattet af generelle regler, der spænder fra miljøvurderingsloven, kommunale lokalplaner til f.eks. Transportministeriets bekendtgørelse om vejtransport af farligt gods.

CO₂-tanke ved Asnæsværket, Kalundborg. Etableringen af de første stor-skala CO₂ fangstanlæg og en udskibnings-facilitet tager form i Danmark. Ørsted etablerer CO₂-fangst på både Asnæs- og Avedøreværket samt en udskibnings-havn v. Asnæsværket, Kalundborg. Tankene på billedet er til opbevaring af CO₂ inden udskibning til CO₂-lagret Northern Light i Norge. Anlæggene vil være i drift i 2026.



Geologisk lagring

Rammerne for geologisk lagring af CO₂ i Danmark er fastsat i Undergrundsloven (UL). Undergrundslovens formålsparagraf §1 siger, at der skal "tilstræbes en hensigtsmæssig anvendelse og udnyttelse af Danmarks undergrund og af dens naturforekomster".

Reglerne om CO₂-lagring er beskrevet i Kap. 6 om anden anvendelse af undergrunden, underforstået andet end udvinding af olie og gas. Afsnittet om CO₂-lagring i Kap. 6a i UL er i store træk en direkte implementering af EU CCS-direktivet fra 2009. I forbindelse med den daværende implementering blev der ikke gjort mange tanker om den praktiske anvendelse af den del af loven. Et flertal i Folketinget mente på det tidspunkt at CO₂-fangst og lagring ikke var en ønskelig teknologi i Danmark. Det skyldes formentlig et stort energiforbrug, et fokus på CO₂-fangst af fossil CO₂ fra kulkraftværker, og en deraf følgende stærk lokal folkelig modstand mod CO₂-lagringsprojekter.

I Danmark ejer vi som udgangspunkt vores undergrund og rettigheder forbundet hertil i fællesskab, gennem staten. Men Undergrundsloven fastsætter at: "Klima-, energi- og forsyningsministeren kan for en nærmere bestemt del af undergrunden på nærmere fastsatte vilkår meddele tilladelse med eneret til efterforskning og anvendelse af undergrunden til lagring eller andre formål..." Det vil sige at vores fælles ret til undergrunden under bestemte forhold kan begrænses ved at give eneret til en rettighedshaver. Denne proces foregår i forbindelse med CO₂-lagring ved at ministeren inviterer til, at

selskaber søger om eneretstilladelse til efterforskning og undersøgelser med henblik på CO₂-lagring i forudbestemte områder. Energistyrelsen er tilsynsmyndighed for disse tilladelser og projekter og sikrer sammen med f.eks. Miljøstyrelsen og relevante kommuner at aktiviteterne foregår i overensstemmelse med gældende miljølovgivning.

Lige nu har ministeren via Energistyrelsen meddelt seks af sådanne eneretstilladelser; tre i den vestlige del af den danske Nordsø og tre tilladelser på land omkring Rødby, Kalundborg/Havnsø samt Gassum. Et yderligere område på land er blevet udbudt omkring Thorning, samt tre i kystnære områder vest for Jylland (Lisa, Jammerbugt og Inez). De to udbud forventes afsluttet i 2025 og Danmark kan dermed have ti tilladelser ved udgangen af 2025. Energistyrelsen forventer, grundet bl.a. usikkerheder om lagringskapacitet, injektionsrater og kommercielle forhold, ikke nødvendigvis at undersøgelserne i de ti områder fører til en beslutning om at søge om etablering af et kommercielt CO₂-lager i alle områder. I december 2024 traf rettighedshaveren INEOS med partnerne Harbour Energy og Nordsøfonden beslutning om at etablere første fase af et CO₂-lager (Greensand) i Nordsøen. Energistyrelsen forventer, at der vil være etableret flere kommercielle CO₂-lagre i Danmark i 2030.

CO₂-transport

Rørført transport af CO₂ er reguleret i en ny lov fra sommeren 2024 – "Lov om rørført transport af CO₂". Vilkår og bestemmelser om rørført CO₂-transport



CO₂-rør.

blev skrevet ud af undergrundsloven og i stedet placeret i denne nye særskilte lov, som en følge af den politiske aftale om styrkede rammevilkår for CCS i Danmark fra september 2023. Formålet var at skabe tydeligere regler, og dermed sikre fremdrift i etableringen af rørført CO₂-transport, som vurderes at være den billigste transportform for store mængder CO₂. Loven skal derudover sikre, at også rørført CO₂-transport sker sikkerhedsmæssigt forsvarligt. Danske projekter om rørført transport er stadig på et tidligt stadie, og den første transport af CO₂ med henblik på lagring i Danmark til CCS vil derfor foregå med lastbiler.

Danmark har indgået en række bilaterale aftaler med nabolande om transport af CO₂ på tværs af landegrænser til havs. Det skyldes, at Danmark har en ambition om at blive en europæisk hub for CO₂-lagring og ikke alle lande har samme geologiske muligheder eller politiske ambitioner om at etablere CO₂-lagring.

Fangst af CO₂

Røggasser i Danmark er gennem tiden blevet rensat for en stigende mængde stoffer, og fangst af CO₂ er teknisk set ikke meget problematisk. De første storskala CO₂-fangstanlæg i Danmark vil formentlig blive baseret på en velkendt kemisk udvaskningsproces med brug af aminer. CO₂-fangstanlæg er omfattet af krav om obligatorisk miljøvurdering efter miljøvurderingsloven, og Miljøstyrelsen er myndighed for dette. CO₂-fangst kan dog i nogle sammenhænge være reguleringsmæssigt komplekst. Det har derfor været nødvendigt at justere noget af den eksisterende lovgivning, og 1. januar 2025 trådte en ny "Lov om CO₂-fangstaktiviteter i forsyningssektoren" i kraft. Hovedformålet med loven var at skabe klare og ensartede vilkår for etablering og drift af CO₂-fangst i forsyningssektoren (fjernvarme og affaldsforbrænding), at kommunale og private aktører i højere grad ligestilles i forbindelse med CO₂-fangst, samt sikre tilstrækkelig beskyttelse af varmemeforbrukerne.

Lovgivning gør det ikke alene

Myndighedernes arbejde inden for CCS har været fokuseret på at gøre CCS muligt og at sikre at det er miljø-, natur- og sikkerhedsmæssigt forsvarligt. Arbejdet har sikret tilstedeværelsen af de rette regler og hjemler og fjernet unødige barrierer for udbredelsen af CCS.

Men lovgivning gør det ikke alene. Alle tre dele af CCS - fangst, transport og lagring - er globalt set velkendte teknologier, som delelementer eller sammen i en CCS-værdikæde, og som nævnt ovenfor er CCS uomgængeligt hvis Danmark skal være klimaneutral i 2050. Alligevel er CCS ikke særligt udbredt, hverken globalt eller i Danmark. En af årsagerne til at CCS ikke er mere udbredt er, at det fundamentalt er billigere at udlede CO₂ end at fange og lagre eller anvende den. Det paradoks kan ikke kun klares ved lovgivning.

Blandt andet derfor har et bredt flertal i det danske Folketing i 2024 besluttet at indføre en ny CO₂-emissionsafgift og omlægge den eksisterende CO₂-afgift for at hæve prisen for udledning af CO₂, men også at støtte forskning og udvikling af CCS f.eks. gennem Det Energiteknologiske Udviklings- og Demonstrationsprogram (EUDP) og forskningsmissionen INNO-CCUS for at udvikle billigere CCS-løsninger.

Det er også besluttet, ad flere omgange at støtte etableringen af CCS i Danmark via en række støttepuljer. Puljerne skal sikre danske drivhusgasreduktioner via CO₂-fangst og lagring af danske udledninger. Den første pulje til CCS blev præsenteret i et udbud i 2022 (CCUS-puljen) med et støttebudget på ca. 8 mia. DKK fordelt over 20 år. I maj 2023 blev der efter et udbud med deltagelse af Ørsted, Vestforbrænding og Aalborg Portland indgået en kontrakt mellem Ørsted og Energistyrelsen om at Ørsted skulle etablere CO₂-fangst på Asnæs og Avedøreværkerne med henblik på at fange og lagre 430.000 tons biogent CO₂ årligt fra 2026 og 20 år frem. Projektet er det første af sin slags i Danmark og vil, foruden de store drivhusgasreduktioner, bidrage til at realisere CCS i Danmark.

I april 2024 blev resultatet af udbuddet, af en pulje målrettet biogene CO₂-udledninger, afsluttet (NE-CCS-puljen). Energistyrelsen tildelte kontrakter til tre biogasvirksomheder BioCirc, Bioman og Carbon Capture Scotland (nu The Carbon Removers). Den mængde negative CO₂-udledninger som tilbudsgiverne tilsammen kan levere er på ca. 160.000 tons CO₂ per år i en periode på op til 8 år fra 2026.

Den seneste CCS-pulje blev offentliggjort i oktober 2024. Den har et samlet budget på 28,7 milli-

arder kroner, som dækker omkostninger til fangst, transport og geologisk lagring af fossil, biogen eller atmosfærisk CO₂ over en 15-årig periode. Støtten er bundet op på et krav om idriftsættelse af fangstanlæg senest 1. december 2029, og et mindstekrav om fuld fangst og lagring fra 2030. Puljen forventes endeligt afgjort med en række kontrakter i starten af 2026.

Fælles for de tre danske CCS-puljer er, at støtten først sker når den fangede CO₂ er geologisk lagret. Støtten dækker basalt set forskellen mellem drift med udledning af CO₂ og drift med CO₂-fangst og -lagring. Støtten justeres f.eks. for stigende EU ETS kvoter og emissions- og CO₂-afgifter for at opnå de samfundsmæssigt mest økonomiske reduktioner og sikre mod overkompensation. Støtten skal desuden godkendes som statsstøtte af EU.

Gode danske muligheder for CO₂-fangst og lagring

Potentialet for CO₂-fangst i Danmark er vurderet til 5-10 mio. tons, langt overvejende biogen, CO₂ om året fra de større danske punktkilder i 2030. De danske CCS-støttepuljer skal realisere ca. 3 mio. tons af dette potentiale og skabe grundlaget for yderligere CO₂-fangst derefter.

Det danske geologiske potentiale for CO₂-lagring er, ifølge GEUS, langt større, men det potentiale er forbundet med geologiske usikkerheder og mange investeringer før det bliver til reel lagrings- og injektionskapacitet.

De første danske investeringsbeslutninger på store CO₂-fangst og -lagringsprojekter er taget i 2024 og 2025. Det er vigtigt at disse følges op de kommende år med fornuftige og afbalancerede investeringsbeslutninger om at etablere CO₂-fangst og -lagring. CCS kan nemlig, hånd i hånd med de øvrige klimaredskaber, sikre opnåelsen af de danske klimamål.

Tak til Salik Rosing for gennemlæsning og gode kommentarer.

Henrik Sulsbrück
Kontorchef, Energistyrelsen



DANMARKS GEOLOGI ER IDEEL TIL CO₂-LAGRING

Af: Fie Krøyer Dahl og Nina Skaarup

I Danmark har vi store mængder sandsten i undergrunden, og de udbredte formationer dybt nede rummer et stort potentiale for at lagre CO₂. Før vi kan pumpe drivhusgassen ned i jorden i stor skala, laver GEUS grundige undersøgelser – og det hele afhænger blandt andet af størrelsen på nogle bittesmå hulrum.

Hvis vi mennesker skal bremse klimaforandringerne, skal vi sende mindre CO₂ ud i atmosfæren. Det kræver flere forskellige tiltag, og et af dem er at lagre CO₂ dybt nede under os.

Både FN's klimapanel, IPCC, og Klimarådet, som er et uafhængigt dansk ekspertorgan, anbefaler CO₂-lagring, og i Danmark er teknologien, som kaldes CCS (Carbon Capture and Storage), en af de løsninger, som Danmark politisk har valgt at satse på. Dybt nede under os er sammensætningen af undergrunden nemlig velegnet til at opbevare CO₂.

Det fortæller Nina Skaarup, som er leder af Afdeling for Geofysik og Sedimentære Bassiner ved De Nationale Geologiske Undersøgelser for Danmark og Grønland (GEUS):

"Danmark har en geologi, som er velegnet til CO₂-lagring. Man skal have porøse, gennemtrængelige sedimenter, som for eksempel sandsten, for at kunne lagre CO₂, og ovenover skal der være et tykt,

tæt lerlag, der kan holde på gassen. Den kombination er der mange steder i Danmarks undergrund."

GEUS er en uafhængig forskningsinstitution under Klima-, Energi- og Forsyningsministeriet. En af GEUS' opgaver er blandt andet at rådgive myndighederne om, hvor i landet undergrunden vil egne sig til lagring af CO₂, og hvordan lagring af CO₂ kan foregå under kontrollerede geologiske forhold, som reducerer risikoen for lækage og påvirkning af omgivelserne.

Nina Skaarup peger desuden på, at vi i Danmark har solid erfaring med at lagre gas, for i mere end tre årtier har staten pumpet naturgas ned til senere brug i jorden under henholdsvis Lille Torup ved Viborg og Stenlille midt på Sjælland. De erfaringer kan være relevante at trække på for både operatører og tilsynsmyndigheder i forbindelse med CO₂-lagring – det samme gælder erfaringer fra oliesektoren i forhold til rørkonstruktion, transport og sikkerhed.

ET KIG I MIKROSKOPET

Forskerne kan få et indblik i sandstens opbygning ved at lave et såkaldt mineralscan, som ses herunder. Det gør de ved at kigge på en prøve i et elektronmikroskop, hvor mineralerne træder tydeligt frem og kan skelnes fra hinanden og fra de omkringliggende hulrum. På den måde kan forskerne blandt andet vurdere:

- Sandstensens sammensætning af mineraler
- Hvor porøse stenene er
- Sandkornenes størrelse

TYDELIG FORSKEL PÅ PRØVERNE

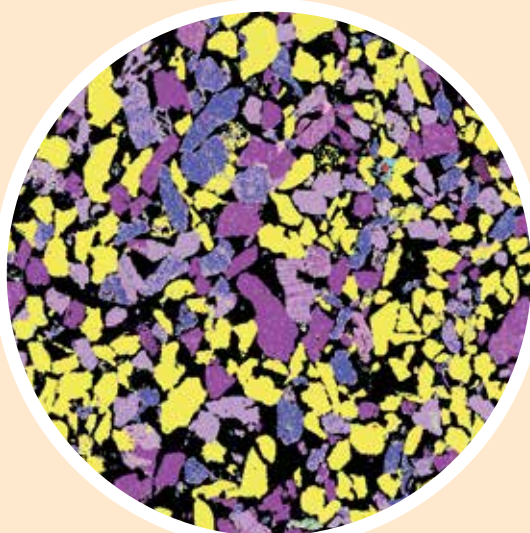
De to scanninger er sandstensprøver fra en boring i henholdsvis Jylland (øverst) og en boring på Sjælland (nederst). Begge prøver stammer fra Gassum Formationen.

Der er tydelig forskel på prøverne, fordi de har gennemgået hver sin geologiske udvikling:

- Sandstenen fra **Sjælland** består mest af **kvarts**, som er et stabilt mineral, der ikke nedbrydes så let.
- Sandstenen fra **Nordjylland** indeholder også kvarts, men har også en stor mængde **feldspat** (illa), der nedbrydes lettere end kvarts.

GASSUM, ØSTJYLLAND

Prøve fra sandsten i 1.642 meters dybde.

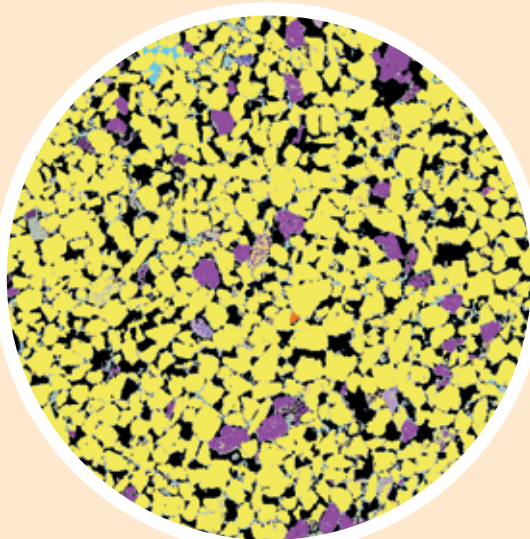


Den jyske sandsten er både lilla og gul (både feldspat og kvarts), og den sjællandske er mest gul (meget kvartsholdig).

Der er tydelig forskel på de to prøvers indhold af kvarts (gul) og forskellige typer feldspat (nuancer af lilla).

Kornstørrelsen er forskellig.

- Kvarts
- Kali-feldspat
- Alkali-feldspat
- Albit (feldspat)
- Plagioklas (feldspat)
- Biotit (glimmer)
- Kaolinit (ler)
- Illit (ler)
- Calcit (cement)
- Pyrit (cement)
- Zirkon
- Uklassificeret
- Pororum



STENLILLE, MIDTSJÆLLAND

Prøve fra sandsten i 1.546 meters dybde.

HVILKEN SANDSTEN ER BEDST TIL CO₂-LAGRING?

Det er vigtigt at kende en sandstens sammensætning og placering i undergrunden, når man skal vurdere, hvor meget CO₂ en sandsten kan indeholde, og hvor let det er at pumpe CO₂ ned i den.

Både sandstenen fra Gassum og Stenlille egner sig til lagring af CO₂, fordi der er forbundne hulrum (de sorte områder på billederne) mellem sandkornene. I den nordjyske sandsten er hulrummene større, og derfor vil den kunne indeholde mere CO₂ end den sjællandske.

I større dybder vil der dog være en risiko for, at hulrummene i den nordjyske sandsten lukker til. Det sker, fordi tryk og temperatur stiger i dybden, og det kan føre til, at ustabile mineraler som feldspat opløses og danner cement, der blokerer i hulrummene.

