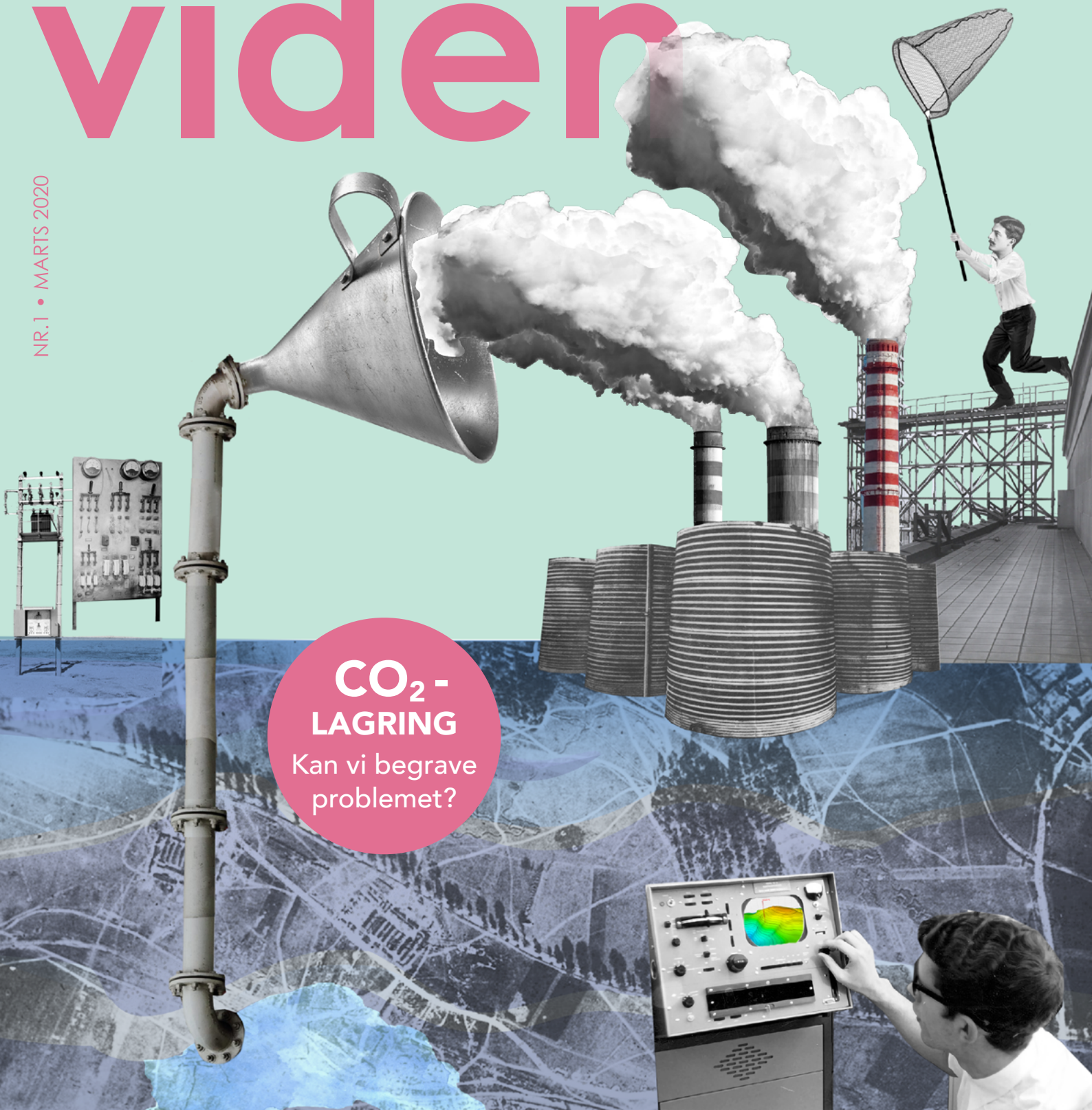


geo vider

NR.1 • MARTS 2020



CO₂- LAGRING

Kan vi begrave
problemet?

500 års CO₂

Lagerkapacitet i
Danmarks undergrund **10**

Flugtsikring

CO₂ forsejler
sig selv i dybet **14**

Sikkerhedstjek

Kan CO₂-lagring
være skadeligt? **26**

CO₂-lagring

Al viden er god viden og sorte data kan blive grønne.

Op gennem forrige århundrede blev den danske undergrund gennemsvøgt godt og grundigt for olie- og gasforekomster. Udover en snes områder i Nordsøen, slog det alt sammen fejl. De kostbare eftersøgningsboringer viste, at den undergrund, der gemmer sig under landjorden, kun indeholdt vand. De texanske tilstande udeblev og dengang var skuffelsen stor. Siden da er folkestemningen omkring olie vendt 180 grader. Den hastigt stigende koncentration af drivhusgasen CO₂ i vores atmosfære er nemlig direkte koblet til det sorte guld og dets fætre kul og gas, som næsten alle ver-


dens lande stadig er afhængige af. Om vi vil det eller ej. Der er imidlertid næsten ikke den ting, der er så skidt, at den ikke er god for noget. Det samme er sandt med eftersøgningen på olie i Danmark. De mange boringer og geologiske analyser af undergrundens sammenstæning og lagenes udbredelse og form danner nemlig grundlag for mulige klimaløsninger. Blandt andet permanent lagring af CO₂ i undergrunden, som er det, dette Geoviden handler om. Såkaldt Carbon Capture and Storage (CCS).

Mange af de geologiske strukturer og egenskaber, man kigger efter, når man leder efter olie og gas, er nemlig de samme, som man skal bruge i et underjordisk CO₂-lager. Derfor foreligger

der store mængder geologiske kortlægninger og data på netop de områder, som forskere i CO₂-lagring kan dykke direkte ned i og bruge til at modarbejde de klimaforandringer, som olie, gas og kul har fået os rodet ud i. Havde det ikke været for olieeftersøgningen, ville muligheden for lagring af CO₂ være mange år ude i fremtiden, i stedet for at være den velafprøvede og etablerede teknologi, som den er flere steder i verden i dag. Gammel viden rustet ikke, men måden den bruges på kan ændre sig. Og det er godt.

I dette nummer af Geoviden kan du læse om, hvordan CO₂ kan lagres i undergrunden og hvor meget der ser ud til at kunne lagres i Danmark og i verden. Du kan også læse

om de geologiske kriterier, der skal være opfyldt, før man kan etablere et CO₂-lager, samt hvordan forsøg har vist, at CO₂ faktisk selv lukker sprækkerne, hvis de skulle opstå nede i reservoiret. Er du interesseret i, hvordan CO₂-niveauerne har svinget gennem Jordens historie, og hvad det betyder for klimaet, kan du også blive klog på det.

Husk, at du altid kan skrive til os med feedback eller ideer på geoviden@geus.dk 

God læselyst!



Johanne Uhrenholt
Kunitzoff
Redaktør og skribent

Find mere på geoviden.dk/co2lagring:

- Film om laboratorieforsøg med CO₂-lagring
- Forklaring af nøglebegreber
- Alle figurer og artikler til download i enkeltfiler
- Link til globale og nationale CO₂-statistikker og infografikker
- Videre læsning



Se filmen om, hvordan forskere arbejder med CO₂-lagring i laboratoriet på geoviden.dk/co2lagring

Ekspertter der har bidraget til dette Geoviden



Christian Bjerrum
Professor MSO
Københavns Universitet



Hanne Dahl Holmslykke
Forsker
GEUS



Claus Kjøller
Statsgeolog
GEUS



Knud Didriksen
Seniorforsker
GEUS



Karen Lyng Anthonsen
Geolog
GEUS



Peter Frykman
Seniorforsker
GEUS



Carsten Møller Nielsen
Reservoiringeniør
GEUS



Med CO₂ hjælper det at begrave problemet

4

I undergrunden venter der CO₂ fire forskellige skæbner

7

Danmarks undergrund kan lagre 500 års CO₂-udledning

10

CO₂ forsejler selv mulige flugtveje fra undergrunden

14

Nordjysk undergrund kan lagre en mio. ton virtuel CO₂ om året

18

Global lagerstatus

22

Hvordan står det til med CCS globalt?

24

"De fossile brændslers eksistens beviser, at undergrunden kan opbevare CO₂ i millioner af år"