Med den sjællandske sandsten skal der større dybder til, før kvartsmineralerne bliver opløst og danner cement i hulrummene.

KOM MED I DYBDEN

... og få overblik over, hvordan
CO₂-lagring foregår.

Tekst: Johanne Uhrenholt Kusnitzoff
og Fie Krøyerdahl

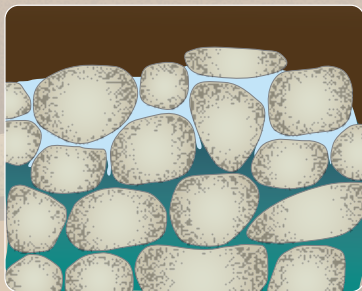
Illustration og layout: Lykke Sandal

1

CO₂ indfanges fra kilder, der udleder CO₂ – f.eks. industri eller energiproduktion.

4

CO₂ fordeler sig
i hulrummene
i reservoiret.

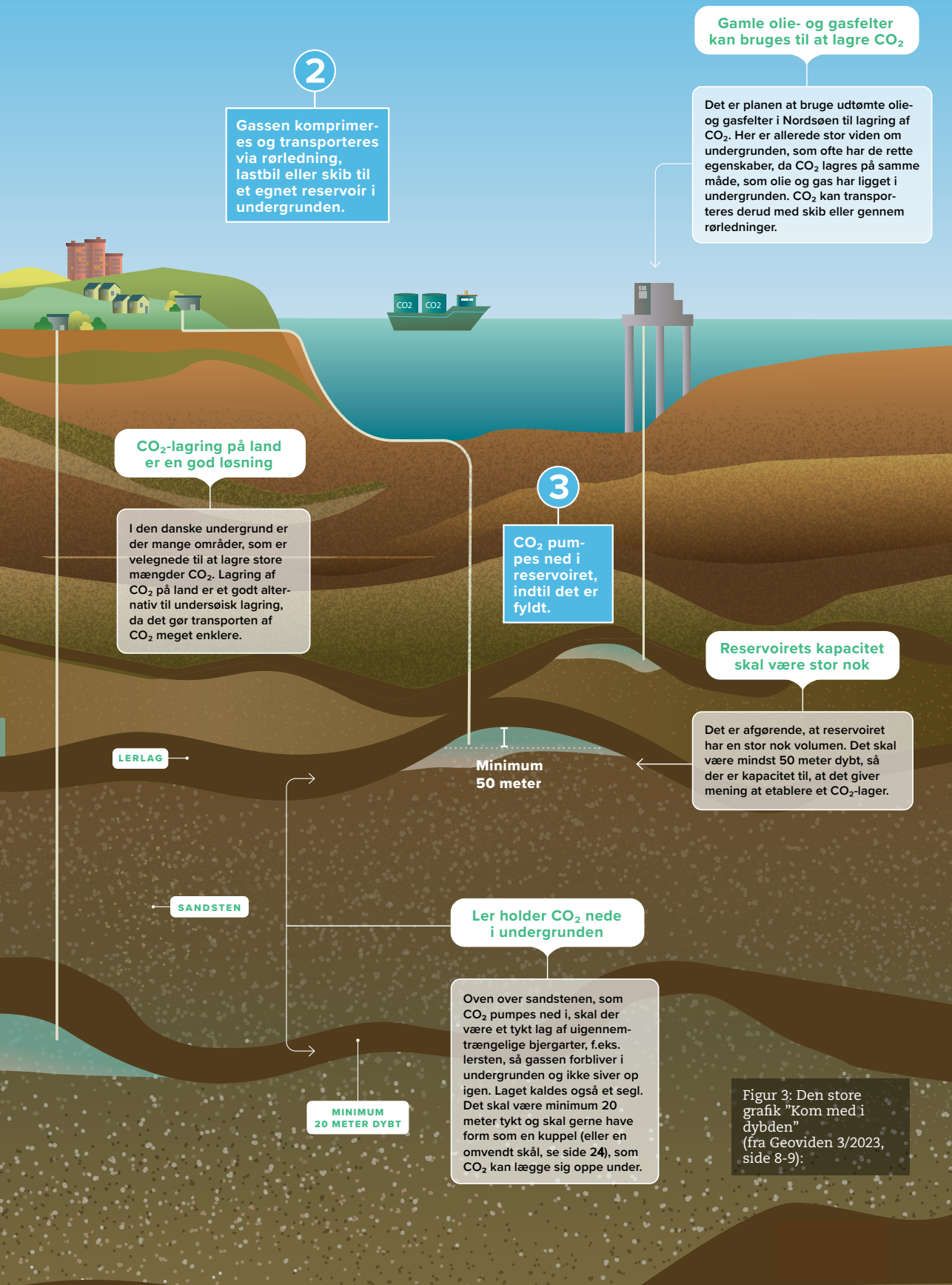


Selve reservoiret skal bestå af porøse bjergarter med mange velforbundne hulrum af en vis størrelse, så CO₂ kan fordele sig ud i hele reservoiret. Sandsten, som der er meget af i den danske undergrund, er et eksempel på en bjergart, som er velegnet til at lagre CO₂ i. Et velegnet reservoir består typisk af mindst 20 procent hulrum.

CO₂ lagres i mindst
800 meters dybde

CO₂ fylder mindre, når det er under tryk, og trykket stiger, jo længere ned i undergrunden, man kommer. Ved at pumpe CO₂ ned i en dybde på mindst 800 meter kan der derfor lagres store mængder på mindre plads. Så langt nede fylder CO₂ cirka 300 gange mindre end på overfladen. Et CO₂-lager vil typisk ligge i 1-2,5 kilometers dybde.

CO₂ I
RESERVOIRET



Hvad er en geologisk formation?



Geologer inddeler undergrunden i enheder, som er baseret på bjergarter af forskellig alder og tykkelse. En geologisk formation udgør sådan en enhed og kan defineres ud fra blandt andet kornstørrelse, farve og sammensætning af mineraler. Inddelingen er praktisk, da det gør det muligt at kortlægge en formation fra boring til boring over store afstande.

Gassum Formationen, som omtales her på siderne, kan være op til flere hundrede meter tyk og breder sig i varierende dybde under to tredjedele af Danmark – som vist på kortet her.

Figur 2: Lille boks om Gassum Formationens udbredelse (fra Geovidens 3/2023, side 13)

Undergrunden skannes

Der er altså et stort potentiale for at etablere CO₂-lagre i den danske undergrund, både på land og til vands. I foråret 2023 blev CO₂ for første gang på forsøgsbasis pumpet ned i et undersøisk reservoir for at blive permanent lagret. Det foregik i den danske del af Nordsøen. Nu er forarbejdet så i gang til, at man kan gøre det samme på land og i kystnære havområder. Det sker på baggrund af, at GEUS har foretaget de indledende seismiske undersøgelser for at kortlægge, hvor det vil være mest oplagt at placere CO₂-lagre.

Indtil videre har GEUS undersøgt og udpeget fem steder rundt omkring i landet og tre områder i havet ud for Danmark, og Energistyrelsens udbudsrunde med licenser til yderligere at efterforske CO₂-lagrene er afsluttet. Status er, at der er givet tre efterforskningslicenser, en mere er lige på trapperne, mens der for det femte område på land ikke bliver tildelt

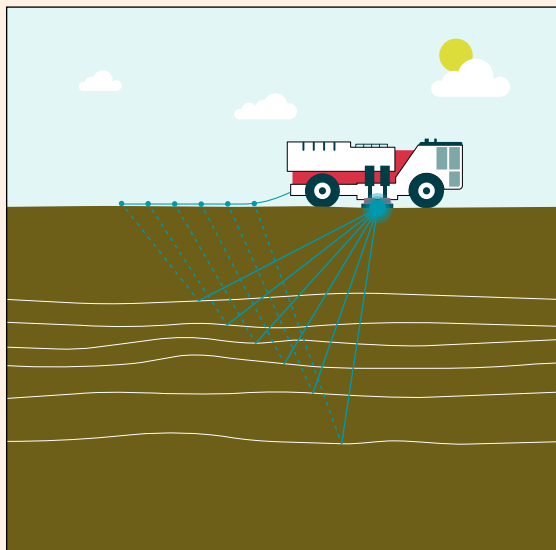
nogen licens foreløbig. De tre områder til havs afventer Energistyrelsens behandling af ansøgerne.

Ifølge Nina Skaarup har GEUS' opgave været at sikre, at der er plads nok i undergrunden til at oprette et CO₂-lager i de geologiske strukturer, som forskerne har undersøgt, og at sandstenen i strukturen har de rette egenskaber (henvisning til figur 1.)

"Forsvarlig lagring af CO₂ i undergrunden forudsætter, at en række geologiske betingelser er opfyldt – herunder at sandstenen er tilstrækkelig porøs med mulighed for gennemstrømning af gas, og at lerlaget ovenover er tykt, stabilt og især tæt nok til, at det kan fungere som forsegling og forhindre udslip," fortæller Nina Skaarup og fortsætter:

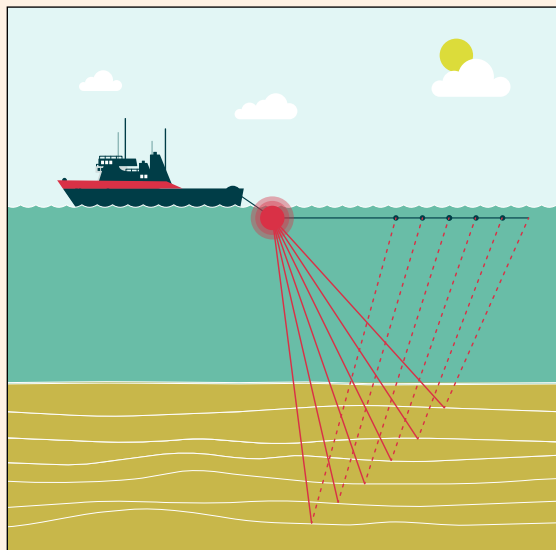
"Det kræver et ordentligt datagrundlag at kunne vurdere de forskellige forhold. I GEUS har vi masser af viden om den danske undergrund efter mange års forskning – og det supplerer vi så med data fra nye seismiske undersøgelser," fortæller hun.

Sådan foregår seismiske undersøgelser



På land

En mini-lastbil udsender lydbølger ved hjælp af vibrationer fra et stempel. Lydbølgerne forplanter sig ned igennem de geologiske lag i undergrunden, hvor de reflekteres og sendes tilbage til overfladen. De reflekterede lydbølger opfanges ved hjælp af geofoner, som enten er monteret på en streng trukket efter mini-lastbilen eller er placeret på små jordspyd rundt om i terrænet.



Til havs

En luftkanon trækkes efter et skib og laver lydbølger. Lydbølgerne forplanter sig ned igennem de geologiske lag i undergrunden, hvor de reflekteres og sendes tilbage til overfladen. De reflekterede lydbølger opfanges ved hjælp af hydrofoner, som trækkes efter skibet på en lang streng.

Illustrationer: Mads Porse

Figur 4: Sådan foregår seismiske undersøgelser (fra Geoviden 3/2023, side 15)

En skålformet struktur

De seismiske undersøgelser er en form for skanning af undergrunden, hvor forskerne bruger lydbølger til at kortlægge de dybere geologiske strukturer. På land kan man lave lydbølgerne med mini-lastbiler, som udsender vibrationer ved hjælp af et stempel. Hvis man skal undersøge undergrunden til havs, laver man lydbølgerne ved hjælp af en luftkanon, som trækkes efter et skib (henvisning til figur 4).

Det, som forskerne kigger efter, er en geologisk struktur med form som en omvendt skål (henvisning til figur 5). Inderst i skålformen skal der være en porøs sandsten med bittesmå, forbundne hulrum, som man kan fylde med CO₂. Netop porøsiteten, sandkornenes størrelse og sandstenens sammensætning af mineraler er afgørende for, om strukturen vil egne sig som CO₂-lager, og selvom et område er vurderet til at være velegnet, kan man ikke bare gå i gang med at pumpe drivhusgassen

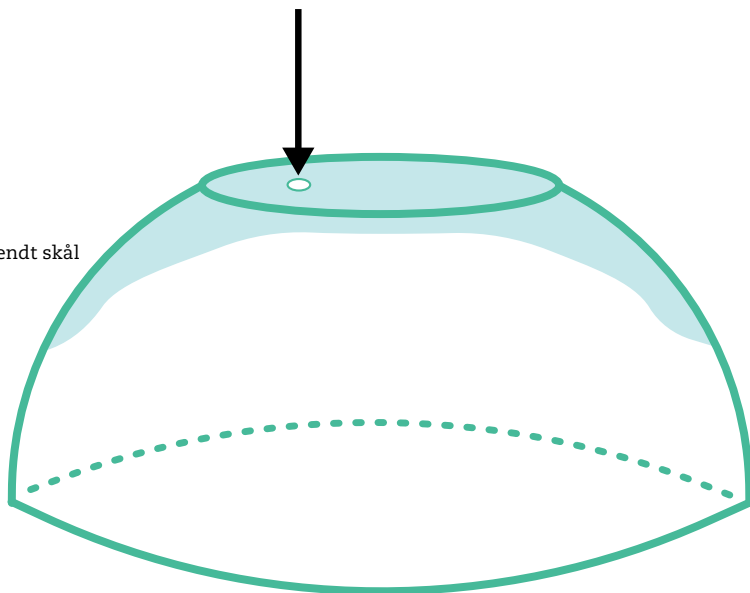
ned. Det kræver omfattende forudgående analyser og godkendelser, før etableringen af et CO₂-lager bliver til virkelighed.

Rigelig plads

GEUS estimerer, at der i den danske undergrund vil kunne lagres, hvad der svarer til den mængde CO₂, Danmark ville sende ud i atmosfæren over flere hundrede år – hvis altså vi fortsatte udledningen på det nuværende niveau. Eftersom målet er at sænke udledningen over de næste årtier, er der reelt set tale om en kæmpe volumen.

Faktisk er der, ifølge Nina Skaarup, så meget lagringsplads, at der vil være tilstrækkelig kapacitet til at lagre både dansk og eventuelt importeret CO₂. Det vil være en fordel for et land som f.eks. Sverige, fordi den svenske undergrund består af det, som kaldes grundfjeld. Grundfjeld er solide bjergarter, som i modsætning til sandsten og andre bløde sedimen-

Figur 5: Lagret fyldes som en omvendt skål
(fra Geoviden 3/2023, side 21)



ter ikke kan rumme CO₂. Sverige har altså ikke selv mulighed for at etablere CO₂-lagre på land, og med import over f.eks. Øresund kan Danmark i samarbejde med andre lande bidrage til at nedbringe udledningen af CO₂, ikke bare nationalt, men globalt.

Sandstenens sammensætning er afgørende

I tidens løb har geologer og forskere lavet rigtig mange analyser og laboratorietest af boreprøver for at blive klogere på sammensætningen af den danske undergrund. Der er derfor stor sikkerhed for, at Danmarks geologiske forhold egner sig godt til at lagre CO₂.

Det skyldes i høj grad det, der kaldes Gassum Formationen, som indeholder sandsten i forskellige dybder i et stort sammenhængende område (henvisning til figur 2), og de grundige undersøgelser har vist, at sandstenen har en stor og sammenhængende udbredelse i undergrunden.

Karakteren af sandsten i f.eks. Gassum Formationen kan dog være forskellig fra landsdel til landsdel, og netop sammensætningen af sandstenen har afgørende betydning for, hvor godt sandstenen i et givent område vil fungere som CO₂-lager.

"Alt efter hvor i Danmark en prøve tages, kan sandstenen variere, fordi den stammer fra forskellige kilder, er aflejret under forskellige forhold og befinder sig i forskellige dybder i undergrunden. Det betyder, at der kan være meget stor forskel på sandstenens indhold af mineraler og på dens tekstur," forklarer Henrik Vosgerau, som er geolog

og seniorforsker ved GEUS i Afdeling for Geofysik og Sedimentære Bassiner.

Forskellen i sandsten fra forskellige områder i undergrunden kan ikke altid ses med det blotte øje, men den kan være meget tydelig, når man analyserer prøver som f.eks. de to eksempler vist i figur 1. Det er skanninger af sandsten fra to forskellige borer i Gassum Formationen i henholdsvis Nordjylland og Midtsjælland. Når man kigger på dem, kan man tydeligt se, at sandstenen har forskellig karakter, alt efter hvor den stammer fra.

Fie Krøyer Dahl
Journalist og redaktør, GEUS



Nina Skaarup
Leder af Afdeling for Geofysik og Sedimentære Bassiner, GEUS



Klimaundervisning 7.-9. klasse

Nyt gratis forløb om SØ OG MOSE

'Et grønnere klima' er fællesfaglige forløb om
NATURBASEREDE LØSNINGER.

De er udviklet i samarbejde med Geografforbundet,
Biologiforbundet og Danmarks Naturfagslærerforening.

Find det hele på www.gronnereklima.dk.
Forløbene kan også findes gratis på Gyldendals
fagportaler fra skoleåret 25/26.



CENTER FOR MAKROØKOLOGI,
EVOLUTION OG KLIMA
KØBENHAVNS UNIVERSITET

SDU

VILLUM FONDEN





LAGRING AF CO₂ I NORDSØEN KAN BEKÆMPE KLIMAFORANDRINGER OG BLIVE STARTEN PÅ ET DANSK ERHVERVSEVENTYR

Af: Greensand Future

Lige nu arbejdes der intensivt på, at Danmark inden længe kan sætte gang i sikker og permanent lagring af CO₂ i Nordsøens undergrund.

For et halvt år siden (d. 10. december 2024) skete der et hidtil uset gennembrud for fangst, transport, og lagring af CO₂ i Danmark. Her kunne parterne bag Greensand Future annoncere, at den første fulde kommercielle værdikæde for Carbon Capture & Storage (CCS) bliver en realitet.

Det ventes, at Greensand bliver det første fuld-skala CO₂-lager i EU, hvilket markerer et afgørende skridt på vejen mod at afbøde klimaforandringerne og understøtte danske og europæiske klimamål.

Med potentiale til at lagre op mod 8 millioner tons CO₂ årligt kan projektet blive en vigtig brik i Europas grønne omstilling – både klimamæssigt og erhvervsmæssigt.

Hvad er Greensand Future?

Greensand Future er et internationalt samarbejde, ledet af INEOS Energys danske afdeling i partnerskab med Harbour Energy og Nordsøfonden. Projektet arbejder for sikker og permanent lagring af CO₂ i udtjente olie- og gasfelter i den danske del af Nordsøen.

Greensands CO₂-lager ligger i den danske del af Nordsøen og opereres af INEOS Energy Danmark. Parternes endelige investeringsbeslutning i den første kommercielle fase af projektet, Greensand Future, ventes at bane vejen for forventede investeringer på mere end 1 milliard DKK på tværs af Greensands CCS-værdikæde. Målet er, at der indledes sikker og permanent lagring af CO₂ i slutningen af 2025/begyndelsen af 2026.

Det kan ske efter, at Greensand Future har indgået kommercielle aftaler gennem hele værdikæden, fra CO₂-udledere, til logistik, transport og lagring. Dermed er den nødvendige finansiering på plads, så sikker og permanent lagring af CO₂ i stor skala bliver en realitet i Danmark og EU.

Greensand Future er en komplet industriel CCS-værdikæde bygget på et skalerbart koncept. Det giver mulighed for en gradvis udvidelse, efterhånden som de indfangede CO₂-mængder stiger og efterspørgslen efter lagringskapacitet øges.

Konceptet er anvendeligt til andre onshore- og offshore-lagringsprojekter, hvilket er et markant bidrag til den nødvendige acceleration af CCS-udrulningen i Danmark og resten af Europa.

Greensand Future hviler på erfaring og innovation

Greensand Future er videreførelsen af pilotfasen i Project Greensand, der blev de første i verden til at transportere CO₂ på tværs af landegrænser til sikker og permanent lagring offshore, for at afbøde klimaforandringerne.





Det blev markeret på Esbjerg Havn 8. marts 2023, da Hans Majestæt Kong Frederik af Danmark officielt igangsatte den første lagring af CO₂ i Nini-feltet i forbindelse med pilotfasen af Greensand.

Resultaterne fra pilotfasen i Project Greensand er blevet verificeret af den uafhængige og verdensledende udbyder af risiko-, verifikations- og standardiseringstjenester, DNV. Den grundige tekniske verifikation sikrer, at den lagrede CO₂, som forventet sikkert og permanent, bliver liggende i det lukkede Nini West reservoir dybt under Nordsøens havbund.

Til en start sigter Greensand Future mod at fange, transportere og lagre 400.000 tons CO₂ om året, med en mulighed for at øge og udvide mængden af CO₂ løbende frem mod 2030. I takt med at de indfangede CO₂-mængder stiger, er der potentiale for sikker og permanent lagring af op til 8.000.000 tons CO₂ årligt.

Hvorfor CO₂-lagring?

Europa-Kommissionen anslår, at der skal lagres 250.000.000 tons CO₂ om året i 2040, hvis EU skal nå målene i Paris-aftalen. CCS anses desuden for at være en nøgleteknologi til at nå det danske mål om klimaneutralitet i 2045.

Ifølge FN's klimapanel (IPCC) er CCS en af de få teknologier, der kan reducere udledninger fra industrier, der ellers er svære at omstille – for eksempel cement- og stålproduktion.

Selvom CCS ikke erstatter behovet for at reducere udledninger fra energisektoren, vurderes det, at teknologien spiller en vigtig rolle, hvis det skal lykkes at indfri de danske, europæiske og internationale klimamålsætninger.

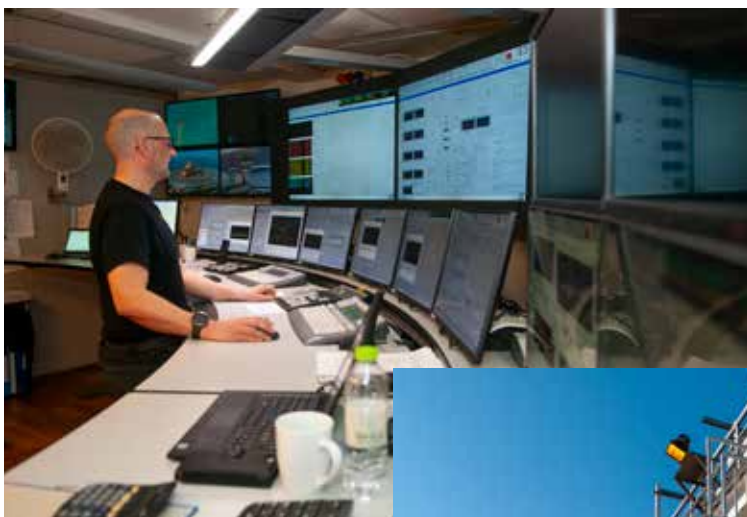
Her står Danmark med nogle helt unikke muligheder på grund af den geografiske placering og unikke undergrund i f.eks. Nordsøen, der anses for at være særligt attraktivt til sikker og permanent lagring af CO₂ på grund af den geologiske stabilitet.

Økonomien bag CO₂-lagring

Project Greensand er en stor økonomisk investering. Det ventes, at der investeres mere end 1 milliard DKK på tværs af Greensands værdikæde i den første fase. Samtidig er der store samfundsøkonomiske gevinster at hente, hvis det lykkes Danmark at blive et knudepunkt for CCS i Europa.

En analyse fra Kraka Advisory viser, at det kan bidrage med 50-100 milliarder kroner til økonomien og skabe op mod 17.000 arbejdspladser, hvis Danmark opnår 5-10 % af et kommende europæisk marked for CCS.

Det kan altså betale sig at være frontløber. Danmark står med alle de rette forudsætninger for at



Fotos: INEOS Energy



være med i førerfeltet inden for CCS i verden, og der kan skabes en ny industri med tusindvis af arbejdspladser på ryggen af de erfaringer, der er blevet høstet på Nordsøen de seneste 50 år.

Esbjerg som centrum for en ny industri

Esbjerg Havn spiller en nøglerolle for Greensand Future. Byen er i forvejen en vigtig base for offshore-industrien, og kan nu blive et centrum for CO₂-transport og lagring i Europa.

Samtidig har Esbjergs placering gjort byen attraktiv for internationale investeringer i CCS-teknologi.

Hvis projektet skaleres op, kan Esbjerg udvikle sig til et europæisk knudepunkt for CO₂-håndtering, hvor CO₂ fanget i Danmark og resten af Europa kan lagres sikkert og permanent i den danske undergrund.

Næste skridt for Project Greensand

Med en gennemført og verificeret testfase, og en endelig investeringsbeslutning, ventes de første

kommercielle lagringer at begynde i slutningen af 2025 eller begyndelsen af 2026.

I december 2024 underskrev INEOS en aftale med det hollandske rederi Royal Wagenborg om at levere et specialbygget CO₂-transportskib. Skibet skal transportere flydende CO₂ fra Esbjerg til Nini-feltet i Nordsøen.

Denne aftale, der blev underskrevet i nærværelse af Kong Willem-Alexander af Nederlandene og Kong Frederik af Danmark, er en milepæl i etableringen af en fuld værdikæde for CO₂-fangst, -transport og -lagring. Skibet bliver afgørende for, at CO₂ kan håndteres sikkert og effektivt under transport fra havne til permanent lagring via de eksisterende platforme i Nordsøen.

Ved at etablere en komplet CCS-værdikæde, viser Greensand Future, danske og europæiske udledere samt industriledere, at CO₂-fangst og -lagring i stor skala er muligt.

Greensand Future viser, at det nødvendige grundlag for at træffe afgørende investeringsbeslut-



ninger er på plads. Det kan muliggøre udviklingen og implementeringen af store fangstprojekter, som kan hjælpe Danmark og EU yderligere på vejen mod indfrielsen af de ambitiøse klimamålsætninger.

Greensand Future kan altså gennem sikker og permanent lagring af CO₂ i Nordsøen hjælpe til at bekæmpe klimaforandringerne – og blive starten på et nyt dansk erhvervseventyr på Nordsøen.

Om Greensand Future:

Virksomhederne bag Greensand er de nuværende indehavere af lagringslicensen (IRIS) – INEOS Energy Denmark, Harbour Energy og Nordsøfonden, der er statens undergrundsselskab. Greensand samarbejder desuden med en række partnere for at sikre, at der fanges, transporteres og lagres CO₂ sikkert og permanent i Nordsøens undergrund.

Til en start sigter Greensand Future mod at fange, transportere og lagre 400.000 tons CO₂ om året, med en mulighed for at øge og udvide mængden af CO₂ løbende frem mod 2030. I takt med at de indfangede

CO₂-mængder stiger, er der potentiale for sikker og permanent lagring af op til 8.000.000 tons CO₂ årligt.

Greensand er finansieret af Den Europæiske Union.

Læs mere om Greensand på hjemmesiden: greensandfuture.com

Artiklen er skrevet af
Greensand Future



SKOVREJSNING ER NATURENS EGET KLIMAREDSKAB



MEN DET KAN IKKE LØSE KLIMAKRISEN ALENE

Af: Astrid Bjørg Mortensen

Med Den Grønne Trepert står Danmark overfor en historisk omlægning af landskabet. Der skal rejses markant mere skov som et led i den grønne omstilling og klimaindsatsen. Men hvor effektivt et klimaredskab er skov, og kan vi plante os ud af klimakrisen?

Det kommer nok ikke bag på nogen, at skov gavner klimaet, fordi træer optager CO₂. Det er den gode gamle fotosyntese, der på helt naturlig vis trækker drivhusgasser ud af atmosfæren. Men kan vi plante os ud af klimakrisen? Nej, lyder det fra en af skovrejsningsaktørerne i Danmark, der de seneste år har rejst knapt 2000 hektar ny skov:

"Lige meget, hvor meget skov, vi planter i Danmark, kan det ikke løse klimakrisen. Hvis Danmarks samlede CO₂-udledning skal reduceres markant, skal vi alle gøre vores til også at begrænse vores udledning," lyder det fra Klimaskovfonden. Men hvad kan skovrejsning i klimasammenhæng?

"I Klimaskovfonden taler vi om skovrejsning som en af naturens egne klimaløsninger. Vi ska-
ber ikke en ny teknologi, men bruger et redskab, der er velkendt og gennemprøvet, og derfor er det også omkostningseffektivt," forklarer Lea Ravnkilde Møller, ph.d. og chefkonsulent i Klimaskovfonden. Fonden er en af de største aktører i forhold til privat finansiering af skovrejsning i Danmark, der har særligt fokus på CO₂-optag og klimaeffekt. Fondens skovrejsningsprojekter er nemlig finansieret gen-

nem bidrag fra virksomheder til den CO₂-reduktion, der er resultatet af projektet på lodsejeres jorder. Lea Ravnkilde Møller fortæller, at skovrejsning er et langsigtet virkemiddel, men at det til gengæld også er vedvarende, fordi de nye skove er omfattet af den særlige danske fredskovspligt. Fredskov betyder, at skoven vil være omfattet af Skovloven, og at der altid skal være skov på arealet. Hvis træerne fældes, skal der senest 10 år efter være etableret nye træer, der kan vokse op til en ny skov.

Regnestykket bag skoven som virkemiddel

Udover at skovene i sig selv har en klimaeffekt, som tæller med i det nationale klimaregnskab, så bidrager skovrejsning også mere indirekte til klimaindsatsen ved at producere træ. Træ kan erstatte andre materialer i en af de sektorer, der traditionelt har en høj CO₂-udledning; bygge- og anlægsbranchen. Dertil kommer, at den ændrede arealanvendelse, når man tager landbrugsjord ud af drift og omlægger det til skov, betyder, at der vil blive udledt mindre CO₂ fra landbrugssektoren.

"Skovrejsning har nogle afledte effekter i andre



værdikæder, men selvom det er vigtige elementer i den grønne omstilling i det store billede, så er det ikke noget, vi regner med i vores CO₂-beregninger, når vi opgør antallet af CO₂-kreditter, som et skovrejsningsprojekt kommer til at bidrage med. Her tager vi udgangspunkt i det stående CO₂-lager på selve arealet, hvor der er plantet skov,” forklarer Lea Ravnkilde Møller.

Klimaeffekten af en ny skov afhænger af flere faktorer. Blandt andet er det afgørende hvor skoven rejses – hvordan er jordbundsforhold og lokale vækstfaktorer som nedbør og temperatur – og hvordan skoven anlægges – hvilke træarter plantes der, bruges der ammetræer, er der naturlig tilgroning, osv. Der er flere måder at beregne, hvor meget CO₂ et træ eller en hel skov indeholder. Klimaskovfonden benytter biomasseligningen, som tager udgangspunkt i den forventede højde og diameter af de kommende træer, når den fremtidige CO₂-lagring skal projekteres. Biomasseligningen beregner mængden af CO₂ i stammen, rødderne og kronen, der består af grene og blade. Hvis man skal beregne CO₂-optaget for en

hel skov, kan man ikke måle hvert enkelt træ, men i stedet anvende grundfladevægtet diameter (Dg) og højde (Hg). Derved kan bevoksningens samlede biomasse beregnes ved at gange grundflademiddeltræets biomasse med antallet af træer i skoven. Derudover estimeres den forventede mængde dødt ved og litter i skovbunden, samt bindingen af kulstof i mineraljorden ved hjælp af tabelopslag fra den danske Skovstatistik. Den samlede mængde CO₂-kreditter, et projekt bidrager med, bliver beregnet som den langsigtede gennemsnitlige lagring fra år 100 til år 200. Det forudsættes her, at det er skov med vedproduktion for øje, og at min. 10 % af arealet er udlagt til biodiversitetsformål.

”Når vi i Klimaskovfonden skal beregne den forventede CO₂-effekt af de skove, vi planter, så baserer det sig på lodsejerens valg af træarter, lokalkendskab til tilvækstpotentialet, tilplantningstidspunkt, med mere. På den måde er det muligt at projektere den forventede tilvækst, så får vi et tal for den gennemsnitlige langsigtede lagring,” forklarer Lea Ravnkilde Møller.

En lille brik i det store CO₂-puslespil

Men udover at skov har en dokumenteret effekt og fungerer som naturens eget klimaredskab, så er det også et redskab, som befolkningen er meget positive overfor. Næsten tre ud af fire danskere vil gerne have mere skov - også hvis det er som nabo. Sidste år gennemførte analyseinstituttet Verian en undersøgelse, der viser, at mens 38 % af danskerne er positive overfor CO₂-lager i undergrunden, så er hele 85 % positive overfor at have skov i nærheden.

"Vi tror, det hænger sammen med, at skov er trygt og velkendt. Det er nemt at forstå, og det er muligt at være med til konkret klimahandling ved at plante træer. Og så er skoven jo danskernes foretrukne sted at tage hen, når de tager ud i naturen, så det er også et populært og folkeligt klimaredskab," siger Lea

Ravnkilde Møller.

Klimaskovfonden har gjort det nemt for alle at plante et træ for 25 kroner, og det er vigtigt at gøre skovrejsning til en folkesag. Men i det store CO₂-regnskab skal der også andre virkemidler i spil.

"Skovrejsning er en god klimaløsning, fordi der er mange andre positive sidegevinster ved skov. Det gavner vandmiljøet, beskytter vores drikkevand, og det giver naturen mere plads at udfolde sig på. Men det står også helt klart, at vi ikke kan bremse klimaforandringerne med skovrejsning som eneste redskab, det er der simpelthen ikke land nok til. Derfor har vi brug for at udvikle på forskellige teknologier, og ikke mindst at vi udleder langt færre drivhusgasser," siger Lea Ravnkilde Møller.

- Hvis 250.000 hektar alle opbygger kulstof som f.eks. Suserup Skov med 100 % kronedække og uden hugst, vil det kulstoflager, der opbygges over en 150-250-års periode, være på ca. 230 mio. t CO₂. Et lager, der er ca. fem gange Danmarks samlede udledning per år på ca. 40 mio. t CO₂. Et maksimalt lager af kulstof på skovarealet kan dermed ikke alene løse Danmarks udfordringer.
- Hvis 250.000 hektarer etableres som produktions-skove, vil der være et lavere lager på ca. 130 mio. t CO₂, men samtidig et årligt bidrag fra hugst på ca. 1,8 mio. tons CO₂, i form af biogent kulstof, til samfundets nødvendige kulstofkredsløb. Hvis hugsten anvendes klogt, kan det erstatte kulstof fra det langsomme kredsløb af kul, olie og gas og sikre nødvendige materialer til samfundet.
- Med naturgenopretning på 100.000 hektar, med 10-20 % trædække til gavn for biodiversitet, vil kulstofopbygningen på naturgenopretningsarealer udgøre under 0,5 års udledning.
- Med etablering af produktionsskov på 150.000 hektar vil hugsten bidrage med ca. 1,2 mio. t CO₂ i biogent kulstof – ca. 3 % af Danmarks udledninger, og kulstofopbygningen i stående lager vil udgøre knap 2 års udledning.

Professor Vivian Kvist Johannsen, MSc skovbrug, ph.d., Institutleder, Institut for Geovidenskab og Naturforvaltning, Københavns Universitet.

Astrid Bjørg Mortensen
Kommunikationsmedarbejder,
Klimaskovfonden



Af: Claus Beier & Tobias Pape Thomsen

PYROLYSE OG BIOKUL SOM BIDRAG TIL KLIMALØSNINGEN

Klimaet er under hastig forandring pga. vores udledning af drivhusgasser til atmosfæren, særligt fossilt CO₂.

Det har uacceptable konsekvenser for naturen og samfundet, og bestræbelserne er derfor store på at løse drivhusgasproblemet.