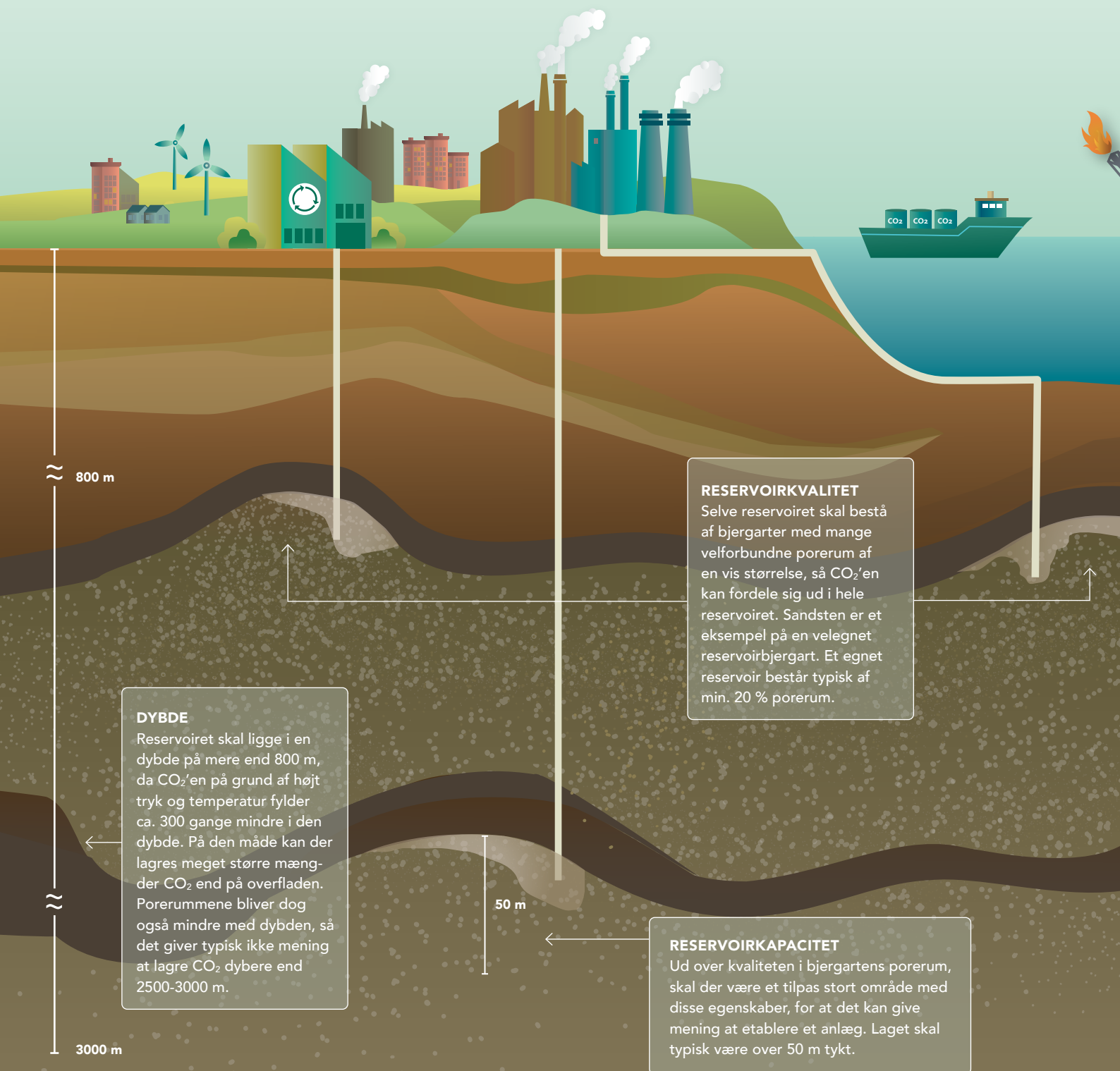
26

Kend dit CO₂-kredsløb

28

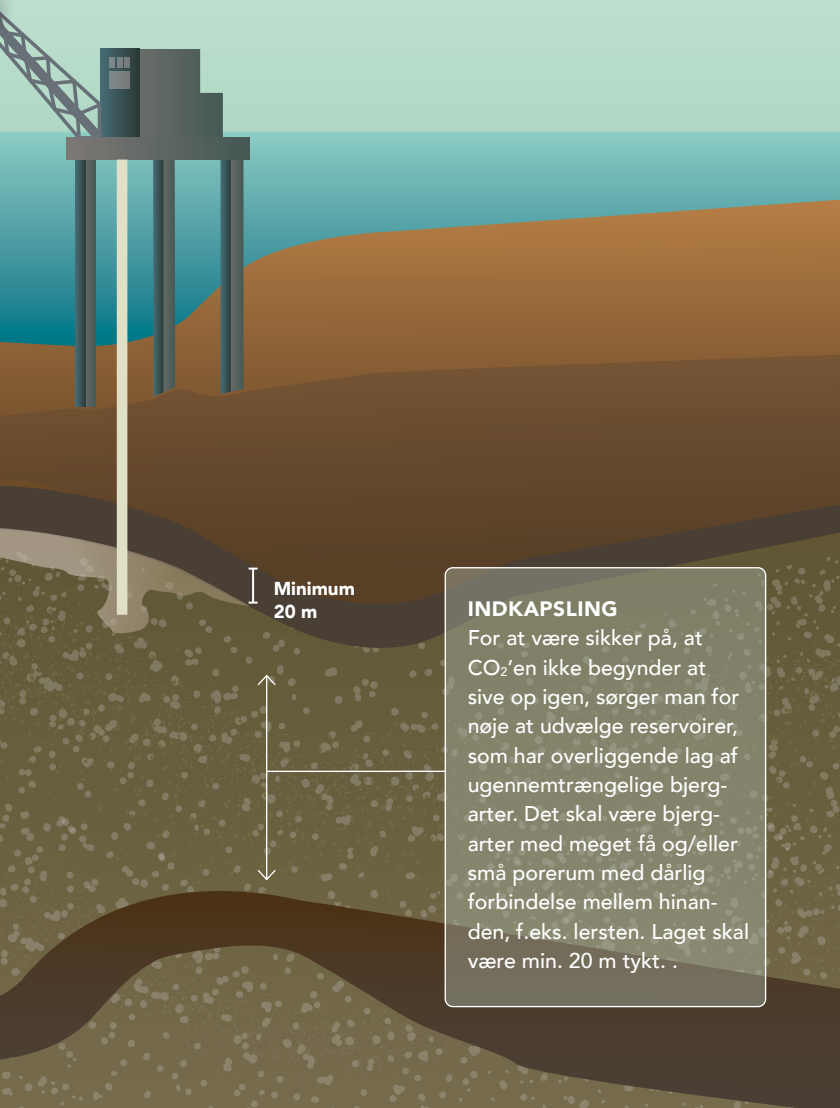


Med CO₂ hjælper det at begrave problemet



Figur 1

Menneskeskabt udledning af CO₂ til atmosfæren skaber problemer, så en mulig løsning må være at udlede mindre og gerne fjerne CO₂. En måde at gøre det på kaldes Carbon Capture and Storage (CCS) eller CO₂-fangst og -lagring. Se grundprincipperne her.



HVORDAN FUNGERER CCS?

Helt forsimplet kan processen opsummeres i tre trin, som starter ved CO₂-kilden og ender i jorden.

CO₂ indfanges fra CO₂-kilder som industri eller energiproduktion.



Gassen komprimeres og transporteres via rørledning til et egnet reservoir.



CO₂ pumpes ned i reservoiret, indtil det er fyldt og brønden forsegles.



LAGRING I OLIE-GASFELTER

Generelt siger man, at CO₂-lagret skal ligge tæt på CO₂-kilden, da det mindsker transportomkostninger. Dog kan det give mening at bruge udtømte olie-gasfelter, hvor dyre borer, pumper og andet nødvendigt materiel allerede er på plads og måske kan bruges. Transporten sker da med skib eller rørledning inde fra land.

6 FAKTA OM CCS

Her kan du dykke ned i detaljerne omkring Carbon Capture and Storage (CCS). Eksempelvis hvorfor CO₂ fylder mindre i undergrunden, og hvordan koblingen mellem CCS og biomasse gør teknologien endnu grønnere.



CO₂ FANGES PÅ TRE MÅDER

- **Røggasrensning:** Røggassen sendes gennem en tank med en væske, der binder CO₂, mens resten af røgen ledes videre som vanddamp. Væsken med den fangne CO₂ opvarmes og frigiver ren CO₂.
- **Forgasning:** Anvendes ved afbrænding af kul, hvor kullet opvarmes ved meget høj temperatur sammen med ren ilt. Ved tilsætning af vanddamp opstår en gas af brint og CO₂, som kan deles op, og CO₂'en lagres.
- **Oxyfuel:** Bruges også ved kulafbrænding. Ud over tilsætning af ren ilt til forbrændingen bruges også recirkuleret røggas. Det gør bl.a., at luften i ovnen ikke indeholder den nitrogen, som findes i atmosfærisk luft. Det gør det lettere at adskille CO₂'en.

Fælles for dem alle er, at de kræver meget energi til bl.a. opvarmning, som gør prisen pr. ton opfanget CO₂ høj. Der forskes på højtryk verden over for at udvikle energieffektive løsninger, så energiforbrug og pris mindskes. Prisen er allerede faldet i de seneste år.



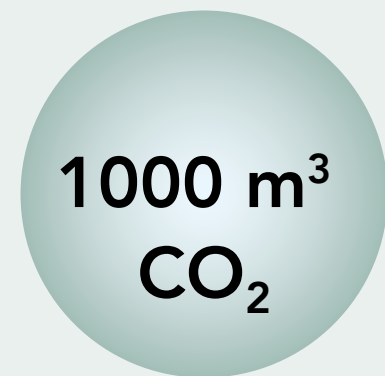
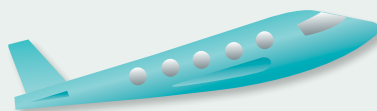
FJERNELSE AF CO₂

Ved at indfange CO₂ fra biomasseanlæg får man fjernet CO₂ fra atmosfæren frem for blot at undgå at udlede mere. Biomasse fra planter har nemlig optaget CO₂ gennem fotosyntese. Når biomassen omdannes til biobrændsel, frigives CO₂'en som røggas, der kan indfanges og lagres. Her ved fjernes CO₂ fra atmosfæren samtidig med, at der dannes grøn energi. Metoden kaldes BioEnergy CCS (BECCS).

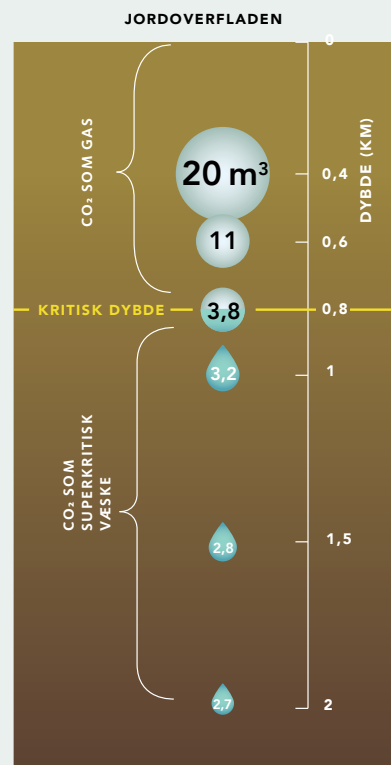
Derudover findes der anlæg, der suger CO₂ direkte ud af luften, hvilket kaldes Direct Air Capture (DAC).

GRØNT FLYBRÆNDSTOF

CO₂ bruges som ressource i flere industrier, og også i forsøg med udvikling af bæredygtigt brændstof, herunder flybrændstof. Her kan en del af den fangne CO₂ fra CCS udnyttes fremfor at blive gemt af vejen. Det er et aktivt forskningsfelt.



Figur 2



Redigeret efter CO₂GeoNet-rapport 2008. Hvad betyder geologisk lagring af CO₂ egentlig s. 9

DER KAN LAGRES MERE I DYBDEN

Opsamles der 1000 m³ CO₂ fra et kraftværk på jordoverfladen, fylder det kun 3,8 m³, når man pumper det 800 meter ned i undergrunden. Ved 1,5 km endda kun 2,8 m³. Ved ca. 800 meter opnås nemlig det såkaldte kritiske punkt for CO₂-gas, hvor tryk og temperatur er så høj, at gassen skifter form til en såkaldt superkritisk væske. På den form er CO₂'en meget mere kompakt end i gastilstanden, har tyngde som en væske, men kan bevæge sig som en gas. Alle gasser har et kritisk punkt, hvor de skifter til superkritisk form. Under to km. komprimeres CO₂'en ikke yderligere.

260 MILLIONER TONS CO₂

er hidtil lagret på verdensplan. Det svarer til Danmarks samlede udledning på nuværende niveau i ca. syv år.

Illustration: Lykke Sandal, Geovidén

Læs meget mere om sandsten, porøsitet og permeabilitet i Geoviden 1, 2019 om geotermi, som også foregår mellem sandkornene i den dybe undergrund.



+ Find hele bladet på geoviden.dk/geotermi



Foto: Stig Asbjørn Schack Pedersen, GEUS

I undergrunden venter der CO₂ fire forskellige skæbner

Lagring kræver lagerplads, og det er der helt enormt meget af i undergrunden. Hulrummene er bittesmå, men til gengæld er der fantastisk mange af dem mellem mineralkornene i de forskellige bjergarter. CO₂-lagring udnytter, at CO₂ fastholdes i de hulrum på flere forskellige måder.

Under grundvandsspejlet er stort set alle hulrum fyldt med vand. Lidt som hvis man forestiller sig en forstenet badesvamp under vand. Ligesom i en badesvamp er alle disse bittesmå vandfyldte hulrum, kaldet porerum, forbundet med hinanden på kryds og tværs. Derfor kan vand strømme igennem de underjordiske bjergarter fra porerum til porerum. Det samme gælder for gasser, for eksempel CO₂. De underjordiske formationer, der typisk vil kunne bruges til CO₂-lager, udgør til tider tykke lag og kan dække flere hundrede kvadratkilometer. Det giver en meget stor, samlet lagringskapacitet for CO₂.

Porøse bjergarter

Der er stor forskel på porerummene i de forskellige bjergarter, man finder i undergrunden, herunder hvor mange og hvor store de er. Altså hvor stor en

andel af bjergartens samlede volumen de udgør (porøsitet). Derudover kan det også variere, hvor godt forbundne de er med hinanden (permeabilitet). Sandsten er en af de bjergarter, der ofte både er porøse og permeable i en sådan grad, at væsker og gasser har let ved at strømme igennem dem. Det gør sandsten til en god såkaldt reservoirbjergart, altså en type sten, der kan indeholde for eksempel CO₂ på den måde, som kan ses på s. 4 og 5. De gode lagringsegenskaber har deres udspring i den måde sandstenen er dannet på. Sandsten er, som navnet antyder, lavet af sand. De individuelle sandkorn består ofte af mineralet kvarts og har i sin tid været en del af et bjerg eller klippe et sted. Vind og vejr slider hele tiden små stykker af, som siden føres med floder, gletsjere eller med vinden. Der hvor floden løber, vil noget af sandet synke ned til bunden og med tiden blive



Foto: Colourbox

OLIE I STEDET FOR VAND

I nogle områder af undergrunden er der ikke vand i porerummene, men fossile brændstoffer. Det er områder, hvor der for millioner af år siden er tilført mere dødt organisk materiale, end bakterier og svampe har kunnet nå at nedbryde. Det unedbrudte materiale er med tiden blevet begravet dybere og dybere, og er undervejs blevet omdannet til olie, gas eller kul.

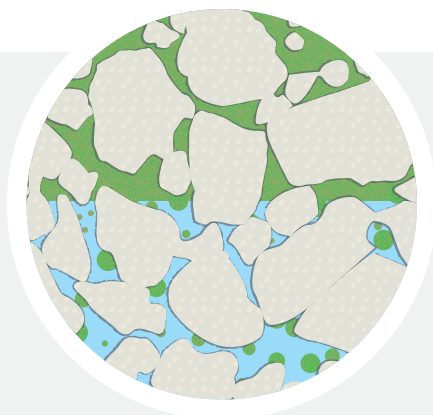
+ Læs meget mere om, hvordan fossile brændsler dannes i Geoviden 1, 2013 på geoviden.dk

DE FIRE SKÆBNER

for CO₂ i et underjordisk reservoir

Sandsten
 Vand
 CO₂
 Rester af CO₂
 CO₂ opløst i vand
 Mineralisering

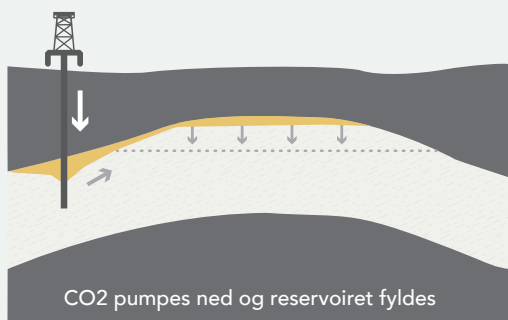
1



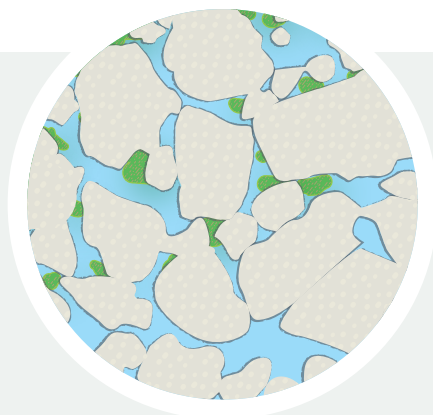
MOBIL FORM

Når CO₂ pumpes ned i et underjordisk sandstenslag, vil det begynde at stige opad, fordi det er lettere end det saltvand, der ligger mellem sandkornene. CO₂'en stiger opad gennem porerummene, indtil den når det forseglende lag af f.eks.

lersten, hvor den begynder at samle sig og fortrænge vandet oppefra og ned, indtil nedpumpningen stoppes (se konceptuel tegning herover, samt figur herunder). Reservoiret kan altså ses som en omvendt skål, der fyldes til kanten med CO₂.



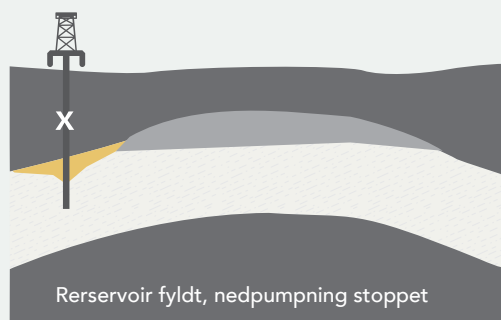
2



FANGET I SMÅ PORER

Nogle porerum er så små og snævre, at CO₂-boblerne ikke kan komme igennem og ender i en blindgyde. På vej mod reservoirets top, bliver en del af CO₂'en fanget på den måde. Når der ikke længere pumpes ny CO₂ ned, vil der i området omkring røret med tiden kun være den CO₂ tilbage, som sidder fanget

(se gult område herunder). Resten har samlet sig i toppen (lysegråt område). Hvor meget CO₂, der demobiliseres i små porerum, afhænger af reservoirbjergartens egenskaber. Nogle områder i reservoiret har måske mindre porerum end andre, så her vil mere CO₂ blive hængende tilbage.



begravet under nye lag af sand. Det samme sker i fjordene og langs kysterne – sandet hobes lige så stille op. Over mange tusinde år bliver det til mange meter sand.

Når havniveauet har ændret sig gennem tiderne, er kystlinjerne samtidig rykket frem eller tilbage, og så er der blevet aflejret sand et nyt sted. Der, hvor der før var kyst og blev aflejret sand, er der måske i stedet blevet dybere vand, hvor

der er mindre strøm og mindre bølgepåvirkning. Her vil der så typisk aflejres langt flere finkornede partikler, for eksempel ler, som også efterhånden danner et tykkere og tykkere lag. Efter lang tid er det gamle sandlag blevet dækket af et overliggende lag af ler, og begge dele er begravet så dybt af nytilkomne aflejringer, at det er blevet mast sammen til fast sten. Henholdsvis sandsten og lersten. Både sandstenen og lerstenen har porerum, men i lerstenen er de så små,

at det næsten er umuligt for noget at trænge igennem. Da sandkorn er meget større end lerpartikler, vil porerummene i sandstenen være tilsvarende større, og det gør sandstenen lettere for væsker og gasser at strømme igennem.