BIOSTORE-projektets feltforsøg i Taastrup. Her ses hele forsøgsmarken med mosaikken af 80 forsøgsfelter på hver 5*5 meter, hvor forskellige biokul-typer er iblandet jorden, så effekten af disse på landbrugsafgrødernes vækst kan undersøges sammen med undersøgelser af biokullets stabilitet.



Udover målinger af plantevækst og kulstof-stabilitet måles også effekten af biokul på afgasning af drivhusgassen N_2O . Dette gøres ved hjælp af tætsluttende plastkamre, som placeres på stålrammer placeret i de forskellige forsøgsfelter.

I første omgang er opgaven at stoppe overførslen af fossilt kulstof til atmosfæren. Det kan gøres ved at fange det fossile CO_2 og tilbageføre det til undergrunden, før det udsendes til atmosfæren (CCS), eller erstatte det med kulstof-frie alternativer, f.eks. VE (Vedvarende Energi), eller med ikke-fossilt kulstof, især biomasse.

Men selv et stop for fossil CO_2 -emission er faktisk ikke tilstrækkeligt. CO_2 -indholdet i atmosfæren er allerede for højt, og vi har derfor behov for at trække en del af det historisk udledte fossile kulstof tilbage fra atmosfæren og lagre det, også kaldet "negative emissioner" eller CDR (Carbon Dioxide Removal; dansk: kulstoffjernelse). Desuden vil der selv med en effektiv grøn omstilling fortsat være klimaskadelige emissioner, som vi ikke kan undgå, såkaldte "hard-to-abate" (da: svært reducerbare) -emissioner, f.eks. drivhusgasser fra landbruget. Også her spiller negative CO_2 -emissioner en vigtig rolle til at kompensere disse.

Negative emissioner og lagring af kulstof

Negative emissioner kan opnås, når atmosfærisk CO_2 indfanges biologisk ved hjælp af fotosyntese/ plantevækst, kemisk ved forvitningsprocesser, eller teknisk ved hjælp af Direct Air/Ocean Capture med efterfølgende permanent lagring. Vi vil her koncentrere os om de biologiske metoder, som sker i stor skala overalt på kloden og er en både let og billig måde, men også begrænset af, hvor meget plantemateriale vi kan producere på vores begrænsede landareal.

Lagring af biologisk indfanget kulstof kan ske direkte i det biologiske system i planter og jord, f.eks. ved skovrejsning, hvor lagringen i træer og jord kan være stor, men permanensen er begrænset. Mere permanent lagring kræver, at det indfangede kulstof stabiliseres, f.eks. ved at biomassen afbrændes til energi, og den frigivne CO_2 opsamles og lagres i undergrunden (CCS), eller ved at omdanne biomassen til biokul vha. pyrolyse.



Her ses biokullet, som er opblandet i jorden på BIOSTORE-projektets feltforsøg i Taastrup.

Ved pyrolyse nedbrydes biomassen under høj temperatur og iltfattige vilkår. Herved undgås en fuldstændig nedbrydning til aske, vand og CO₂, og biomassen nedbrydes i stedet til biokul, bioolie og pyrolysegas. I processen frigøres omkring 2/3 af biomassens energi og halvdelen af kulstoffet, som genfindes i de producerede olie- og gasprodukter. Biokullet indeholder resten af energien og kulstoffet som rene og meget stabile kulstofbindinger, som nedbrydes ekstremt langsomt eller slet ikke. Biokul udgør derfor et næsten permanent lager for kulstof, der kan spredes ud på f.eks. landbrugsjord.

Er pyrolyse en brugbar løsning – hvor langt er vi?
Sammenlignet med CO₂-fangst og -lagring (CCS) er fordelene ved biokul, at pyrolyse er billigere, lettere, og mindre krævende at etablere og bringe op i skala hurtigt, og at anvendelse af biokul bidrager til at fastholde et højt kulstofindhold i jorden, recirkulerer ikke-fornybare næringsstoffer, og sikre en bedre

dyrkningskvalitet af f.eks. landbrugsjord. Biokul er desuden lettere at håndtere logistisk end flydende CO₂, og kræver ikke særlige geologiske lagrings-faciliteter. Ulempen ved pyrolyse er, at det kræver biomasse, og at ca. 1/3 af biomassens energiindhold ikke frigøres, men forbliver i biokullet, og at kun ca. halvdelen af kulstoffet i biomassen forbliver i biokullet som lager.

Anvendelsen af pyrolyse som klimainstrument forudsætter, at teknologien er moden, praktisk anvendelig og økonomisk realistisk, at biokullet er stabilt når det lagres, og at anvendelsen af biokul ikke medfører jordforurening, hvor det anvendes. Alle disse forhold er i store træk opfyldt for pyrolyse i dag. Pyrolyse er teknologisk set moden med tusindvis af anlæg verden over, inkl. mindre anlæg i Danmark, til behandling af spildevandsslam, og det første store danske pyrolyseanlæg til produktion af biokul fra landbrugsbiomasse er indkøbt for nyligt. Biokuls stabilitet er genstand for en del forskning,



Regeringen har etableret 4 forskningsmissioner med fokus på at skaffe viden, som er nødvendig for at finde løsninger til at Danmark opfylder klimaloven. Den ene af disse forskningsmissioner, INNOCCUS, undersøger CCUS-løsninger (Carbon Capture Utilisation and Storage), herunder også biologiske løsninger som f.eks. anvendelse af biokul. I INNO-CCUS-projektet BIOSTORE undersøger forskere fra KU i samarbejde med bl.a. biokul-producenter anvendelse af biokul i landbruget. På KU's forsøgsgård i Taastrup undersøges effekten af anvendelse af forskellige biokul-typer kombineret med forskellige landbrugsafgrøder på plantevækst og stabilitet af kulstoffet i jorden. Desuden undersøges også effekter på jordparametre og mulig udvaskning af miljøfremmede stoffer. (Fotos: BIOSTORE).



men generelt er vurderingen, at biokul er meget stabilt, hvis det er produceret og anvendt under relevante forhold - typisk med 80-90 % resterende kulstof lagret efter 100 år, selv hvis biokullet er anvendt i levende og biologisk aktiv jord. Ny forskning indikerer desuden stor stabilitet over tusindvis af år, hvilket også understøttes af fund af gamle biokul-partikler fra naturbrande, som er over 10.000 år gamle. Forureningsrisikoen ved biokul handler primært om potentielle giftstoffer (f.eks. tungmetaller) i biomassen og risikoen for tjærestoffer dannet i pyrolyseprocessen, hvis denne ikke er styret optimalt. Disse emner er forholdsvis godt belyst forskningsmæssigt, og kan i stor udstrækning vurderes på baggrund af feedstock og produktionsforhold. Der arbejdes dog fortsat på at bekræfte rammerne for sikker anvendelse og lave guidelines for praksis, så eventuelle negative effekter fra overdreven og uhensigtsmæssig brug undgås.

Udfordringer for pyrolyse som klimainstrument

Pyrolyse kræver ikke alene en velfungerende teknologi, men også stabil tilførsel af tilstrækkelig biomasse. Det kan være en betydelig udfordring, fordi vi allerede i dag har et stort underskud af biomasse og mange konkurrerende behov til f.eks. fødevarer, energi og nye anvendelser til bl.a. flybrændstof. Produktionen af mere biomasse er begrænset af vores landareal, som er fuldt udnyttet, og faktisk står over for en betydelig reduktion pga. EU-lovgivning og den nyligt vedtagne Grønne Trepert, som skal skabe bedre miljø og plads til natur og biodiversitet. At levere negative emissioner baseret på biomasse til pyrolyse og CCS, kræver altså en nytænkning af vores areal- og biomasseanvendelse. Derfor udvikles og udbredes pyrolyse i Danmark i dag primært til værdiudnyttelse af rest- og affaldsfraktioner, som øger værdiskabelsen fra biomasseressourcen, og er med til at understøtte en mere cirkulær og biobaseret økonomi.

En anden udfordring handler om energi. Der er som nævnt en mindre total energiproduktion fra pyrolyse sammenlignet med fuldstændig forbrænding af en given biomasse. På kort sigt, indtil forsyningen af vedvarende energi er fuldt udbygget, kan det påvirke pyrolysens klimaeffekt, hvis den biomasse, der anvendes til pyrolyse, i stedet må erstattes med fossil energi, og dermed fossil CO₂-emission. Omvendt kan pyrolyse i visse sammenhænge levere energiprodukter med højere klimaværdi end fuldstændig afbrænding. I denne sammenhæng er det vigtigt at huske, at energi-aspektet vil aftage og forsvinde i takt med at biomassens rolle i den generelle energi-

produktion aftager, fordi energisystemet omstilles til VE som en afgørende forudsætning for den grønne omstilling – en omstilling, der derfor også er vigtig at gennemføre hurtigt. Sidst men ikke mindst er det afgørende, at vi udvikler teknologier, der kan levere negative emissioner og avancerede energiprodukter. Her er pyrolyse en umiddelbart tilgængelig løsning, som kan kombineres med produktive arealer, i modsætning til f.eks. skovrejsning.

Aktuelt er den største udfordring for etablering af en dansk pyrolysesektor dog manglende lovgivning og regulering. Lovgivning skal være med til at sikre, at produktion og anvendelse af biokul sker under forhold, der værner om miljøet og dyrkningssystemerne. Desuden skal lovgivning skabe robuste rammer for afsætning, og for retvisende opgørelser og værdisætning af biokuls klimaeffekter. Den nødvendige lovgivning er under udvikling, og forventes på plads i 2027, når også de nationale støtteprogrammer iværksættes, men udviklingen over de næste par år er præget af usikkerhed.

Claus Beier

Professor, Inst. For Geovidenskab
og Naturforvaltning, KU og Faglig
leder af Biologisk CCUS under
INNO-CCUS



Tobias Pape Thomsen

Lektor, Inst. For Mennesker og
Teknologi, RUC



SKAL VI SELV TIL AT FANGE CO₂ FRA ATMOSFÆREN?



I den store fortælling om klimaforandringer er CDR (Carbon Dioxide Removal) og DAC (Direct Air Capture) begreber i vores arsenal af klimaløsninger, vi skal til at forholde os mere til. CDR refererer til den bredere vifte af klimatiltag, der både direkte og indirekte fjerner kuldioxid (CO₂) fra atmosfæren. Under denne vifte finder vi DAC, som henviser til tekniske løsninger, der direkte indfanger og permanent lagrer CO₂. Det er, helt bogstaveligt, klimaforandringer med omvendt fortegn – en teknologisk fortrydelsesknop – som skal kompensere for uundgåelige emissioner i fremtiden og rydde op for fortidens udledninger. Virkeligheden er nemlig, at selv hvis hele verden stoppede alle udledninger i morgen, ville vi stadig have et overskud af CO₂ i atmosfæren, som vil fortsætte med at opvarme planeten. I Danmark har vi døbt ambitionen ”Carbon 110 %”; missionen som både skal sikre kulstofneutralitet (100 %) og kulstofnegativitet (+10 %) for at rydde op i fortidens emissioner. Og behovet er stort; Klimarådet har estimeret, at vi fremadrettet skal indfange mellem 8-13 millioner tons CO₂ fra atmosfæren om året for at fuldføre missionen – og det bliver svært uden DAC i megaskala.

Hvordan fanger man CO₂ fra atmosfæren?

De DAC-teknologier, som er både under udvikling men også under demonstration, kan se meget forskellige ud, men de bygger alle på de samme grundprincipper, som består af i alt fire trin, se Figur 1.

I første trin skal enorme mængder luft ledes hen over et materiale, kaldet sorbenten, der kan binde CO₂. Udfordringen er, at selvom vi har for meget CO₂ i atmosfæren i forhold til global opvarmning, er koncentrationen af CO₂ i atmosfæren meget lav. For hver én million luftmolekyler er kun ca. 420 af dem CO₂. Derfor skal der faktisk ledes over 1 million kubikmeter luft henover sorbenten for at fange bare 1 ton CO₂!

I andet trin indfanger sorbenten selektivt CO₂, mens resten af luften returneres til atmosfæren. En sorbent er et materiale, der fungerer lidt som en svamp – men i stedet for at opsuge f.eks. vand, suger det CO₂ ud af luften. Sorbenter kan både være af faste eller flydende materialer, som kemisk binder sig til CO₂, selv når de kun er til stede i meget små koncentrationer som i atmosfæren.

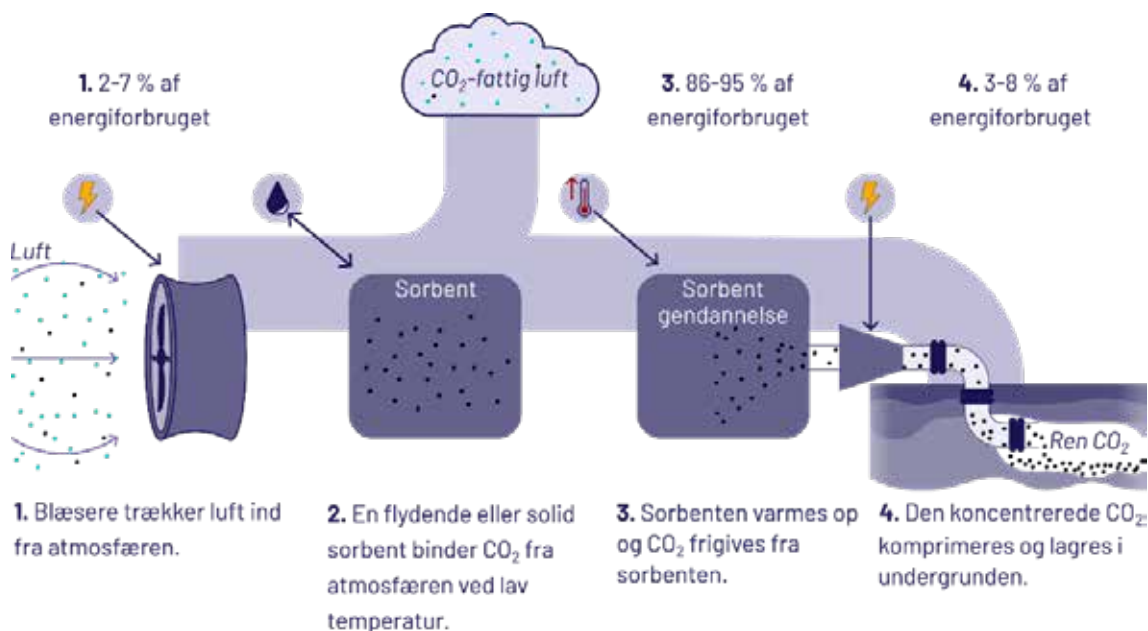
I tredje trin skal den indfangede CO₂ frigives fra sorbenten, hvilket normalvis sker ved at varme sorbenten op. Denne proces kaldes en "temperatur-swing", hvor CO₂ først bindes ved almindelig temperatur (Trin 1) og derefter frigives ved eleveret temperatur (Trin 2). Ved lavtemperatur-DAC-teknologi (LT-DAC) sker det ved omkring 100°C, mens højtemperatur-DAC-teknologi (HT-DAC) kræver helt op til 900°C. Hvor meget varme der skal bruges, afhænger af den konkrete teknologi og hvilken type sorbent, men alle DAC-teknologier er energitunge. De mest udviklede teknologier bruger mellem 1,7 og 2,2 megawatt-timer per ton CO₂, de fanger. Hvis Danmark i fremtiden skal fjerne mellem 8 og 13 millioner tons CO₂ om året, vil det kræve mellem 14 og 21 terawatt-timer energi – svarende til 25 til 50 % af Danmarks nuværende elproduktion! Langt det meste af energiforbruget til DAC går til frigivelse af CO₂.

I fjerde trin skal den frigivne CO₂ komprimeres, transporteres og derefter lagres – for eksempel permanent i undergrunden. Dette trin kræver ikke nødvendigvis udvikling, da CO₂-kompression, -transport, og -lagring vil kunne foretages sammen med CO₂ fanget fra f.eks. punktkilder hos Ørsted (biomasseforbrænding) eller Aalborg Portland (cementproduktion). På sigt vil DAC derfor være i stand til at udnytte allerede eksisterende infrastruktur, når først CO₂ er indfanget fra atmosfæren.

DAC-teknologier

I dag er særligt Climeworks og Carbon Engineering på vej med store demonstrationsanlæg. Climeworks satser på en solid sorbent-teknologi, som henter inspiration fra kommercielle, industrielle gasrensningsteknologier. Carbon Engineering satser på en flydende sorbent, hvor teknologien er stærkt inspireret af f.eks. cement- og papirindustrien. Vi ved derfor allerede, at disse teknologier virker rent teknisk, og at de kan skaleres til at fjerne millioner af tons CO₂. Omvendt ved vi også, at vi ikke skal forvente de store teknologiske gennembrud ved disse teknologier, da de allerede længe har været under udvikling. Da klimaafbødning i den grad også handler om hurtig implementering, har vi derfor brug for både kommercielle demonstrationer af 1. generations DAC-teknologier for at kunne skabe et troværdigt marked for DAC, men samtidig også at fortsætte med at innovere og udvikle 2. generations DAC-teknologier med potentiale til at sænke både energiforbrug og omkostningerne.

Et bud på næste generation af DAC-teknologier kan være såkaldte "elektrokemisk-swing"-processer, hvor fangst og frigivelse, modsat "temperatur-swing", kan finde sted ved stort set samme temperatur. Elektrokemisk-swing bruger elektricitet til at fange og frigive CO₂ fra luften gennem en kontrolleret kemisk proces. I stedet for at bruge varme, ændrer systemet den elektriske ladning i en flydende eller et solid sorbent, hvilket får sorbenten



Figur 1. Grundprincipperne i DAC med anslået fordeling af energiforbrug i processen. Kredit: Maria Maigaard Paulsen.

til at binde eller slippe CO₂. Når en elektrisk strøm tilføres, ændres sorbentens kemiske tilstand – og CO₂ frigives. Når strømmen fjernes eller vendes, bliver sorbentens igen klar til at fange mere CO₂. Flere rapporter, at deres elektrokemiske proces har et energiforbrug helt nede på 0.6 MWh/ton CO₂. Spørgsmålet er så, om sådanne umodne teknologier overhovedet kan skaleres både indenfor en rimelig tidshorisont i forhold til klimaafbødning og uden for store investeringsomkostninger. Elektrokemiske processer er nemlig kendte for både skaleringsudfordringer og generelt tab af performance over tid.