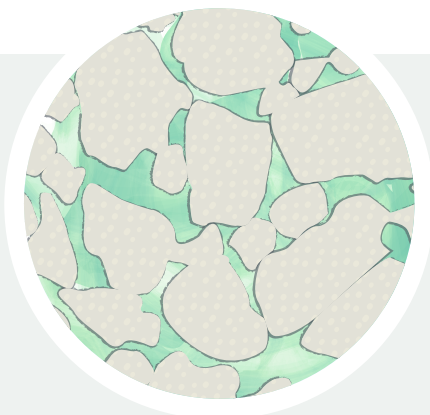
Til CO₂-lagring leder man efter netop kombinationen af et porøst og permeabelt sandstenslag med et eller flere isolerende lerstenslag ovenpå. Den porøse og permeable sandsten er idel til

Mød forskeren, der undersøger, hvordan CO₂'en bevæger sig i undergrunden.



+ Find video på geoviden.dk/co2lagring

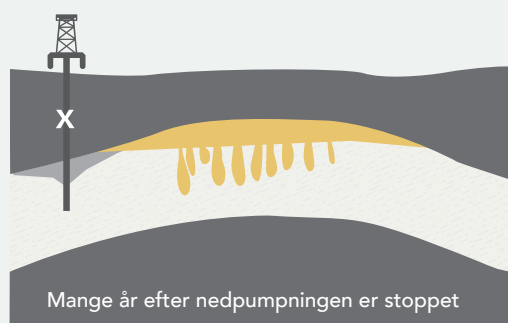
3



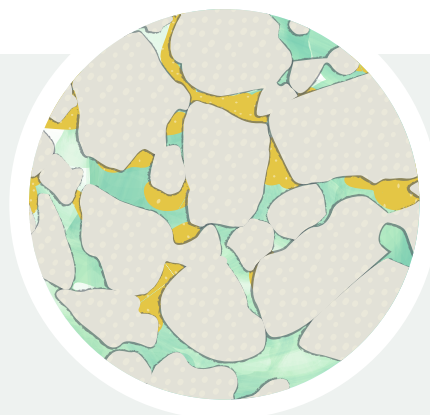
OPLØST

Nede i reservoiret møder CO₂'en med det samme vandet i porerummene, og en del CO₂ vil blive opløst i vandet. Vand har dog en begrænset kapacitet til opløsning af CO₂, men fordi det opløste CO₂ gør vandet en smule tungere, synker det langsomt mod bunden af reservoiret (se gult område herunder). Det giver

hele tiden plads til lidt nyt saltvand i toppen, som kan komme i kontakt med den ophobede CO₂, som også opløses og synker mod bunden og så fremdeles. Processen tager dog meget lang tid, da det CO₂-holdige, tungere vand bevæger sig meget langsomt nedad gennem de små, snævre porerum.



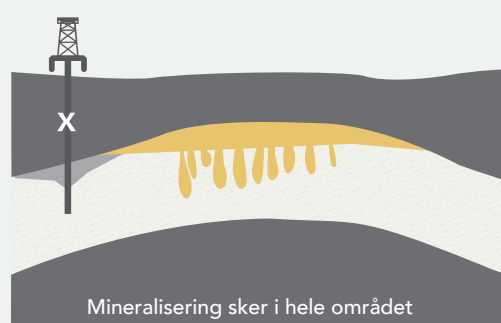
4



MINERALISERET

Den opløste CO₂ kan reagere med visse mineraler i reservoirbjergarten, så der dannes nye mineraler. På den måde bliver en del af CO₂'en med tiden til en fast del af reservoiret. Processen kan foregå i alle de områder af reservoiret, hvor CO₂'en findes i opløst form (se gult område

herunder). Hvor hurtigt det går, og præcis hvilke mineraler der dannes, er afhængigt af bjergartens mineralske sammensætning, vandets saltindhold og pH. I sandsten er mineralisering den absolut langsomste af de fire processer og foregår hundreder eller tusinder af år.



Figur 3

Illustration: Lykke Sandal, Geoviden

Illustration: Lykke Sandal, Geoviden, redigeret efter: Geologisk Tidsskrift 2009 s. 6

lagring af gas som CO₂, og modsat sikrer lerstens lave porøsitet og permeabilitet, at CO₂'en ikke stiger op.

Fire forskellige lagringsmåder

Når et passende reservoir er udvalgt, undersøgt og testet, kan CO₂'en pumpes derned. Det er ren, komprimeret CO₂, der pumpes ned, men nede i reservoirets porerum vil den indgå i flere forskellige processer (se figur 3 herover). Meget af den vil relativt hurtigt blive opløst i

porevandet på samme måde som CO₂ findes i en uåbnet cola. Noget CO₂ kan over meget lang tid reagere med ustabile mineraler i sandstenen eller lerstenen og indgå i nye mineraler der afsættes i porerummene.

Afhængigt af reservoirbjergartens sammensætning af mineraler og reservoirets øvrige egenskaber vil det være forskelligt, hvor meget af CO₂'en der bliver lagret på de forskellige former, og hvor

hurtigt. Det er kun ved akkumulering, at CO₂'en er mobil og kan bevæge sig opad mod overfladen, og den skal derfor holdes tilbage af et overliggende lag af tæt lersten. De øvrige tre processer fastholder selv CO₂'en i reservoiret. Over tid vil mere og mere CO₂ undergå de tre stabiliserende processer, og derfor bliver lagringen endnu mere fast med tiden.



DANMARKS UNDERGRUND kan lagre 500 års CO₂-udledning

Det er ikke plads, der mangler i den danske undergrund, når det gælder lagring af den CO₂, samfundet udleder. Hvordan man kan regne sig frem til det, kan du læse her.

Dybt under den danske muld er der plads til at opbevare al den CO₂, det danske samfund nogensinde har udledt. Og mere til. Meget mere faktisk. Beregninger viser at der er plads til mere end 500 års udledning på det nuværende niveau, som er omkring 35 mio. ton (Mt) CO₂ årligt.

Karen Lyng Anthonen er en af dem, der har stået for at

lave beregningen. Hun er geolog med speciale i sedimentologi hos De Nationale Geologiske Undersøgelser for Danmark og Grønland (GEUS). Som led i et stort EU-projekt var hun og en række kolleger fra GEUS i løbet af 00'erne med til at screene hele EU, herunder Danmark, for egnede områder til CO₂-lagring. Samtidig udregnede de estimater for,

hvor meget CO₂ de udvalgte områder i Danmark vil kunne indeholde.

“På den måde tog vi de indledende skridt på vejen til at se, om det overhovedet gav mening at arbejde med at lave CO₂-lagre i Danmarks undergrund. Det viste vores undersøgelse, at det i høj grad gjorde,” siger Karen Lyng Anthonen.

Dansk sandsten

Den danske undergrund er faktisk en af dem, der egner sig bedst i hele Europa. Der er nemlig udbredte sandstenslag i den danske under-

grund, som har et overliggende lerstenslag, og flere steder buler lagene op. Lige efter forskrifterne for et CO₂-lager.

“Vi identificerede i hvert fald ti af den slags områder, der ser ud til at kunne egne sig som CO₂-lagre. Siden har vi også estimeret en god kapacitet i en række områ-

Danmarks samlede CO₂-udledning var i 2018 på omkring 35 mio. ton (Mt). Cirka 10 Mt stammer fra de 15 store punktkilder, som kan ses på næste side.

SEISMISK UNDERSØGELSE

Ved at sende kraftige trykbølger ned i jorden med store stempler kan man med en række følsomme mikrofoner opfange de bølger, der kastes tilbage fra undergrunden. Da forskellige bjergarter kaster bølgerne forskelligt tilbage, dannes der et billede af lagene i undergrunden.

der i Syddanmark, i udtømte olie-gasfelter i Nordsøen, samt et stort område i Skagerrak. Til sammen kan de områder lagre omkring 22.000 Mt CO₂," fortæller hun. (Se kortet på næste side.)

Udregning af kapacitet

Man kan regne sig frem til, hvor meget CO₂, der bør kunne være i et område ved at estimere, hvor mange kubikmeter, der cirka er, og hvor stor en del af det område, der er hulrum mellem sandkornene. Typisk viser det sig dog i praksis ikke at være muligt at udnytte samtlige af de små hulrum i strukturen.

Det har blandt andet vist sig i underjordiske naturgaslagre rundt om i verden, som opbevarer naturgas, indtil der er brug for den. Det foregår nemlig mange steder i underjordiske sandstensreservoir, fuldstændig som man kan gøre det med CO₂. Her har man kunnet udnytte omkring 80 procent af hulrummene til gaslagring. Da man lagrer CO₂ efter samme principper som naturgas, har Karen Lyng Anthonsen antaget, at nogenlunde samme udnyttelsesgrad også må gælde her.

"For at være på den sikre side og ikke love for meget har vi dog antaget, at de ti

områder i hvert fald er halvt så gode som naturgaslagre. Derfor har vi brugt 40 procent som lagringseffektiviteten i kapacitetsberegningerne," forklarer hun.

"Nogle af sandstenslagene vil uden tvivl vise sig at kunne fyldes mere end 40 procent, men der er måske også nogle, som kan fyldes mindre. Derfor er det det sikreste at gå ud fra et middelestimat."

Forskning på vågeblus

I 2011 blev planerne for CO₂-lagring i Danmark dog bremset, da man fra politisk hold gerne ville vente og se, hvordan det gik i andre lande først. Det blev også besluttet, at spørgsmålet om CO₂-lagring tidligst kunne tages op igen i 2020.

"Efter 2011 var der derfor ikke stor interesse for forskning i CO₂-lagring herhjemme. Men vi har nu ikke ligget stille af den grund," fortæller Karen Lyng Anthonsen.

” Vi identificerede i hvert fald ti af den slags områder, der ser ud til at kunne egne sig som CO₂-lager.

"I og med at vi i GEUS har været en stor spiller i europæisk sammenhæng på området op gennem 00'erne, er vi blevet inviteret med til en del større og mindre projekter om CO₂-lagring fra udlandet. Her har vi selvfølgelig været med og bidraget med de data og den ekspertise, vi nu engang har opbygget."

Siden da er klima rykket højere og højere op på dagsordenen samtidig med, at FN's klimapanel IPCC gentagne gange har peget på, at fjernelse af CO₂ fra atmosfæren og lagring i undergrunden er en

nødvendig teknologi, der bør udnyttes globalt.

"I 2020 har staten således afsat 15 mio. kr. til forskning i CO₂-lagring i Danmark. Så nu skal vi i gang igen, og have opdateret screeningen af de mulige danske CO₂-lagringsområder med de nye data, vi har fået siden dengang," fortæller Karen Lyng Anthonsen.

Skal udpege to områder

Noget af det, forskerne skal bruge tiden på i løbet af 2020, er blandt andet at gennemgå gamle seismiske data fra screeningsområderne. Med nye computerprogrammer kan man nemlig gentolke dem og få endnu mere præcise oplysninger om, hvor der er forkastninger, og hvordan sandstens- og lerstenslagene forløber i forhold til hinanden.

Herefter kan man lave opdaterede modeller af undergrunden og mere præcise beregninger af lagringskapaciteten de enkelte steder.

Derudover skal der senere formentlig laves en række nye seismiske undersøgelser på de steder, der viser sig at være særligt interessante, fortæller Karen Lyng Anthonsen.

"Vi håber nemlig, at vi i løbet af et eller to år kan pege på i hvert fald to områder i Danmark, hvor det vil give mening at gå videre med CO₂-lagring, hvis det bliver aktuelt."

Efter planen skal Folketinget tage stilling til CO₂-lagringens fremtid i Danmark i 2020.



MØD EKSPERTEN

Navn:
Karen Lyng Anthonsen

Stilling/arbejdsplads:
Geolog ved De Nationale Geologiske Undersøgelser for Danmark og Grønland (GEUS).

Uddannelse: Cand. Scient. i Geologi, samt HD-enkeltfag i Organisation og Projektledelse.




Arbejder med: Primært CO₂-lagring og projektledelse. Jeg bruger meget GIS (Geografisk Informations System) i mit arbejde, som er et stærkt værktøj til ressourcekortlægning, f.eks. af hvor de bedst egnede områder for lagring af CO₂ findes.

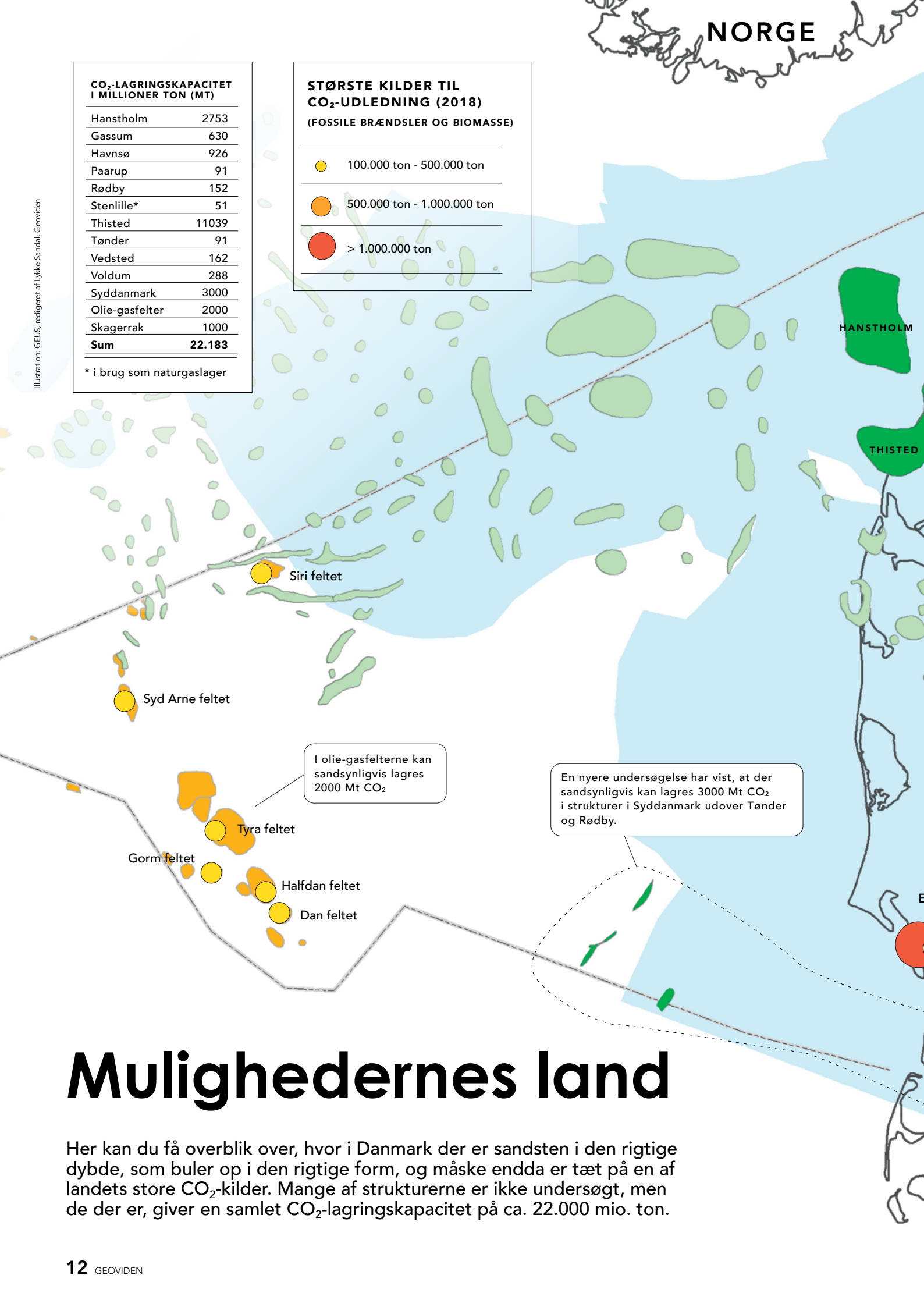
Jeg valgte den karriere, fordi: Jeg så et klip på TV om, hvordan dinosaurerne muligvis uddøde som følge af et stort meteoritnedslag. Jeg syntes, det var fantastisk spændende, at der var nogen, som forskede i, hvad der skete på Jorden for mange millioner år siden, og hvordan vores klode har forandret sig fra den, blev dannet for ca. 4,5 mia. år siden og frem til nu.

Mit arbejde er særligt spændende, når: Al min viden bliver bragt i spil, når man får spændende projektresultater, der giver ny viden og ideer til nye projekter, og når man arbejder sammen med et hold af rigtig gode kolleger, både ved GEUS og ude i verden.

CO ₂ -LAGRINGSKAPACITET I MILLIONER TON (MT)	
Hanstholm	2753
Gassum	630
Havnsø	926
Paarup	91
Rødby	152
Stenlille*	51
Thisted	11039
Tønder	91
Vedsted	162
Voldum	288
Syddanmark	3000
Olie-gasfelter	2000
Skagerrak	1000
Sum	22.183

* i brug som naturgaslager

STØRSTE KILDER TIL CO ₂ -UDLEDNING (2018) (FOSSILE BRÆNDSLER OG BIOMASSE)	
	100.000 ton - 500.000 ton
	500.000 ton - 1.000.000 ton
	> 1.000.000 ton



I olie-gasfelterne kan sandsynligvis lagres 2000 Mt CO₂

En nyere undersøgelse har vist, at der sandsynligvis kan lagres 3000 Mt CO₂ i strukturer i Syddanmark udover Tønder og Rødby.