DAC i Danmark?

I en dansk kontekst vil opskriften på en DAC vinder-teknologi formentlig være en fuld-elektrisk løsning, som både kan tilbyde systemydelser som fleksibilitet, stabilisering af elnettet, fjernvarme mm. DAC vil ikke redde verden alene – men det vil blive et vigtigt redskab i værktøjskassen. Prisen på fangst af CO₂ fra atmosfæren vil næppe blive lavere end at udlede (f.eks. CO₂-afgifter), og derfor må vi som samfund acceptere, at visse løsninger koster. Spørgsmålet er: hvem tager regningen? Er det staten, industrien, forbrugeren – eller alle sammen? Hvis vi vil realisere ambitionen om kulstofnegativitet, kræver det, at vi tager debatten nu. Ikke om teknologien virker – men om vi er villige til at betale prisen for at rydde op.

Thomas Helmer Pedersen
Lektor, AAU Energi, Det Ingeniør- og Naturvidenskabelige Fakultet



VERDENS NATURFAG

Geografi



Lær om hele verden

Verdens naturfag - geografi er en del af systemet Verdens naturfag til 7. - 9. klasse, der binder de tre naturfag geografi, biologi og fysik/kemi naturligt sammen. Bogen kan bruges som et selvstændigt system eller integreres på tværs af fagene. Grundbøgerne er bygget identisk op og indeholder elementer til den fællesfaglige prøve.

Læs mere på gyldendal-uddannelse.dk/verdensnaturfag



CO₂-FANGST OG -LAGRING

– et kritisk perspektiv

Af: Erik Tang

I tråd med analyser fra FN's klimapanel, IPCC, og EU-Kommissionen satser dansk klimapolitik i betydelig grad på CO₂-fangst og -lagring til at opfylde reduktionsmålet på 70 % i 2030 set i forhold til 1990. Brede klimaforlig i Folketinget har afsat omkring 48 mia. kr. til teknisk CCS, der samlet ventes at levere godt 3 mio. tons CO₂ i 2030. Derudover afsætter den grønne trepartsaftale om landbruget 43 mia. kr. til bl.a. skovrejsning. CO₂-fangst vil udgøre ca. 6 % af den nødvendige samlede reduktion af drivhusgasser til at nå det danske reduktionsmål på 70 % i 2030.

Udgangspunktet er, at der findes udledninger af drivhusgasser, som vurderes teknisk, økonomisk eller politisk vanskelige at reducere til nul – herunder især fra cementproduktion og landbrug. Disse restudledninger må så enten opfanges og lagres permanent eller opvejes gennem optag og lagring af CO₂ fra atmosfæren af samme størrelsesorden. Regeringens tilgang illustreres fint i figur 1, hvor fire scenarier fra Energistyrelsen er vist sammen med Danmarks udledninger i 2019 og den forventede udledning i 2030 ifølge Klimastatus og -fremskrivning 2021.

Figuren indikerer klart, at Klimaministeriet forventer, at landbruget fastholder høje udledninger og helt vil dominere udledningerne i 2050, som derfor må opvejes af betydelige CO₂-optag fra atmosfæren. Optaget ventes især at ske med såkaldt BECCS, pyrolyse og DACCS, med skove i en mindre rolle.

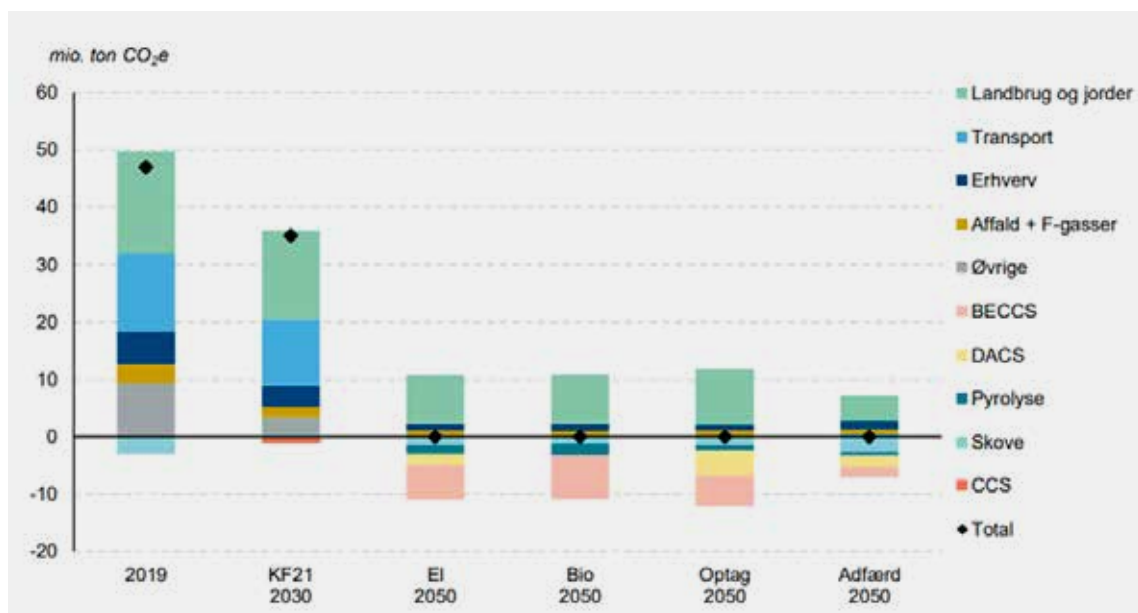
Rådet for Grøn Omstilling (RGO) deler Folketingets bekymring for klimaet, og er i udgangspunktet begejstret over de betydelige økonomiske rammer, der afsættes til klimaindsatsen. Men RGO er kritisk over for den énsidige satsning på rensning frem for forebyggelse af drivhusgasudledninger, og udgav i 2023 et længere notat herom (CO₂-fangst og -lagring.)

CO₂-fangst og -lagring har vist sig temmelig dyr, og øges af at klimaeffekten ved en række fangst-tek-

nologier er klart overvurderet. En rensningsstrategi vil fastholde høje omkostninger til klimaindsatsen mange årtier fremover, og vil med nuværende teknologivalg kræve store, miljøkritiske input af biomasse.

RGO anbefaler i stedet omlægning til plantebaseret kost og nye proteiner, som omvendt kan minimere udledninger fra fødevareproduktionen. Og så bør forurenerne betale for de CO₂-optag, der bliver nødvendige for at opveje deres rest-udledninger, så klimaomkostningerne reflekteres i prisen på især animalske fødevarer.

Pladsen tillader ikke en nærmere præsentation af forskellige teknikker til CO₂-fangst og -lagring, men her følger en ultrakort introduktion til de oftest diskuteret fangstmetoder: Der kan plantes ny skov, som optager og lagrer CO₂ i vedmasse. Denne lagring når et naturligt maksimum efter 50-150 år, og kan forsvinde igen ved skovbrande mv. CO₂ kan også trækkes ud af skorstensrøg fra afbrænding af fossile brændsler (kaldet CCS fra Carbon Capture and Storage) eller biomasse (kaldet BECCS fra Bio Energy Carbon Capture and Storage) og pumpes ned til permanent lagring i geologiske formationer. Endelig kan CO₂ trækkes direkte ud af atmosfæren (kaldet DACCS fra Direct Air Carbon Capture and Storage).



Figur 1. Energistyrelsens scenarier for netto-0 i 2050

CO₂-fangst og -lagring - en lang og trang historie

CO₂-optag og -lagring har en lang historie i international klimapolitik. FN's klimapanel, IPCC, udgav allerede i 2005 en specialrapport om behovet for og metoder til CO₂-fangst og -lagring. Siden har både EU og andre lande etableret mange incitamenter og store støtteordninger for at fremme CO₂-fangst. Som nærmere beskrevet i RGO's notat om CO₂-fangst og -lagring er der fortsat kun 4-5 større, fungerende CCS-anlæg bygget med klimaformål – alle udenfor EU: To anlæg i Norge udskiller CO₂ fra naturgas, og lagrer det geologisk for at undgå udledning til atmosfæren. Derudover findes der to egentlige CCS-anlæg, der trækker CO₂ ud af skorstensrøg: Et anlæg på det kulfyrede kraftværk Boundary Dam i Canada, samt et på Petra Nova kulkraftværket i Texas. Begge anlæg har haft betydelige praktiske og økonomiske problemer. Det sidste har gjort, at begge anlæg har solgt deres CO₂ til injicering i olieletter for at øge produktionen (EOR fra Enhanced Oil Recovery), hvor der ikke er sikkerhed for at alt CO₂'en forbliver lagret permanent.

Fangst af fossil CO₂ er dyrt og kan helt eller delvist erstattes

Det helt dominerende problem for udbredelse af CO₂-fangst er høje omkostninger. Mange tidligere

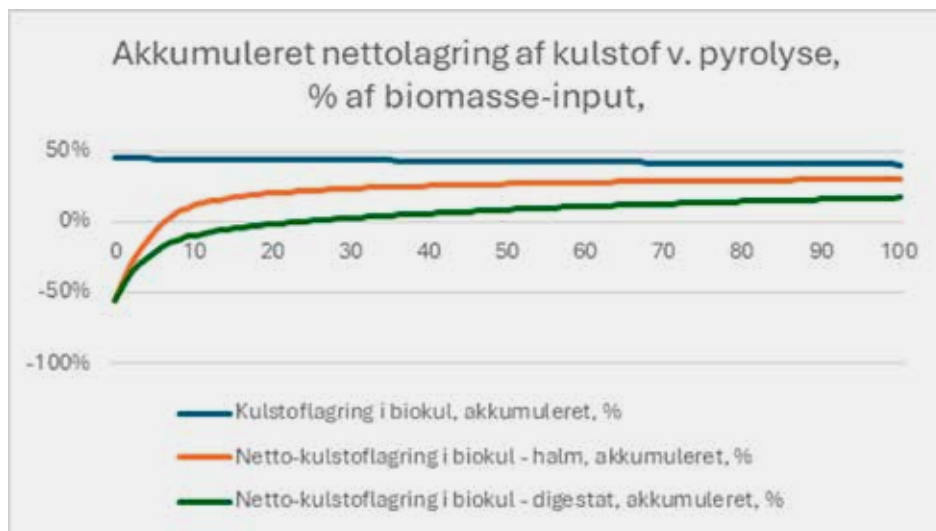
projektforslag er kuldsejlet pga. budgetoverskridelser, og eksisterende anlæg har måttet levere indfanget CO₂ til EOR, hvor der ikke er sikkerhed for permanent lagring.

Kraftig billiggørelse af strøm fra vedvarende energi de sidste 15 år har generelt forskudt det traditionelle fokus for CCS-anlæg fra fossilt fyrede kraftværker til nu især cementfabrikker. Men CO₂-fangst fra bio-raffinaderier, brintproduktion fra naturgas, BECCS mv. har fået øget interesse. Elektrificering er også ved at fortrænge CCS i stålremstilling. Prisfaldet på VE-el har desuden sat gang i yderligere teknologiudvikling, og RGO venter at elektrificering af både cement- og stålremstilling vil reducere brugen af dyr CCS yderligere. Især en ny teknologi til elektrisk fremstilling af cement kan potentielt reducere omkostningerne til CO₂-rensning, og de offentlige støtteprogrammer bør i langt højere grad satse på at nedbringe omkostningerne gennem teknologiudvikling.

CO₂-fjernelse via biokul er ineffektivt

Som illustreret i figur 1 ventes CO₂-optag fra atmosfæren via BECCS og biokul at få en dominerende rolle i klimapolitikken fremover.

Folketinget vil herunder satse 10 mia. til pyrolysering af biomasse til biokul og venter et nettooptag



Figur 2. RGO: Akkumulerede mængder biokul vs. netto CO₂-fjernelse ved pyrolyse af halm, biogas-digestat.

på 0,3 mio. ton CO₂ allerede i 2030. RGO's beregninger viser imidlertid, at der kan gå en del år, før netto-optaget i biokul overstiger kulstoflagring, ved blot at lade halm og biogas-digestat blive på markerne jf. figur 2.

Netto-kulstoflagring ved pyrolyse af halm og biogas-digestat er lavere end mængden af biokul, fordi det naturlige kulstoflager i halmen og digestaten går tabt og skal fratrækkes lageret i biokullet og ca. halvdelen af kulstoffet omdannes til pyrolyseolie og -gas. De første år vil netto-kulstoflagringen ved omdannelse til biokul faktisk være negativ. For halm går der seks år inden pyrolyse giver et større kulstoflager end at efterlade halmen på marken – og derved netto har optaget CO₂ fra atmosfæren. Ved pyrolyse af biogas-digestat går der ca. 24 år.

Klimaministeriets nye pyrolysestrategi når frem til en væsentligt højere netto-optag af CO₂ ved pyrolyse, især i de første år, selvom de også fratrækker tab af kulstof fra biomassen og til pyrolyseolie og -gas jf. figur 3.

RGO mener, at Klimaministeriets beregningsmetode og valg af data er forkerte. Ministeriet overser især, at et pyrolyseanlæg vil fungere i mindst 20 år, og at man derfor skal akkumulere effekterne ved pyrolyse over tid. Ministeriet præsenterer tilsyneladende kun kulstoflagringen over tid af første års input af biomasse, hhv. biokul. Derved bliver ministeriets estimat om en samfundsøkonomisk skyggepris på 1.400-4.000 kr. per fjernet ton CO₂ også alt for lavt.

BECCS - også lavt netto-optag af CO₂

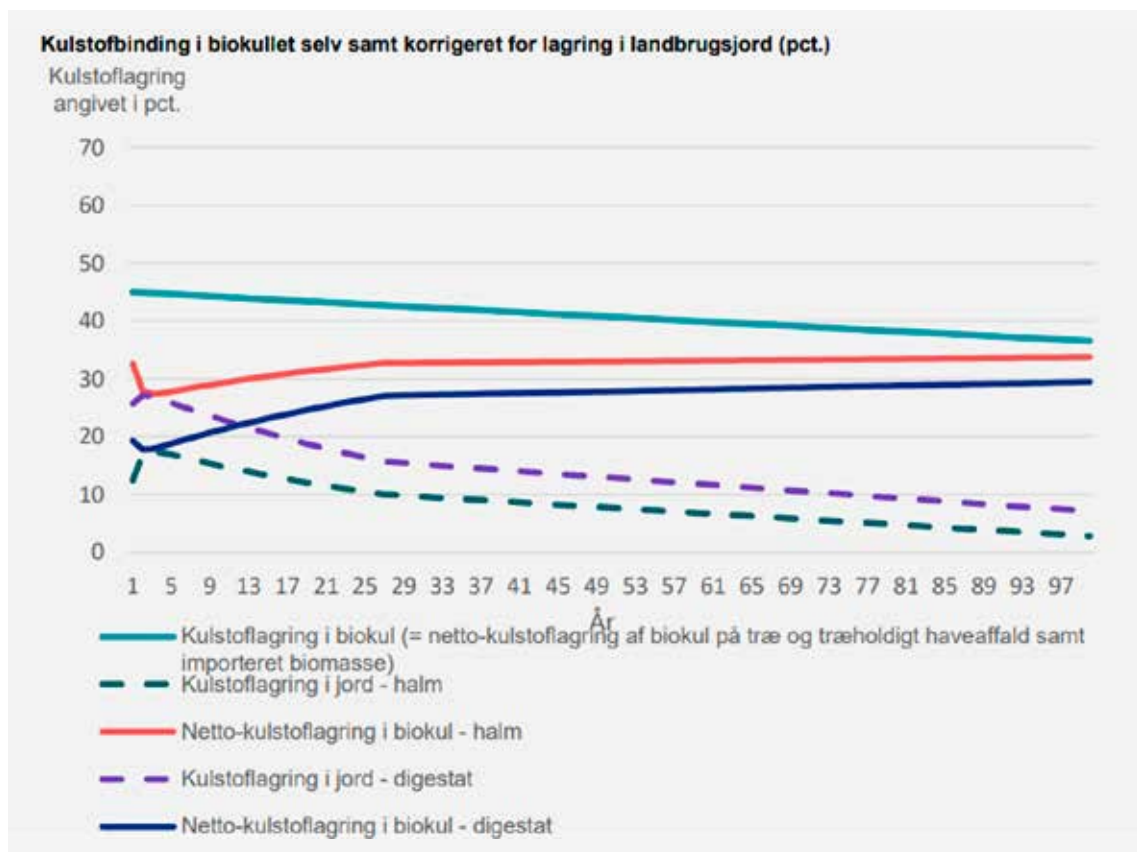
BECCS har samme problem som biokul: En betydelig del af den CO₂, der lagres geologisk, stammer fra biomasse-inputtet – og ikke direkte fra atmosfæren. En nylig, videnskabelig analyse viser således, at kun ca. 36 % af lagret CO₂ efter 20 års drift stammer fra atmosfæren – resten er CO₂ blot flyttet fra skov ned i jorden jf. figur 4.

Udover et vist CO₂-optag vil den energi, der produceres på et BECCS-anlæg, kunne betragtes som tæt på klimaneutral, fordi op mod 90 % af den producerede mængde CO₂ lagres geologisk. Men det bidrager ikke til optag af CO₂ fra atmosfæren. Så prisen per ton CO₂ optaget fra atmosfæren er væsentlig højere end den samfundsøkonomiske skyggepris på omkring kr. 1.350 per ton, som nævnes i regeringens Klimaprogram 2021.

Den citerede analyse viser også, at etablering af et BECCS-anlæg fører til en stigning i biomasseforbruget på 51 %, hvis el- og varmeproduktionen på værket skal opretholdes. Derfor risikerer en udbygning med mange BECCS-anlæg en yderligere udtømmning af især skoves kulstoflagre – en udvikling Det Europæiske Klimaråd for nyligt har advaret imod.

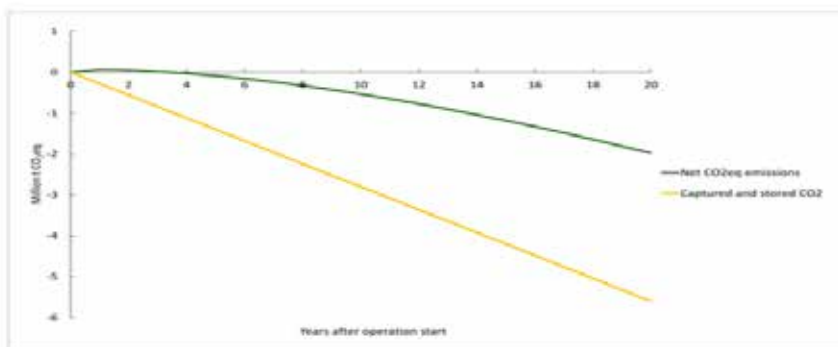
DACCS – måske ikke så urealistisk dyrt?

Direkte, mekanisk optag af CO₂ fra atmosfæren, DACCS, trækker ikke på knappe biomasse-ressourcer, men er hidtil anset for at være meget dyrere end biokul og BECCS per ton CO₂ trukket ud af atmosfæren. Klimaministeriet vurderede i 2021, at den



Figur 3. Klimaministeriet: Netto CO₂-optag ved pyrolyse af halm, biogas-digestat.

Figur 4. Akkumuleret geologisk CO₂-lagring og netto CO₂-optag ved BECCS over 20 år.



samfundsøkonomiske skyggepris for DACCS er ca. kr. 3.500 per ton CO₂ fjernet fra atmosfæren. RGO offentliggjorde i 2024 en større energianalyse, som antog at en DACCS-omkostning fremme i 2040 kan komme ned på ca. 2000 kr. pr. t CO₂.

Korrigeres der for den lave effektivitet af CO₂-fjernelse ved biokul og BECCS, vil prisen per netto-optag af 1 ton CO₂ være væsentligt højere end mange hidtil har estimeret. Klimaministeriets pris for så vidt angår fjernelse med biokul er kommenteret ovenfor. For BECCS estimerede CONCITO i 2024, at omkostningen per ton CO₂ lagret er i omegnen af 1000 kr. Hvis kun 37 % af lagret CO₂ er trukket ud af atmosfæren, indikerer et meget groft overslag, at omkostningen ved BECCS kan være i nærheden af 3000 kr. pr. ton fjernet fra atmosfæren.

Desuden har en opstartsvirksomhed for nyligt annonceret, at en nyudviklet DACCS-teknologi kan fjerne CO₂ fra atmosfæren til ca. 500 kr. per ton. Her til skal lægges omkostninger til transport og lagring af CO₂-en, som formentlig vil være lavere end for BECCS-anlæg, fordi DACCS-anlæg ofte kan placeres tættere ved CO₂-lageret end BECCS-anlæg.

Opsummering

Det ensidige fokus på CO₂-optag og -lagring med biokul og BECCS i det nuværende program risikerer at binde os til høje omkostninger til klimaindsatsen og et ikke-bæredygtigt forbrug af biomasse i adskillige årtier fremover. RGO mener regering og Folketing i stedet bør satse mindst lige så mange penge på at nedbringe restudledninger fra vanskelige sektorer som landbruget og cementproduktion. Desuden bør den nye DACCS-metode snarest afprøves under danske forhold.

Kilder:

- Klima-, Energi- og Forsyningsministeriet 2024: Klimaprogram 2024
- Klima-, Energi- og Forsyningsministeriet 2023: Klimahandling - I mål med fangst og lagring af CO₂
- Klimarådet 2022: Statusrapport 2022; https://klimaraadet.dk/sites/default/files/node/field_file/statusrapport_2022_webpdf_final.pdf
- Rådet for Grøn Omstilling 2023, CO₂-fangst og -lagring; <https://rgo.dk/udgivelse/co2-fangst-og-lagring/>
- Rådet for Grøn Omstilling mfl.: Fra foder til føde 2; <https://rgo.dk/wp-content/uploads/Foder-til-Føde-II-rapport.pdf>
- vi Rådet for Grøn Omstilling 2024; Alternative proteiner – hvad, hvorfor og hvordan; <https://rgo.dk/wp-content/uploads/Technical-brief-alternative-proteiner.pdf>
- IPCC 2005: The IPCC Special Report on Carbon dioxide Capture and Storage
- Global CCS Institute 2024; Global Status of CCS 2024; <https://www.globalccsinstitute.com/wp-content/uploads/2024/11/Global-Status-Report-6-November.pdf>
- ix EU Kommissionen 2025: Innovation Fund projects - European Commission; https://climate.ec.europa.eu/eu-action/eu-funding-climate-action/innovation-fund/innovation-fund-projects_en
- RGO 2024: Technological breakthrough for direct electrification – A new climate pathway for the cement and steel industries?; <https://rgo.dk/udgivelse/technological-breakthrough-for-direct-electrification-a-new-climate-pathway-for-the-cement-and-steel-industries/>
- Klima-, Energi- og Forsyningsministeriet 2025; Dokumentationsnotat for pyrolyse
- Klima-, Energi- og Forsyningsministeriet 2024; Strategi og arbejdsprogram for pyrolyse; <https://www.kefm.dk/Media/638638923282563772/Strategi%20og%20arbejdsprogram%20for%20pyrolyse.pdf>
- Weimann, G.G., Bentsen, N.S. 2024: Potential for carbon dioxide removal for carbon capture and storage on biomass-fired combined heat and power production; <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/gcbb.13184>
- European Scientific Advisory Board on Climate Change, 2025: Scaling up carbon dioxide removals; <https://climate-advisory-board.europa.eu/news/new-report-from-the-eus-climate-advisory-board-outlines-recommendations-to-scale-up-carbon-dioxide-removals-while-addressing-opportunities-and-risks>
- Rådet for Grøn Omstilling, 2024; Et bæredygtigt energisystem frem mod 2040. Rapport fra Ea Energianalyse; https://rgo.dk/udgivelse/et-baeredygtigt-energisystem-frem-mod-2040_ea-energianalyse/
- CONCITO 2024, Biomasseanvendelse og potentialet for CCS i forsyningssektoren; <https://concito.dk/files/media/document/Biomasse%20og%20CCS%20i%20forsyningssektoren%20endelig.pdf>
- Repair-Carbon; <https://www.repair-carbon.com/>

Erik Tang
Senioranalytiker, Rådet
for Grøn Omstilling



DAGENS GEOGRAF



Navn: Andreas Stokkendal Poulsen

Alder: 31

Uddannelse: KA i Geografi, BA i Internationale Relationer

Stilling: Klimapolitisk rådgiver

Hobbyer og andet sjovt: Jeg er tosset med at bikse med gamle cykler, bage glutenfrit brød, læse tykke bøger, og se reality-tv, når min 1,5-årige datter ikke koster rundt med mig.

[1. Hvorfor begyndte du at læse geografi?]

Min bacheloropgave handlede om Kosovos udfordringer i optagelsesprocessen mod EU-medlemskab, som jeg blev inspireret til efter et halvt år i praktik i landet. Min daværende disciplin, Internationale Relationer (IR), syntes jeg ikke, besad gode teorier til at forklare de fænomener, jeg var optaget af. Min litteratursøgning tog mig derfor ud i nogle fjerne afkroge af IR. Der stødte jeg på den politiske geografi, som jeg oplevede, var bedre til at besvare spørgsmål om regionalisering, ulige nationale magtforhold og politiske identiteter.

[2. Hvad er geografi for dig?]

Geografien er for mig en unik måde at begribe virkeligheden og politiske fænomener på. Efter at have tillært mig den ser jeg den overalt. I mit nuværende job, arbejder jeg især med omstillingen af landbruget. Her bliver jeg dagligt konfronteret med de rumlige konsekvenser af årtiers landbrugspolitik, der har ledt til en mildest talt bizar arealanvendelse herhjemme. Uden min træning som geograf til at folde komplekse sammenhænge ud, ville jeg ikke være i stand til at identificere forudsætningerne og konsekvenser af den udvikling.

[3. Hvem/hvad har været din største inspirationskilde ud i geografin?]

Jeg er dybt inspireret af særligt Doreen Massey, der ser rum som en afspejling af tiders politiske strømninger. Jeg synes, hendes tænkning rummer en utrolig forklaringskraft. Hendes perspektiv kaster f.eks. nyt lys over landbrugets dominans i landska-

bet – som et resultat af efterkrigstidens fokus på selvforsyning, et økonomisk system, der overser ikke-monetære værdier, og en stærk landbokulturel fortælling.

Også Wim Cartons arbejde med carbon removals (CDR) har gjort stort indtryk. Hans analyser af teknologiernes rolle i klimapolitikken, især til negative udledninger, viser, hvordan institutionel autoritet og stiafhængighed former hele samtalen i mange år frem – selv når teknologierne endnu ikke er modne til de punktkilder, som er nødvendige.

Senest har jeg opdaget Brett Christophers, hvis bøger *The Price Is Wrong* og *Our Lives in Their Portfolios* skarpt analyserer henholdsvis vedvarende energi og privat ejerskab af essentiel infrastruktur. Det er noget af det mest indsigtsfulde, jeg har læst siden universitetet.

[4. Hvad ser du som det 'hotteste' geografi-emne i øjeblikket?]

CDR (Carbon Dioxide Removal, dansk: kulstoffjerning). Uden tvivl. Ideen om netto-nul i 2050 afhænger af, at verden kan udvikle og skalere nye teknologier i et tempo, som kun solceller har formået i nyere tid. Det er en stort set umulig opgave, og det lover ikke godt for temperaturstigningerne.

[5. Hvordan bruger du/har du brugt geografiuddannelsen i dit arbejde?]

Hver dag bruger jeg min evne til at analysere og folde konteksten for mit fokus ud, uanset om det handler om brugen af vores arealer, økonomiske fænomener eller noget helt tredje.

Nyt fra fagudvalget

BJERGARTER, GEOLOGI OG TEORIEN OM PLADETEKTONIK (2).

Undervisning i udskoling (7. – 9. klasse)

I denne anden artikel om undervisning i geologi og teorien om pladetektonik handler det om udskoling. Det er fortsat den samme didaktiske ramme som beskrevet i artikel 1 (GO5-2024), og der henvises ind imellem til dette afsnit med modellen om det nære og fjerne/konkrete og abstrakte (Figur 1, artikel 1) samt Helmuth Köcks model med de fire erkendelsesniveauer (Figur 2, artikel 1). Disse to modeller er samlet her i Figur 7.

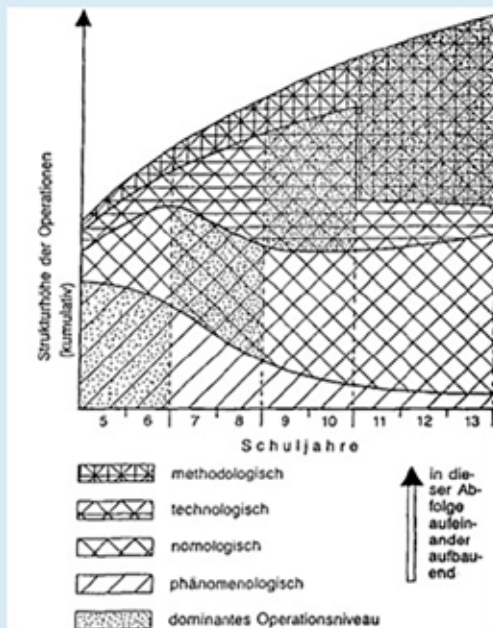
I udskoling vil tyngden i undervisningen ligge på det fjerne og abstrakte (se Figur 7 øverst), nemlig det geologiske- og pladetektoniske- samt i mindre omfang vandets kredsløb som samlende model for forståelsen af jorden som en dynamisk planet. I forhold til Köcks fire erkendelsesniveauer (se Figur 7 nederst) vil hovedvægten ligge på det nomologiske på 7. og 8. klassetrin, glidende over i det teknologiske som det dominante i 9. klasse. Forståelsen af hvordan naturvidenskabelig viden bliver til, og hvordan vi mener at vide hvad vi ved, er en del af undervisningen i udskoling, så derfor kommer der tydelige elementer af det metodologiske.

Udvidelsen og uddybelsen af hvad eleverne kan og ved fra n/t-forløbet fortsætter naturligvis i udskoling. Genaktivering af kendskabet til bjergarter, overfladeformer og fænomener i sammenhæng med verdenskortet er ligesom ved overgangen fra indskoling til mellemtrin nødvendig, da disse indholdselementer udbygges i udskoling.

Det fænomenologiske er således fortsat en ikke uvæsentlig del af undervisningen, og det kommer til at dreje sig om udvidelse af kendskabet til bjergar-

Figur 7. Didaktiske modeller

	Det nære	Det fjerne	som samlende model
Konkret	Sten – at kende til særlige karakteristika ved de tre hovedtyper	Kende til geologiske fænomener og strukturer på Jordens overflade	
Abstrakt	Kende til de dannelsesmiljøer hvor stenene (bjergarterne) dannes samt grundlæggende processer.	Forklaring af strukturer og fænomener på Jordens overflade samt de geologiske dannelsesmiljøer	
Det geologiske – og pladetektoniske kredsløb			



Figur 8. Magmatiske bjergarter og nogle kendetegn

	Felsiske	Intermediære	Mafiske	Ultramafiske
Farver	Lyse, ofte rødlig eller gullige	Grålige, mørkegrå	Mørke, sortgrå	Mørke, grønlig
Mineralindhold	Stigende andel af mørke mineraler			
Smeltens viskositet	Tyktflydende Tyndtflydende			
Dagbjergarter Tætte (ensartede) til finkornede, korn <1mm	Tæt til finkornet i lyse, rødlig til brunlige farver evt. med strøkorn (prik mønster)	Tæt til finkornet i grålige farver evt. med strøkorn (prik mønster)	Tæt til finkornet i mørke/ sortgrå farver, evt. med strøkorn (prik mønster)	Tæt til finkornet, Meget mørk evt. med grønt skær (meget sjælden)
Dybbjergarter Mellemkornede 1-5 mm Grovkornede >5 mm	Mellem til store rød- og gullige samt lyse krystaller ofte iblandet sorte korn (puslespilsmønster)	Mellem til store grålige til mørkegrå og lyse krystaller (puslespilsmønster)	Mellem til store ofte aflange/listeformede sortgrå samt lyse krystaller (puslespilsmønster)	Næsten kun mørke samt grønlig krystaller (puslespilsmønster)

Efter Sørensen 2024, Lykke-Andersen et.al 2008 og Jensen 2005

ter, de pladetektoniske grundsituationer, vulkanyper samt introduktion til at anvende seismiske data. Håndstykker, atlas, verdenskort og modeller er uundværlige læremidler i undervisningen.

Tektoniske pladegrænser differentieres i konstruktive, bevarende og destruktive grænser, og i sidstnævnte tilfælde udvides viften til de tre situationer: kontinent – kontinent kollision, oceanbunds subduktion under kontinent og oceanbunds subduktion under oceanbund. I Figur 6, artikel 1 ses eksempler på dette og i øvrigt kan der henvises til Juniorgeologerne (GEUS) samt GEUS-publikationen Den Dynamiske Jord (Andersen et.al) for forklaringer og modeller til undervisningen. Desuden tager de fleste læremidler dette under behandling.

Forskellige vulkanyper knyttes til pladegrænserne, f.eks. stratovulkaner til destruktive grænser, hvor oceanbund subducerer og sprækkevulkaner til konstruktive grænser. Til det ikke grænserelaterede

fænomen hotspottet, kan skjoldvulkaner knyttes, se til venstre i Figur 10 herunder for et eksempel.

De forskellige vulkantypers form er dels betinget af den tilhørende magmas viskositet, altså om den er tyktflydende eller tyndtflydende (se Figur 8 herunder), dels den pladetektoniske situation. Sprækkevulkaner optræder ved konstruktive pladegrænser (sprækker), og det er sædvanligvis tyndtflydende magma, som har mafisk sammensætning, se faktaboks, der føder disse. Ved hotspottet, hvor der dannes skjoldvulkaner, er der ligeledes tale om tyndtflydende magmaer, der kan være mafiske eller ultra mafiske. Til de destruktive pladerande knytter stratovulkanerne sig med deres tyktflydende felsiske/intermediære smelter. Her optræder ofte også store askemængder og udbrud kan være eksplosive.

Til de konstruktive- og destruktive pladegrænser med deres tilhørende vulkan- og magmatyper kan yderligere tilføjes skelen mellem dag- og dybbjergarter. Sættes dette på skemaform kan vi få et redskab til at knytte konkrete eksempler til de forskellige magmatiske dannelsesmiljøer. Et sådant skema, hvor der desuden er indføjet en kolonne til de såkaldte intermediære bjergarter er vist i Figur 8. Intermediære bjergarter optræder typisk i forbindelse med subducerende oceanbund, men kan også optræde i forbindelse med rifting – altså begyndende opsplitning af et kontinent. De dannes ved at tilstedeværelsen af vand sænker smeltepunktet i

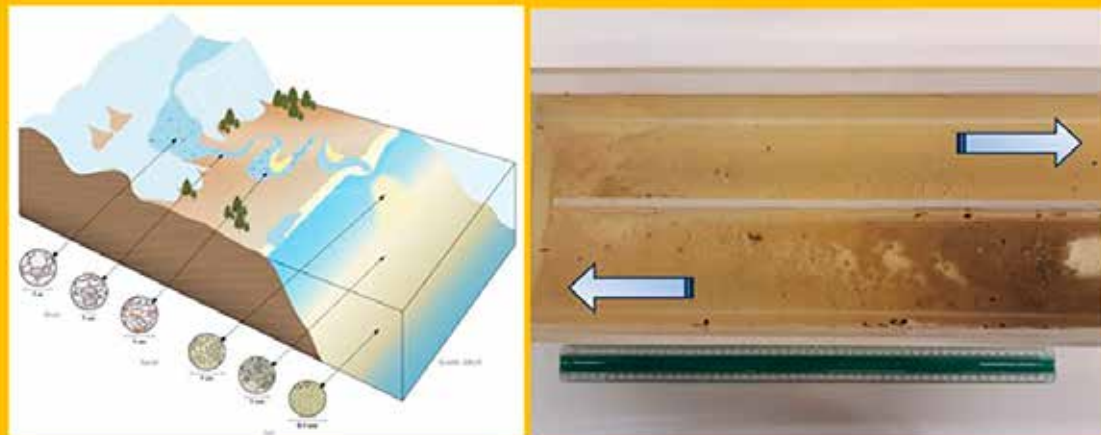
Faktaboks om mafiske og felsiske magmaer

Mafisk mineral, (1. led af *ma*(gnesium) og lat. *f*(errum) 'jern'), samlebetegnelse for magmatiske og metamorfe bjergarter med overvejende mørke mineraler.