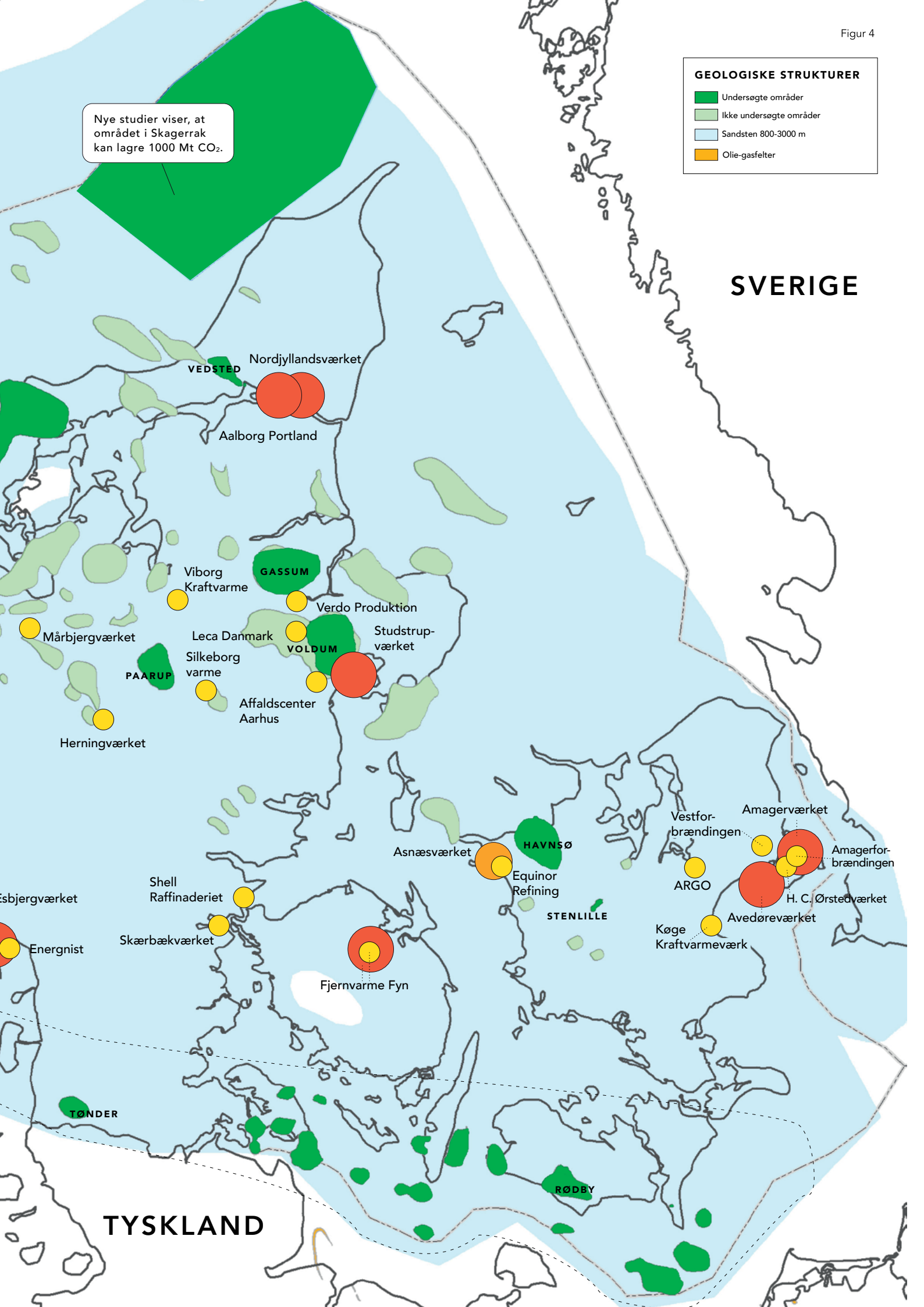
Mulighedernes land

Her kan du få overblik over, hvor i Danmark der er sandsten i den rigtige dybde, som buler op i den rigtige form, og måske endda er tæt på en af landets store CO₂-kilder. Mange af strukturerne er ikke undersøgt, men de der er, giver en samlet CO₂-lagringskapacitet på ca. 22.000 mio. ton.

GEOLOGISKE STRUKTURER

- Undersøgte områder
- Ikke undersøgte områder
- Sandsten 800-3000 m
- Olie-gasfelter

Nye studier viser, at området i Skagerrak kan lagre 1000 Mt CO₂.



SVERIGE

TYSKLAND

Nordjyllandsværket

VEDSTED

Aalborg Portland

Viborg Kraftvarme

GASSUM

Verdo Produktion

Studstrupværket

Leca Danmark

Silkeborg varme

VOLDUM

Affaldscenter Aarhus

Mårbjergværket

PAARUP

Herningværket

Asnæsværket

HAVNSØ

Equinor Refining

STENLILLE

Vestforbrændingen

Amagerværket

Amagerforbrændingen

H. C. Ørstedværket

Avedøreværket

Køge Kraftvarmeværk

ARGO

Shell Raffinaderiet

Skærbækværket

Fjernvarme Fyn

TØNDER

RØDBY

Esbjergværket

Energist

CO₂ forsegler selv mulige flugtveje fra undergrunden

Når man bruger mange millioner kroner på at fange CO₂ og pumpe den ned i undergrunden, vil man gerne være sikker på, at den bliver der. Heldigvis yder CO₂'en selv den garanti et langt stykke af vejen.

På et kontor i København står en computerskærm, der viser to billeder af en cylinder. Den ene med mange røde plamager, og den anden med færre røde plamager (figur 6). Det ligner et udsnit fra et gerningssted. Heldigvis viser billederne noget langt mere fredeligt, fortæller ejermanen af kontor og

computerskærm, statsgeolog og geokemiker Claus Kjøller fra De Nationale Geologiske Undersøgelser for Danmark og Grønland (GEUS).

”De røde områder er hulrum og revner i en cementkerne før og efter, vi har ført CO₂ igennem den. Billedet viser, at CO₂'en har reageret med

cementen med det resultat, at revnerne er fyldt ud.”

Det er ham, der sammen med den norske Stiftelse for Industriel og Teknisk Forskning (SINTEF) har lavet forsøget, som billederne er et resultat af. Det gik ud på at støbe små cementpropper ind i en kappe af sandsten og scanne

dem i en særlig CT-scanner før og efter at have pumpet CO₂ igennem. Og hvorfor nu al den snak om cement, kan man spørge. Fordi de rør, der sender CO₂ ned i et underjordisk CO₂-lager, er et af de steder, hvor der kan være risiko for, at CO₂'en siver op og ud (figur 5). Derfor fylder man cement udenom røret, som også i sig selv er pakket ind i flere isolerende lag.

Dog er det en kendt sag, at cementen i sådan nogle borehuller godt kan få små revner

”

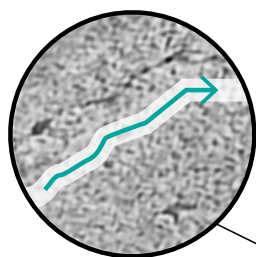
Calcitten sætter sig i de revner og sprækker, der eventuelt opstår, så de bliver lukket.



Foto: Lykke Sandal, Geoviden

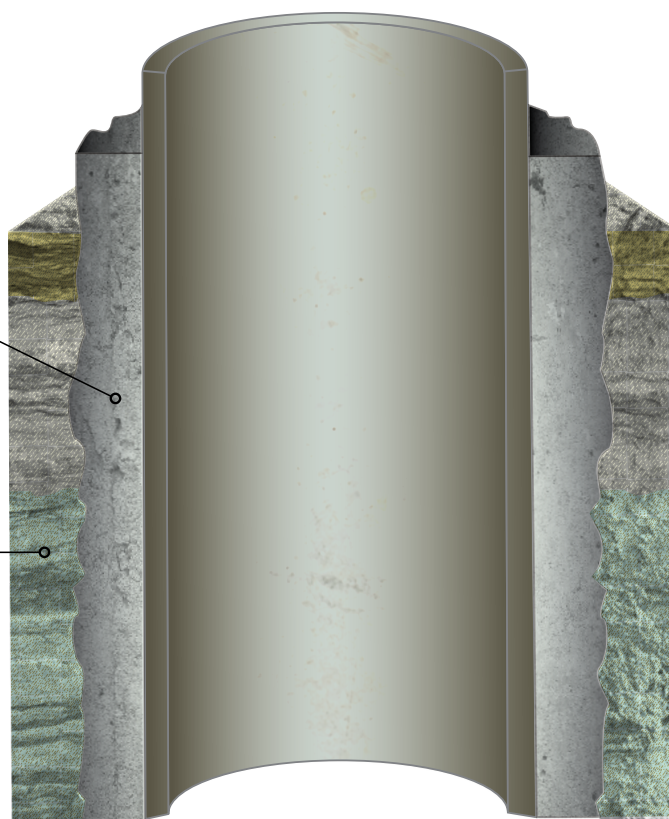


FORSIMPLET TVÆRSNIT AF CO₂-RØR MED CEMENTFORING



Små rystelser og sætninger i undergrunden kan skabe revner i cementen. Her kan CO₂ fra reservoiret trænge ind.

Cementlagene uden om rørledningen virker som foring mellem røret og de omkringliggende bjergarter. Nede i selve reservoiret vil det typisk være sandsten, men der kan være varierende bjergarter undervejs. Oven på sandstensreservoiret ligger et tykt lag lersten, og her er det særligt vigtigt, at cementforseglingen er tæt.



Figur 5

Illustration: Lykke Sandal, Geoviden, redigeret efter Celia et al., Quantitative Estimation of CO₂ Leakage from Geological Storage, ICGCT (2004)

og sprækker med tiden, og derfor kunne man have sin tvivl omkring, hvorvidt den faktisk holder CO₂'en fanget i reservoiret.

“Mange forsøg før vores har dog vist, at det er en ubegrundet bekymring,” siger Claus Kjøller.

“Cement er meget reaktivt med CO₂ og danner blandt andet kalkforbindelsen calcit eller calciumkarbonat (CaCO₃). Calcitten sætter sig i de revner og sprækker, der eventuelt opstår, så de bliver lukket.”

CT-scanning af cement

CO₂'en i de underjordiske reservoirer forsejler altså selv de potentielle flugtveje til overfladen, der skulle opstå ved rørledningen. I princippet minder det lidt om en vandhane, der tilstoppes af kalk. Forskerne kalder fænomenet for ‘cement-selvhealing’.

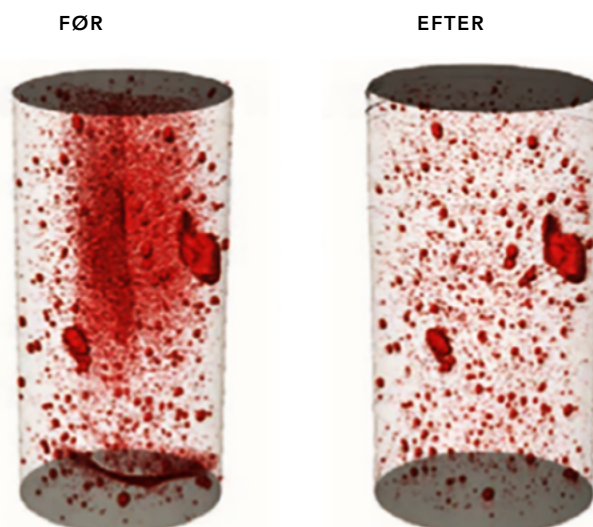
Forsøget med cementpropene i CT-scanneren skulle imidlertid gøre forskerne klogere på, hvad der helt præcis sker, når CO₂'en fylder hullerne ud.

“Vi vidste, at det skete, men vi vidste ikke 100 procent, hvordan det skete. Altså rent kemisk, men også hvordan det rent visuelt så ud inde i cementen. Det kunne

vi vise med den nye type CT-scanner, der kan scanne stenprøver og genskabe dem fuldstændig i 3D,” fortæller Claus Kjøller.

3D-REKONSTRUKTION AF CEMENTPRØVE

Illustration: Malin Torsæter, SINTEF



3D-rekonstruktion af en cementprøve før og efter, at den blev udsat for CO₂. Det massive røde område på prøven til venstre viser den revne, der gennemløber cementen, inden der blev tilsat CO₂. Til højre er kun de naturlige hulrum i cementen tilbage og revnen er væk.

Figur 6

Figur 7

Cementprøverne der blev tilovers fra forsøget med CO₂. De er indstøbt i sandsten, der skal imitere forholdene i et CO₂-reservoir.

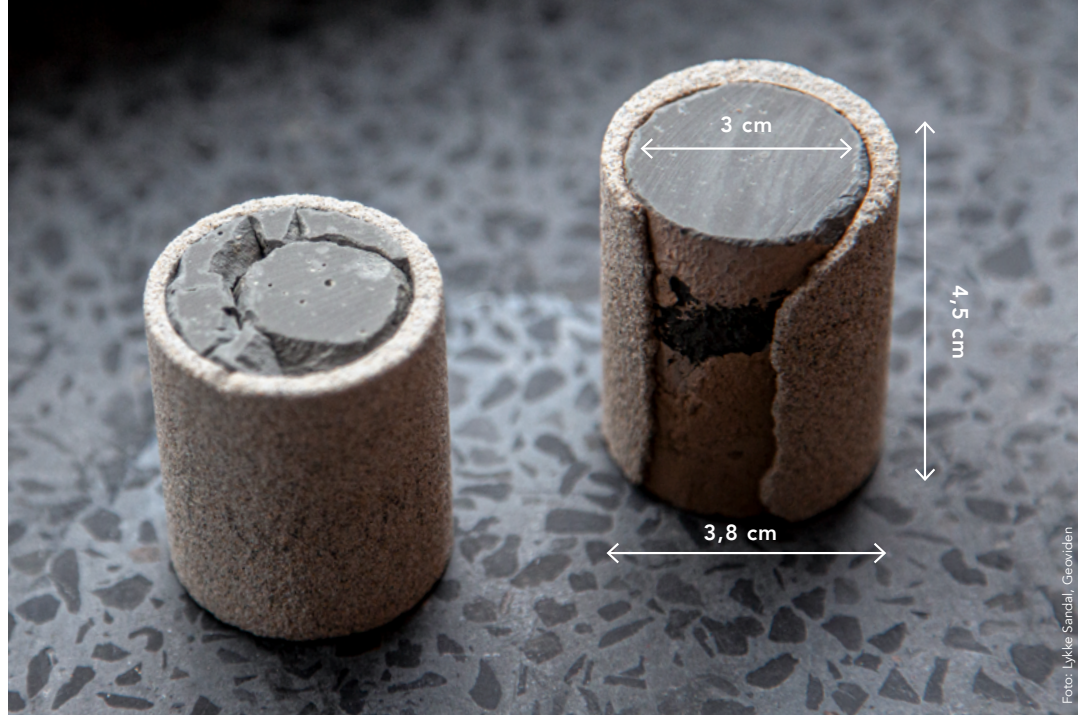


Foto: Lykke Sandal, Geoviden

PROJEKT BIGCCS

Projektet med måling af den selvhelende cementforsegling er en del af det store norsk-ledede projekt BigCCS, som kørte mellem 2009 og 2017 blandt andet med støtte fra den norske stat på 1 mia. kr. Projektet skulle undersøge en hel masse aspekter af videreudvikling og forståelse af Carbon Capture and Storage (CCS), herunder CO₂'ens helende evner i cementforseglingen i borehullerne.

Inden forsøgets start blev cementprøverne støbt ind i sandsten for at imitere forholdene nede i borehullet, hvor cementforseglingen ligger tæt ud mod undergrunden, som i et CO₂-lager ofte vil være sandsten (figur 7). Han vender sig og griber det, der viser sig at være en cement-sandstensprøve, der svarer til dem, der blev fremstillet til forsøget. Der står

tre af dem opstillet i vindueskarmen sammen med en snes andre sten.

”Du kan se her, at der er små revner i cementen. Det er revner som dem, der i teorien kunne være kilde til udsivning fra lageret. Vi fik dem CT-scannet før og efter forsøget, så vi kunne se nøjagtigt, hvad der skete, når der blev tilsat CO₂.”

Kernerne blev sat ind i et rør i forsøgsopstillingen, der sættes under tryk og temperatur, som efterligner de forhold, der vil være i den dybe undergrund i et potentielt CO₂-lager. Derpå sendte Claus Kjølner og hans kollegaer en efterligning af det salte, underjordiske vand igennem cementkernen efterfulgt af CO₂. Det gjorde de fem gange, imens de målte på ud-

vikling i tryk og den kemiske sammensætning i det vand, der kom ud på den anden side.

”Målingerne viste tydeligt, at for hver gang vi havde sendt CO₂ gennem prøven, blev det efterfølgende sværere for vandet at trænge igennem. Der skulle højere tryk til at presse det igennem, det vil sige, at permeabiliteten var

KEMISK REAKTION DER DANNER CALCIT

Boks 1

1. CO₂ opløses i porevandet og danner kulsyre: $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{H}_2\text{CO}_3 \leftrightarrow 2\text{H}^+ + \text{CO}_3^{2-}$
2. Kulsyren opløser cementens portlandit (Ca(OH)₂) og calcium-silika-hydrat (C-S-H), og det danner frie kalciumioner (Ca²⁺):
 $\text{Ca(OH)}_2 + \text{H}^+ \leftrightarrow \text{Ca}^{2+} + \text{OH}^- + \text{H}_2\text{O}$
 $(\text{CaO})_x + (\text{SiO}_2)_y + (\text{H}_2\text{O})_z + (x+2y)\text{H}^+ \leftrightarrow x\text{Ca}^{2+} + (\text{SiO}_2)_y + (\text{OH}^-)_{x+2y}$
3. De frie CO₃²⁻ og Ca²⁺-ioner danner tilsammen calcit (CaCO₃).

” Noget måtte altså være sket med stenen, og det kunne vi se ved at scanne kernen.

blevet lavere. Noget måtte altså være sket med stenen, og det kunne vi se ved at scanne kernen. Området, der før var næsten helt rødt og viste revnen gennem cementen, var næsten helt væk efter forsøget,” fortæller han.

Hurtig reaktion

Udover 3D-konstruktionen af cementkernerne, fik forskerne også en række tværsnitsbilleder fra CT-scanningen. Her kunne man tydeligt se, hvordan den tredelte revne gennem cementen efter forsøget var blevet fyldt med calcit (se figur 8). Målingerne viste blandt andet, at procentdelen af hulrum i cementen,

altså porøsiteten, var gået fra 0,8 til 0,5 procent på de blot fem dage, forsøget tog. Det betød blandt andet, at cementens evne til at lede vand og/eller CO₂ var næsten halveret.

”Det går altså meget hurtigt, og det betyder, at de revner, der eventuelt opstår i cementen langs røret hurtigt vil blive fyldt ud af udfældede mineraler fra CO₂-reaktionen. Dog vil processen blive langsommere og med tiden gå i stå,” fortæller Claus Kjøller.

Derfor er det altså ikke en reaktion, der begynder at påvirke selve cementforsegling-

en som helhed, det vil holde sig til kanter og sprækker. Til gengæld mangler man stadig at finde ud af, hvor grænsen går for den selvhelende reaktion, lyder det fra forskeren.

”Mig bekendt har man endnu ikke lavet forsøg, der viser præcis hvor store sprækker CO₂'en kan forsegle og sat den sammenhæng på formel. Vi har ikke selv haft midler til at lave det, men det er klart noget, der ville være godt at få afklaret. Selvom der er mange sikkerhedsforanstaltninger ved CO₂-lagring, der forhindrer, at der opstår store revner, så er det jo godt at være forberedt på scenariet.”