Ordet felsisk er afledt af *fel*dspat og *silica* (dvs. kvarts). Betegnelse for magmatiske og metamorfe bjergarter med overvejende lyse mineraler

Efter Jensen (2005) og lex.dk

Figur 9. Model og afprøvning af sedimentation



mafiske bjergarter.

For at kunne bruge dette skema må vi udvide repertoire af kriterier til at identificere magmatiske bjergarter fra forskellige dannelsesmiljøer. Disse er indført i skemaet, som er vejledende idet ikke alle magmatiske bjergarter kan identificeres med det. Det kan bruges til at identificere nogle grundtyper af bjergarter, der sammen med oplysninger om smeltens viskositet og kornstørrelser, kan knyttes til pladetektoniske dannelsesmiljøer i hhv. destruktive og konstruktive zoner. Med en grov tommelfingerregel kan felsiske og intermediære bjergarter knyttes til subduktionszoner, og mafiske og ultramafiske kan knyttes til hhv. oceanbundsspredning og hotspots.

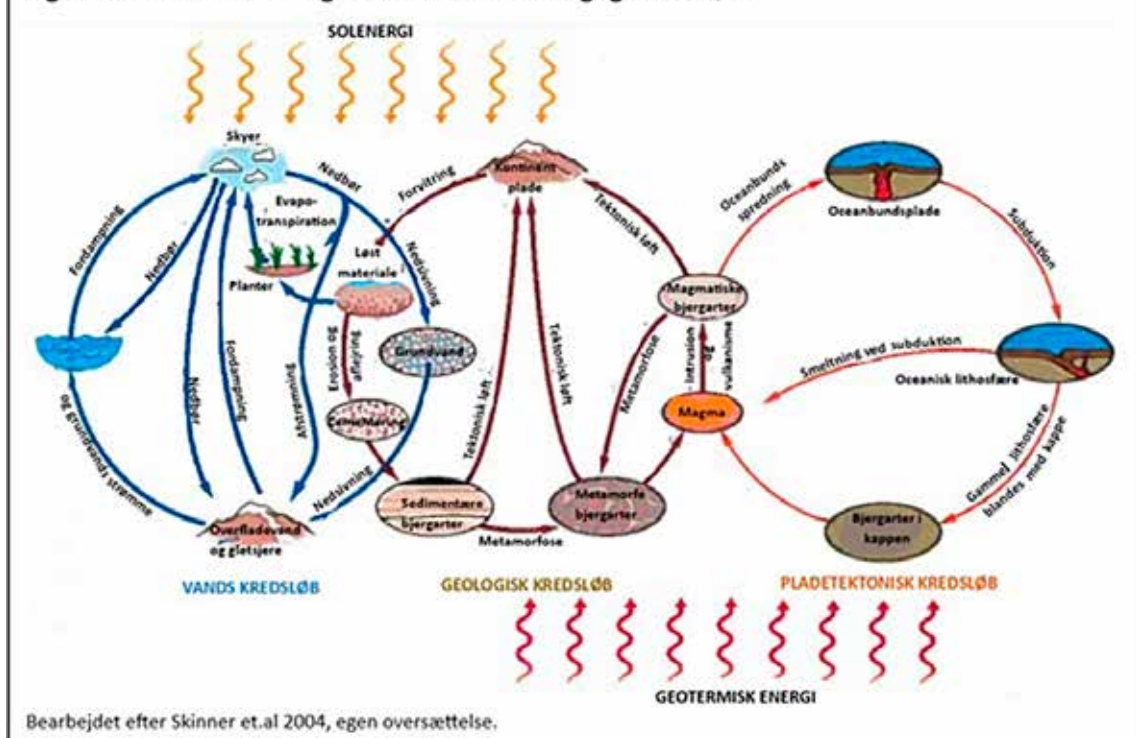
Langs alle pladerande hvor der dannes foldkæder udsættes bjergarterne for højt tryk, og tilstrækkeligt langt nede, høje temperaturer. I disse miljøer dannes metamorfe bjergarter, hvad enten de er af magmatisk eller sedimentær oprindelse. I områder med opstigende magma forekommer desuden såkaldt kontaktmetamorfose ved forhøjede temperaturer omkring magmakamre. Kriterierne for at genkende metamorfe bjergarter er stort set de samme som introduceredes i indskolingen. Et enkelt tilfælde bør dog fremhæves. Den metamorfe bjergart marmor, hvis oprindelse er den sedimentære bjergart, kalksten, danner puslespilmønster (Rasmussen 1999), som ellers er karakteristisk for magmatiske dybbjergarter. Marmor findes i mange farvenuancer fra hvid til sort og nogle gange også med hvirvler og årer. Hvis man støder på puslespilmønster i bjergarter, der ikke ligner magmatiske bjergarter skal man være på vagt. Ved at afprøve om

saltsyre giver en opbrusning ved påføring, afsløres om den er kalkholdig og derfor sedimentær i sin oprindelse.

Også for de sedimentære bjergarters vedkommende kan der tilføjes nye typer på udskolingstrinnet. Kriterierne, der introduceredes i indskolingen (lagdeling/enkeltkorn) indfanger de fleste såkaldte klastiske sedimenter (klaster = brudstykker), som f.eks. sandsten og konglomerater. En af undtagelserne er lersten, hvis enkeltkorn selv under lup ikke kan erkendes. Et kendetegn er dog, at lersten ofte spalter i flager, og de optræder i forskellige grå og sorte farvenuancer.

Forståelsen af hvordan klastiske sedimenter sorteres i dannelsesmiljøerne kan f.eks. illustreres med modellen til venstre i Figur 9. Den stammer fra Juniorgeologernes forløb om Danmarks Geologi (Rasmussen & Nielsen 2020) og illustrerer hvordan de groveste forvitningsprodukter aflejres tættest på kilden, og de fineste længst væk hvor aflejringssmiljøet er roligere. Modellen kan afprøves i laboratoriet f.eks. med et strømningsakvarie med vand, en pumpe og et par håndfulde grus, se Figur 9 til højre, hvor pilene angiver strømretningen. Tættest på pumpen (nederst til højre i akvariet og uden for fotoet), hvor vandstrømmen er kraftigst, drysses lidt grus ned i vandet når pumpen har kørt lidt tid så vandet i hele akvariet er i god bevægelse. Her, tættest på pumpen, holdes bunden ren, men kun få cm til venstre herfor begynder aflejring af partiklerne. Jo længere væk man kommer, des finere materiale aflejres. Desuden kan bølgeribber iagttages på tværs af strømmens retning.

Figur 10. En sammenhængende model for tre vigtige kredsløb.



Bearbejdet efter Skinner et.al 2004, egen oversættelse.

Aktiviteten er et eksempel på hvordan eleverne kan vurdere en model i forhold til en virkelighed de selv skaber i laboratoriet. Ræsonnement og argumentation om relationer mellem model og afprøvning kan både styrke deres forståelse af faglige sammenhænge, og er tillige et eksempel på hvordan viden hele tiden afprøves. Desuden kan der perspektiveres til andre dele af faget, f.eks. til Weichsel Istidens smeltevandsflader syd og vest for Hovedopholdslinjen, og dermed også til virkeligheden. Jf. Figur 7 nederst er Köcks fire erkendelsesniveauer repræsenteret her.

De klastiske sedimenter er mineralske nedbrydningsprodukter fra bjerge. Dertil kan introduceres to andre hovedtyper af sedimentære bjergarter, nemlig biogene- og kemiske sedimenter. Til disse to hovedgrupper kan der ikke gives fælles kriterier, men kendetegn for nogle af de vigtigste forekommende bjergarter af disse typer i det danske område omtales i det følgende.

Det mest udbredte og hyppigst forekommende biogene sediment hos os er kalkspat, der optræder som kridt eller kalk. Farverne er grundlæggende hvide med nuancer fra gullige til gråhvide. Strukturen i bjergarten er grynet og der kan forekomme

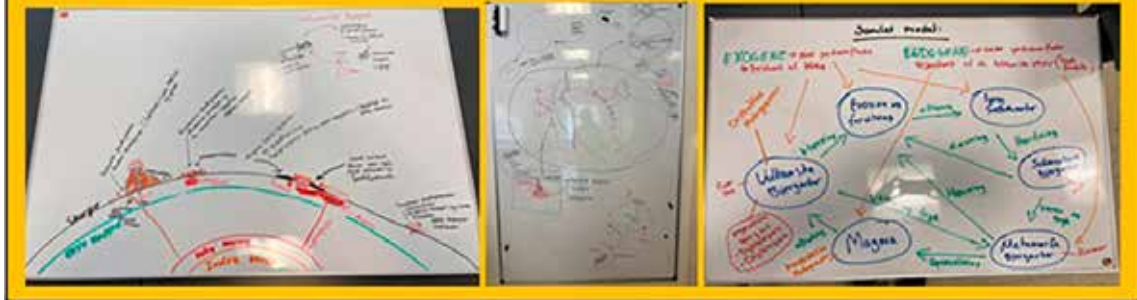
fossiler. Det er en relativ blød bjergart, der afsætter striber når man skurer dem mod andre bjergarter. Syreprøven vil i tvivlstilfælde være den endelige afgørelse. Derudover findes i Jylland forekomster af brunkul, der som navnet antyder optræder i brune nuancer, kan være lagdelt og har ofte tydelige spor af plantemateriale.

Af kemiske sedimenter skal den velkendte og hyppigt forekommende flint nævnes. Flint optræder i blåsorte til brunbeige nuancer, grundmassen er ensartet uden korn, ofte med forekomster af forkislet kalk, og kendes desuden ved at brudflader er muslede (minder om båndene på muslinger, Rasmussen 1999).

Med kendskabet til teorien om pladetektonik og de forskellige bjergarter kombineret med vandets kredsløb, har eleverne i udskoling en god og nuanceret grundlag for en sammenhængende forståelse af, hvordan jorden geologisk set fungerer, se Figur 10. Modellen er kompliceret og kan være svær at overskue, hvorfor der med fordel kan arbejdes med de enkelte kredsløb, sætte dem sammen to ad gangen og derigennem gradvist opbygge forståelse for og anvendelse af den.

Figur 11 gengiver tre eksempler på studerendes

Figur 11. Bearbejdning af geologiske- og pladetektoniske sammenhænge



bearbejdning af geologiske og pladetektoniske sammenhænge på whiteboards. Til venstre er disse lokaliseret i Jordens indre eller på dens overflade i en tilnærmet virkelighedstro gengivelse, mens modellen til højre lægger vægt på processerne som det, der forbinder fænomenerne uanset hvor på eller i Jorden de forekommer – en mere abstrakt model. Modellen i midten afbilleder pladegrænserne placeret på jordens overflade, og detailtegninger uddyber hvilke pladetektoniske fænomener og dannelsesmiljøer samt de bjergartstyper, der knyttes til disse på udvalgte lokaliteter. Tre meget forskellige måder at udtrykke sig om det samme sagsforhold på, hvilket med tydelighed illustrerer behovet for at give den lærende person – elev eller studerende – en række forskellige muligheder for at kunne udtrykke sig. Ved at undlade fortrykte svarmuligheder, får læreren et bedre indblik i hvad den lærende person tænker og forstår om sagsforholdet. Anvendelse af flere forskellige repræsentationsformer (multimodalitet), dels i egne oplæg og introduktioner i undervisningen, dels i planlægningen af aktiviteter for klassen, stimulerer læreprocesser, og giver flere deltagelsesmuligheder, og øger dermed glæden ved at deltage i undervisningen (Cope & Kalantzis 2009).

Som tidligere nævnt, er der stadig en del forhold i forbindelse med både det geologiske- og især det pladetektoniske kredsløb, der endnu ikke helt er klarlagt, og dermed er teorien om pladetektonik

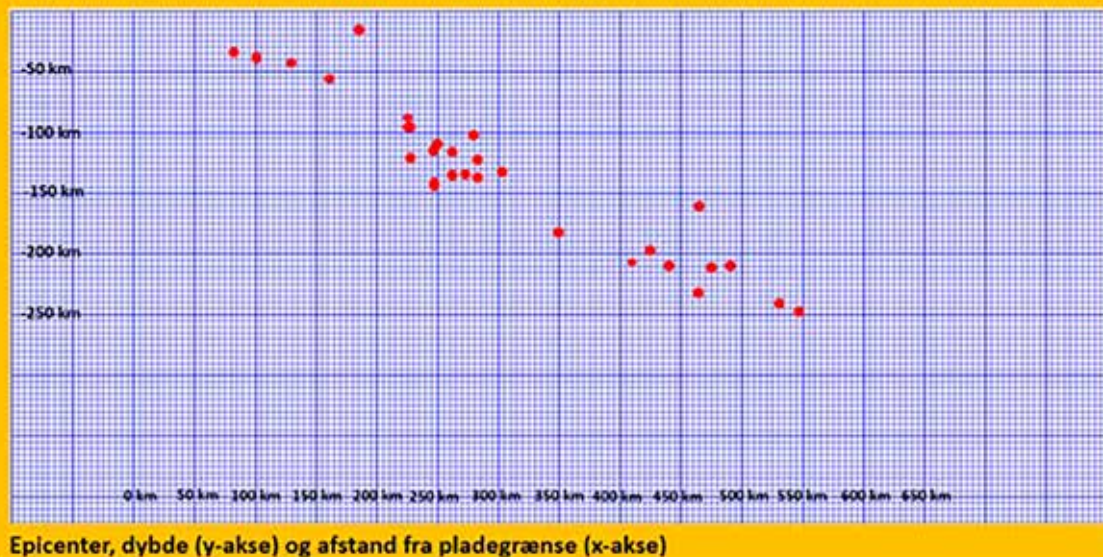
netop en teori, og ikke den endegyldige forklaring på hvordan kræfter virker og bevæger materiale i jordens indre.

Da Alfred Wegener (lex.dk) i begyndelsen af det 20. århundrede fremlagde ideer om kontinentaldrift blev han, populært sagt, buhet ud af de daværende førende geologiske miljøer, dels fordi han ikke kun var geolog, men også havde en meteorologisk baggrund, dels fordi han ikke kunne forklare de kræfter, der skal til for at sætte hele kontinenter i bevægelse. Skønt Wegener leverede vægtige indicier, som f.eks. det oplagte, at Eurasia-/Afrika kontinenterne så nydeligt passer sammen med de Nord-/Sydamerikanske kontinenter, og nok så vigtigt, at han på baggrund af sin deltagelse i en del videnskabelige ekspeditioner kunne fremlægge beviser for at fossiler af dyr og planter tilhørende samme, nu uddøde arter, findes på forskellige, nu adskilte kontinenter, så var det ikke nok til at overbevise "the establishment" af førende geologer i tilstrækkelig grad til, at den forklaring kunne accepteres og overtages.

Historien om hvordan danske geologer modtog Wegeners ideer kan du læse i artiklen "Da drivende kontinenter blev slået fast" (Olsen 2008). Denne historie giver samtidig et vældigt godt indblik i hvordan og hvor svært det er at ændre et videnskabeligt paradigme.

Geologernes udfordringer har hele tiden været at komme med plausible forklaringer på de fænome-

Figur 12. Seismiske data fra Sydamerikas vestkyst, USGS Latest Earthquakes



ner, processer og mønstre vi erkender på jordens overflade. Allerede i 1600-tallet undrede den danske læge, Nicolaus Steno (Niels Steensen, lex.dk), der var bosat i Italien, sig bl.a. over forekomsten af fossile hajtænder i de Toskanske bjerge, højt over havet og langt fra kysten, og hans arbejde med det førte til grundlæggelsen af den moderne geologi.

På daværende tidspunkt skulle man være endog særdeles varsom med at gå imod de kirkelige doktriner, og alt andet lige er det da også nemmere at forklare fænomener som f.eks. tilstedeværelsen af bjerge og vulkaner samt forekomsten af jordskælv (eller hajtænder langt fra havet) som bestemt og skabt af Gud – så behøver man ingen besværlige udredninger og bevisførelser.

Men vi mennesker lader os gerne udfordre, vender i bogstaveligste forstand hver en sten for at søge forklaring og sammenhæng. Både kirken - og 300 år senere - også de toneangivende geologiske miljøer blev således i stigende grad udfordret af ny viden og en nærmest eksplosiv udvikling af forskellige teknologier – især efter anden verdenskrig. Det førte i sidste ende til, at teorien om pladetektonikken (og ikke kontinentaldriften) i løbet af 1960'erne blev accepteret som den for tiden bedste sammenhængende forklaring af de geologiske fænomener og mønstre vi erkender på jordens overflade. Det er den stadig.

Siden den danske matematiker Inge Lehmann

(NBI) i 1936, på baggrund af særdeles grundig bearbejdning af seismiske data, fremsagde og underbyggede sin teori om at jordens kerne er delt i to, nemlig en ydre flydende del og en indre fast del, har seismologien fået stigende betydning både i praktiske opgaveløsninger, f.eks. ved geologiske undersøgelser ifb. med etablering af havvindmølleparker mm., og som redskab for at forstå sammensætning og bevægelser i jordens indre. I dag er seismologien en af de vigtigste kilder til information om disse forhold.

I undervisningen i udskolingen kan seismiske data f.eks. hentet på Latest Earthquakes (USGS) give et indtryk af hvordan seismologi og teorien om pladetektonik hænger sammen. Ved at kombinere oplysninger om epicentres dybde og afstanden til nærmeste pladerand for jordskælv i et udvalgt område langs den sydamerikanske vestkyst er grafen i Figur 12 lavet. Der synes at være en god (lineær) sammenhæng mellem afstanden til pladeranden og epicenterets dybde, og en mulig tolkning er, at der er tale om nedsynkning af en oceanbundsplade under kontinentpladen. Et opslag i GO Atlas s. 86-87 (Kristensen 2017), se også Figur 5 i artikel 1 øverst til højre, der gengiver et fysisk verdenskort og derunder modeller af udvalgte pladetektoniske fænomener langs profilinjer markeret på kortet, bekræfter at Nazcapladen subducerer under den Sydamerikanske plade.

Eleverne får undersøgt, modelleret og perspektiveret ved brug af forskellige geografiske kilder. På samme tid er dette konkret (virkelige data fra virkelige jordskælv) og abstrakt (nedsynkende oceanbundsplade), men fordi eleverne har mulighed for selv at arbejde med data og komme frem til en forklaringsmodel, kan det blive nærværende og vedkommende. Set i forhold til Köcks fire erkendelses-niveauer kan hele paletten repræsenteres. Jordskælv og data, der knytter sig til det er det fænomenologiske, viden om pladegrænser, epicenter og at det er bevægelse der udløser jordskælv, er det nomologiske og tolkningen af de bearbejdede data repræsenterer det teknologiske niveau. Underbygningen af vores forestillinger om nedsynkende oceanbundsplader med empiriske data repræsenterer det metodologiske niveau, og dermed den måde naturvidenskabelig viden bliver til.

Teorien om pladetektonik forklarer sammenhænge mellem de geologiske fænomener, strukturer og mønstre vi kan erkende som værende tilstede på jordens overflade. Kobler vi dertil viden om det geologiske kredsløb samt vandets kredsløb har vi grundlaget til en sammenhængende forståelse af hvordan vores verden, geologisk set, fungerer. Det er naturligvis sagt med det forbehold, at det er den bedste forklaring vi på det foreliggende vidensgrundlag mener at have.

I sin grundform er teorien om pladetektonik i dag den samme, som da den blev accepteret som en forklaringsmodel, men forskellige dele af den er ændret over årene, særligt det med hvordan strømme af varmt materiale fra kappens dybere dele stiger ud mod overfladen og hvordan afkølet skorpe synker ind, er der ikke helt klarhed og konsensus om. Ligeledes er årsagerne til oceanbundsspredningen heller ikke belyst fuldt ud, og dermed er forklaringsmodellerne for hvordan og hvorfor kontinenterne bevæger sig stadig under udvikling.

Det vi arbejder med i skolen, er en stærk forenkling af den forskningsviden der findes, og der er som nævnt ovenfor, endnu forhold som ikke er helt belyst og derfor vil der dukke spørgsmål op, som ikke kan imødegås med nagelfaste svar og forklaringer. Det betyder jo så også, at der er masser at tage fat på for spirende geologer – endnu lever eventyret!

Litteratur

- Andersen O. B., Khan S. A., Knudsen T., Larsen T. B. og Voss P. (-): "Den dynamiske Jord", GEUS
- Cope, B. & Kalantzis, M (2009): Multiliteracies: New Literacies, New Learning, Pedagogies: An International Journal, 4:3, 164 — 195
- Frøyland, M., Remmen, K. B og Sørvik, G. O. (2016): "Name-Dropping or Understanding?: Teaching to Observe Geologically", i; Science Education, DOI 10.1002/sce.21232, Published online 30 June 2016 in Wiley Online Library (wileyonlinelibrary.com).
- Hammerborg, A. C. (2014): "Barn + stein = sant", naturfag-senteret.no, publisert fredag 23. mai 2014.
- Jensen, E. S. (2005): "Sten i farver", 6. udgave, 7. oplag, Politikens Forlag 2020
- Kristensen, P. (Red.) (2017): GO Atlas til overbygningen og gymnasiet, 2. udgave, GO Forlag 2017.
- Kristensen P., Kjeldsen, N., Pedersen, O., Jørgensen, H. L. og Bruun, K. (2016): "Geografiundervisning – Fagdidaktisk grundbog", 1. udgave, 2. oplag, GO Forlag.
- Köck, H. (1994): "Zum Profil des modernen Geographieunterrichts – eine aufklärende und zugleich, programmatische Positionsbestimmung"; i Internationale Schulbuchforschung 16 (1994), p. 309-331.
- Lykke Andersen, A. L., Christensen, K.-E., Jensen T. P., Steltzner, K. og Olesen L. W. (red)(2015): "Naturgeografi – Jorden og mennesket", 2. udgave, 4. oplag Geografforlaget 2015, kap. 2 & 3, s.28-103.
- Olsen, H. (2008): "Da drivende kontinenter blev slået fast - danske geologer, kontinentaldriften og pladeteknikken.", i; "Geologisk Nyt" 2008/12.
- Rasmussen, E. S. & Nielsen, A. T. (2020): "Danmarks Geologi – en kort introduktion", Juniorgeologerne, GEUS, https://junior-geologerne.dk/wp-content/uploads/2020/06/Junior-Geologerne_Danmarks_geologi.pdf, besøgt 2024 0929
- Rasmussen, T. G. (1999): "Sten på stranden", i; Natur og Museum.38. årg.nr. 4, ISBN 87-89137-67-1.
- Skinner, B. J., Porter, S. C. & Park J. (2004): "Dynamic Earth. An introduction to Physical Geology", Fifth Edition, John Wiley & Sons, Inc. 2004.
- Sørensen, H. (2024): "Bjergarter", i; Den Store Danske og lex.dk, <https://lex.dk/bjergarter>, besøgt 20250414

Links

- Alfred Wegener, https://lex.dk/Alfred_Wegener, besøgt 20250412
- Bjergarter, <https://lex.dk/bjergarter>, besøgt 20250414
- Mineraler, felsiske https://lex.dk/felsisk_mineral og mafiske https://lex.dk/mafisk_mineral, besøgt 20250412
- Nicolaus Steno, https://lex.dk/Niels_Stensen, besøgt 20250412
- Juniorgeologerne, <https://junior-geologerne.dk/>, besøgt 20250412
- Den Dynamiske Jord, <https://www.geus.dk/media/8085/ddj.pdf>, besøgt 20250412
- Inge Lehmann, <https://nbi.ku.dk/hhh/inge/lehmann/>, besøgt 20250412
- Latest Earthquakes, <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/map/?extent=-3.16246,-179.47266&extent=64.99794,-10.72266>, besøgt 20250412

INDKALDELSE TIL *ORDINÆR GENERALFORSAMLING* I GEOGRAFFORBUNDET 2025

Fredag d. 7. november kl. 17.15-18.30

Hotel Trinity, Gl. Færgevej 20, Snoghøj, 7000 Fredericia.

Hermed indkaldes til ordinær generalforsamling i Geografforbundet. Generalforsamlingen er Geografforbundets øverste myndighed. Der indkaldes til ordinær generalforsamling af Styrelsen med mindst 30 dages varsel. Dette år afholdes generalforsamlingen i forbindelse med Geografisk dag 2025.

Forslag, der ønskes behandlet på generalforsamlingen, skal indleveres skriftligt til formanden (lbk@geografforbundet.dk) mindst tre uger i forvejen, dvs. senest fredag d. 17. oktober 2025.

En endelig dagsorden offentliggøres på forbundets hjemmeside, senest otte dage før generalforsamlingen, sammen med det reviderede regnskab. Foreløbig dagsorden for ordinær generalforsamling:

1. Valg af dirigent
2. Valg af to referenter
3. Styrelsens beretning v. formanden, herunder delberetninger fra udvalgene
4. Beretning fra Columbusfonden til drøftelse
5. Redaktørens beretning
6. Fremlæggelse af det reviderede regnskab
7. Indkomne forslag
8. Fastlæggelse af medlemskontingentets størrelse
9. Valg af:
 - a. 4-5 styrelsesmedlemmer
 - b. To suppleanter til styrelsen
- c. To revisorer
- d. Revisorsuppleant
10. Eventuelt

Med venlig hilsen

Lars Bo Kinnerup

Forperson for Geografforbundet

Geografisk Dag

"TREKANTOMRÅDET I EN GLOBALISERET VERDEN"

– infrastruktur, transport og globalisering



Fredag den 7/11/2025

Hotel Trinity
Gl. Færgevej 20, Snoghøj
7000 Fredericia



Kl. 9.30 Velkomstkaffe

Kl.10.00 Transportsektorens udfordringer

Otto Anker Nielsen, professor i transportmodelle-ring, DTU. Institut for teknologi, ledelse og Økono-mi. Otto Anker Nielsen holder oplæg om generelle udfordringer i transportsektoren.

Strækkeben pause

Kl. 11.15 Trekantområdet

Oplæg om Trekantområdet, dets udvikling og succes bl.a. fokus på regionalgeografi, klyngedannelse og business region. Navn på oplægsholder kommer.

Kl. 12.15-13 frokost

Kl. 13.15 Bussen kører

Kl. 13.30 Fredericia Havn

Fredericia Havn er Danmarks 2. største container-havn og et vigtigt knudepunkt for infrastrukturen og håndtering af gods f.eks. containere, fast og flyden-de bulk, roll on/roll off mm. ADP, Associated Danish Port A/S, driver erhvervshavnen og Taulov Dry Port, som er Danmarks vigtigste trafikale knudepunkt for godstransport. I Taulov Dry Port mødes gods fra havnen, jernbane og motorvej. På havnen får vi et oplæg af ADP og kommer i højden, så vi kan se ud over havnen.

Kl. 14.30 Udvikling af Fredericias erhvervsliv

Fredericias erhvervsliv har gennem de sidste 10 år gennemgået en rivende udvikling. Der er stort set ingen ledige erhvervsgrunde tilbage i Fredericia og udviklingen fortsætter. Det hele startede med stiftelsen af Business Fredericia med Kristian Bendix Drejer i spidsen.

Vi skal på en faglig guidet bustur i Fredericia og omegn med eksempler på industri, transport og lo-gistik, og hører om sammenhænge mellem erhverv,

infrastruktur og internationalt samarbejde med erhvervsdirektør Kristian Bendix Drejer.

Kl. 16.00 Kaffe og kage og undervisningspotentialer

Tilbage på Trinity skal vi gennem dialog afsøge un-dervisningspotentialer om infrastruktur, transport og globalisering med afsæt i dagens oplæg og med disse spørgsmål:

- Hvad transporteres?
- Hvordan transporteres godset?
- Hvorfra og hvortil?
- Hvilke teknologier og strukturer?

Detaljeret oplæg til workshop sendes inden konfe-rencen.

Kl. 17.00 Tak for i dag

Kl. 17.15-18.30 Geografforbundets general-forsamling for medlemmer

Praktisk

Der er mange gratis p-pladser og opladere til el-biler ved Hotel Trinity.

Pris: 850 kr.

Inkl. forplejning formiddag, frokost og eftermiddag.

Tilmelding, via mail og betaling:

Mail: ida@geografforbundet.dk

Mobilepay-betaling 60 98 77

eller

Få tilsendt **EAN-faktura** ved at sende disse oplys-ninger: Firmanavn, adresse, postnummer og by, EAN-nummer, navne på deltagere.

Tilmeldingsfrist: Mandag d. 1. september 2025.

Ret til ændringer forbeholdes.

Oversigt over studieture og dagsarrangementer

Kursusudvalget April 2025

Tidspunkt	Destination	Faglig leder	Turansvarlig	Deadline
2025				
7.-8. november	Trekantområdet	Diverse foredrags- holdere	Kursusudvalget	1. september
2026				
7.- 21. februar	Sri Lanka	Ramanan Balasubramaniam	Myuran Balasubramaniam	

MÅNEDENS LINK

De Nationale Geologiske Undersøgelser for Danmark og Grønland (GEUS). Under deres portal 'udforsk geologien' findes et helt tema om 'fangst og lagring af CO₂ (CSS). Tjek det her:





Sne. En historie. Sverker Sörlin, Gads Forlag, 2025.
-352s. – 299,95 (Gads Forlag) A

Bogen er en fortælling om sneen inden i os, men også om den sne, der beskytter verden. Bogen handler om, hvad sneen engang var. Den handler om at blive blændet, når alt er stille, og ikke kan se eller høre noget, når det stormer. Det er en bog om urfolksjægere og vinterkrigere, om den sne vi leger i, og om den sne der er blodig alvor – om alpine pister, Vasaløbets spor og verdens ældste ski fundet i det nordlige Sverige. (fra bogens bagside)

Bogen præsenteres som et personligt essay og poetisk idéhistorie, og dette er for mig at se en yderst passende beskrivelse. Bogen er ikke til undervisningsbrug, men der er emner og tematikker i bogen, der sagtens kan danne afsæt til debatter og undersøgelser inden for naturvidenskabelig og naturhistorisk undervisning. Et eksempel på dette kunne være kapitlet Døden i sneen (side 255), hvor kapitlet starter med forfatterens erindringer om snedriver i skolegården, men som igennem kapitlet også berører emner som snebivuakker, der kan redde ens liv under en snestorm til opbygninger af samfund højt mod nord, hvor man forsøgte at kontrollere en barsk natur med tundra, sne, is og ikke mindst laviner. Ud-

over flere historiske beretninger om netop laviner, beskriver forfatteren også de store konsekvenser, der er ved industrialiseringen af natur, og hvor store skader det har givet på økosystemer, miljø og klima over de seneste hundrede år. Forfatteren problematiserer det at vinde økonomisk effektivitet, men på bekostning af at miste noget som har så store og vidtrækkende konsekvenser for vores fremtidige samfund og ikke mindst vores planet. Han understreger, at sne ikke længere bare er skønhed og fysik, men også er blevet etisk, teknisk og politisk. Denne vinkel kan man i min optik godt bruge med uddannelsesøjemed. Sne er ikke kun smuk, men kan også være dødelig, og hvor går grænsen mellem hvor meget sneen "skal tæmmes" for at gøre vores verden mere sikker og rigere?

Sverker Sörlin er forfatter og idéhistoriker, og bliver kaldt en af Sveriges fremmeste folkeoplysere. Han er ansat som professor i miljøhistorie ved Kungliga Tekniska Högskolan i Stockholm. Lige præcis den blanding af folkeoplysning med et let forståeligt sprog og en enorm stor viden inden for miljøhistorie gør, at jeg som læser bliver grebet både af Sverker Sörlins personlige historier og erindringer, men også af den historiske kontekst som disse erindringer fører til. Bagerst i bogen – fra side 317 og frem – ses udvalgte henvisninger til hvert kapitel samt et personregister. Dette er helt sikkert noget, som jeg vil se nærmere på, for bogen har i den grad givet mig lyst til at fordybe mig mere i nogle af tekster og emner, som bogen så flot får flettet ind i selve fortællingen om sne.

Christina Helga Rønholt Lodbro
Lærer med linjefag i dansk, engelsk, historie og geografi.

HER ER DIN STYRELSE



Lars Bo Kinnerup

Forperson for geografforbundet, forlagsbestyrelsen, fagudvalget, kontakt til Nationalkomiteen for Geografi
Lektor på læreruddannelsen
lbk@geografforbundet.dk



Iben Dalgaard

Næstforperson for geografforbundet, forperson kursusudvalget. Pensioneret naturfagskonsulent,
ida@geografforbundet.dk



Jens Korsbæk

Kasserer og forperson for GO Forlags bestyrelse
Cand scient.
jkj@geografforbundet.dk



Kristian Nordholm

Fagudvalget, Uddannelseskonsulent.
Cand. scient i geografi.
kn@geografforbundet.dk



Mikkel Strange

Fagudvalget, lærer
ms@geografforbundet.dk



Myuran Balasubramaniam

Kursusudvalget, forlagsbestyrelsen, lærer
mb@geografforbundet.dk



Susanne Rasmussen

Forlagsbestyrelsen, fagudvalget, lærer
sur@geografforbundet.dk



Mette Starch Truelsen

Suppleant
mst@geografforbundet.dk



Lise Rosenberg

Suppleant
lr@geografforbundet.dk



Gør verden levende

GO Atlas Portal 1-10

Nyhed

Med det nye GO Atlas får du en digital læringsportal, der gør kort til mere end bare noget, man kigger på – de bliver et aktivt redskab til at forstå verden. Portalen fås både til indskolingen, mellemtrinnet og udskolingen.

GO Atlas gør eleverne til aktive opdagelsesrejsende i geografens verden – perfekt til differentieret undervisning og undersøgende læring.

Portalen er fyldt med interaktive kort, cases og opgaver, der gør undervisningen levende.

kort, data og cases til en undersøgende undervisning

- **Verdensdele og lande** – Få fakta og kort over alle verdens lande.
- **Temakort** – Se temakort, der viser alt fra befolkningstæthed til klimadata.
- **Kortlære** – Lær om korttyper, projektioner og navigation.
- **Opgaver og cases** – Eleverne arbejder undersøgende med virkelige problemstillinger.
- **Quizzer og selvrettende opgaver** – Test viden om storbyer, kontinenter og kortlæsning.
- **Lav dine egne kort** – Indsæt egne data og visualiser resultater.
- **Historiske Danmarkskort** – Se, hvordan byer og landskaber har ændret sig
- **Klimastationer og befolkningspyramider** – Undersøg globale mønstre og udvikling.



Se portalen på goatlas.dk