CT-SCANNING AF CEMENTKERNE

Figur 8

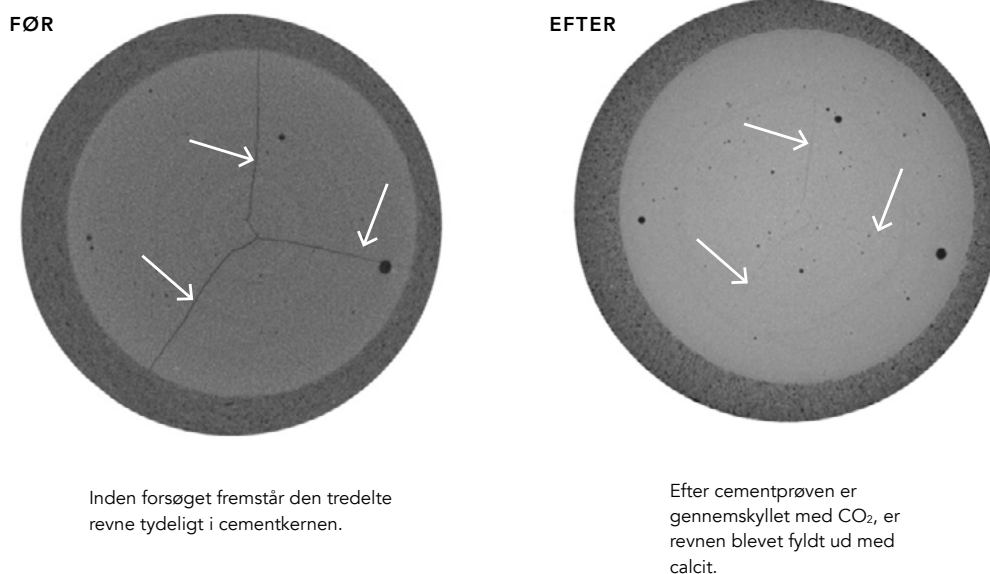


Foto: Malin Torsæter SINTEF



MØD EKSPERTEN

Navn: Claus Kjøller

Stilling/arbejdsplads: Statsgeolog (chef) for Afdeling for Geokemi ved De Nationale Geologiske Undersøgelser for Danmark og Grønland (GEUS)

Uddannelse: Civilingeniør med speciale i hydrogeologi (1997) og ph.d. i grundvandsgeokemi (2001)

Arbejder med: At understøtte den faglige udvikling af afdelingen og de mennesker, der er ansat her. Rent fagligt arbejder vi med de geokemiske og mikrobiologiske processer i alt fra kvaliteten af grund- og drikkevand til studier af den dybe undergrund.

Jeg valgte den karriere, fordi: Jeg valgte studiet som miljøingeniør, fordi jeg havde flair for matematik og fysik og samtidig interesserede mig for miljø. At jeg i dag er statsgeolog ved GEUS er en kombination af tilfældigheder og bevidste valg, men det er det ideelle job for mig, fordi det giver mig mulighed for at kombinere min lyst til at arbejde med mennesker med et arbejde med et højt fagligt indhold.

Mit arbejde er særligt spændende, når: Vores forskning er med til at gøre en forskel, hvad enten det handler om at understøtte særlige teknologier som geotermi og CO₂-lagring eller at sikre rent grund- og drikkevand til fremtiden.

3D-simulering af Vedsted-strukturen der viser dens rumlige udformning i undergrunden.

Strukturens top ligger 1750 meter under jordoverfladen.

Den røde streg viser en virtuel CO₂-brønd. (injektion).

Dybde under terræn (m)

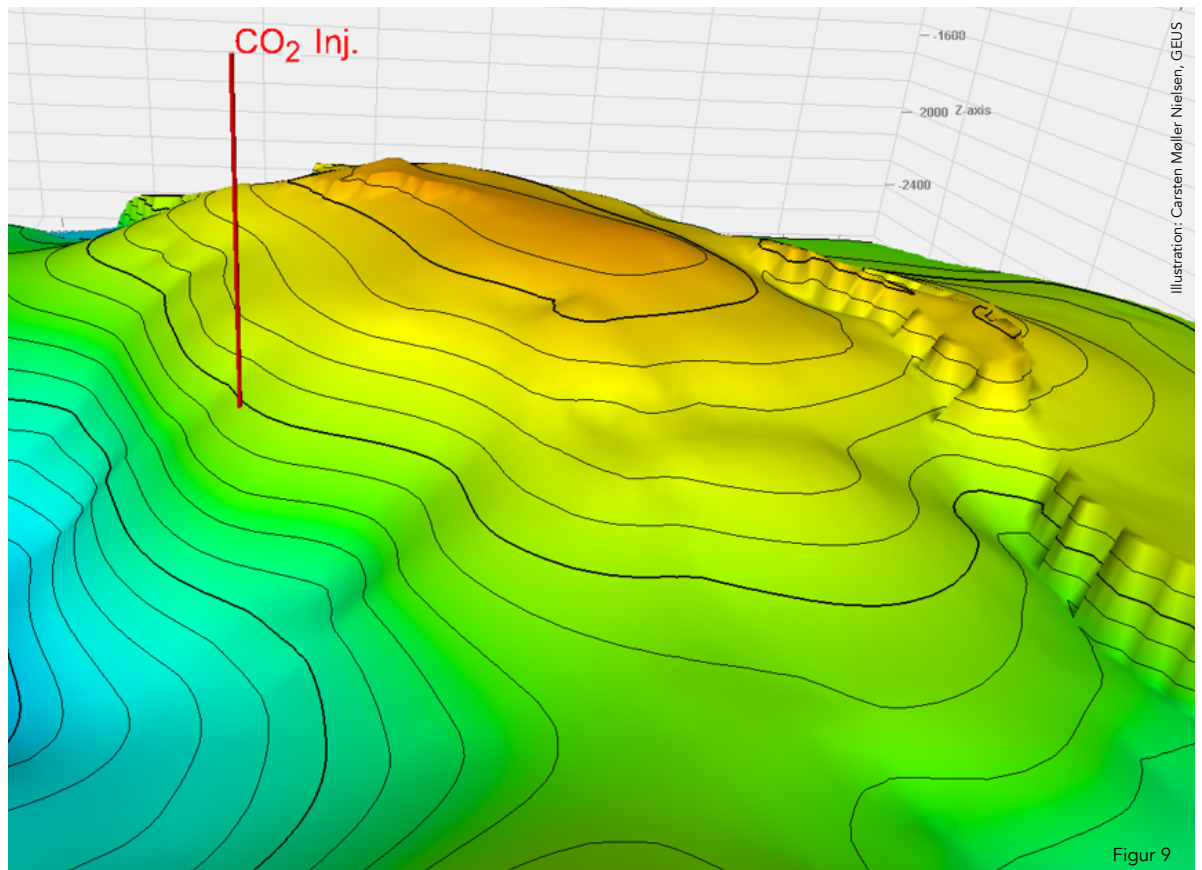
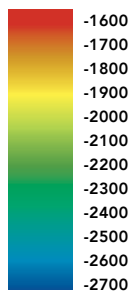


Illustration: Carsten Møller Nielsen, GEUS

Nordjysk undergrund kan lagre en mio. ton virtuel CO₂ om året

Etablering af et CO₂-lager kræver års analyser og undersøgelser, der viser, hvordan CO₂'en vil fordele sig i undergrunden. Flere analyser lovede godt for et område i Nordjylland, men projektet forblev på tegnebrættet.

1750 meter nede i undergrunden vest for Aalborg ligger en formation af sandsten, som er det tætteste, Danmark hidtil er kommet på at få et CO₂-lager. I 2011 blev projektet dog lagt på is af firmaet bag, svenske Vattenfall, på grund af uafklarede politiske forhold om teknologiens fremtid i Danmark.

”Inden da nåede vi dog at lave en lang række beregninger på, hvordan lagringen af CO₂ sandsynligvis ville være forløbet, hvis anlægget var kommet op at køre,” fortæller seniorforsker i reservoirgeologi Peter Frykman fra De Nationale Geologiske Undersøgelser for Danmark og Grønland (GEUS). Han var med på det hold af forskere, der dengang

fik til opgave at simulere, hvordan CO₂'en ville fordele sig i undergrunden i det givne område, kaldet Vedsted-strukturen. Simuleringerne lavede de ved at opbygge virtuelle 3D-modeller af området (se figur 9).

”På den måde kan man teste forskellige forhold, og bl.a. se, hvordan man bedst pumper CO₂'en derned, i hvilket tempo og hvor meget der er plads til.”

Lovende begyndelse

Hvis modellerne viser, at CO₂'en fordeler sig som

ønsket og forbliver i reservoir-et, kan man søge tilladelse til at lave yderligere målinger i området. Er de også positive, kan man søge den faktiske tilladelse til at opføre og drive anlægget.

Vedsted-strukturen havde altså stadig lang vej til CO₂-lagringen, da det kun var første omgang simuleringer, der blev lavet. De så til gengæld fornuftige ud, fortæller Peter Frykman. Selvom han understreger, at de på det stadie stadig er usikre.

”Ifølge de foreløbige model-

” Ifølge de foreløbige modeller egner Vedsted-strukturen sig glimrende til CO₂-lagring.

ler egner Vedsted-strukturen sig glimrende til CO₂-lagring,” siger han.

I simuleringen regnede forskerne blandt andet med en tilførsel (injektion) af en mio. ton CO₂ til lageret om året i 30 år. Hvilket svarer omtrent til den mængde, der formentlig ville have været aktuel, hvis værket var blevet en realitet.

”Her spredte CO₂'en sig fint i sandstenen over tid.”

Analysen gælder dog kun for lagring via en enkelt brønd. Med flere brønde placeret i

forskellige dele af lagret kan man udnytte lagerets kapacitet bedre, uddyber han. Formentlig vil der i så fald kunne lagres over 150 mio. ton CO₂ i Vedsted-strukturen. Det svarer til hele Danmarks samlede udledning i cirka fire år.

Fin fordeling i lagene

Selvom den oprindelige Vedsted-model ikke har ændret sig meget siden det første projekt i 00'erne, så er der undervejs ændret lidt i de parametre, der bruges til at beskrive CO₂'ens egenskaber og processerne under injektionen. Derfor er simuleringerne siden blevet udført på

ny. Det forklarer Peter Frykmans kollega, reservoiringeniør Carsten Møller Nielsen, også fra GEUS. Han var nemlig hovedansvarlig for selve simuleringen tilbage i 00'erne. Han forklarer, at han har genskabt simuleringen af CO₂'ens fordeling efter seks forskellige tidsperioder.

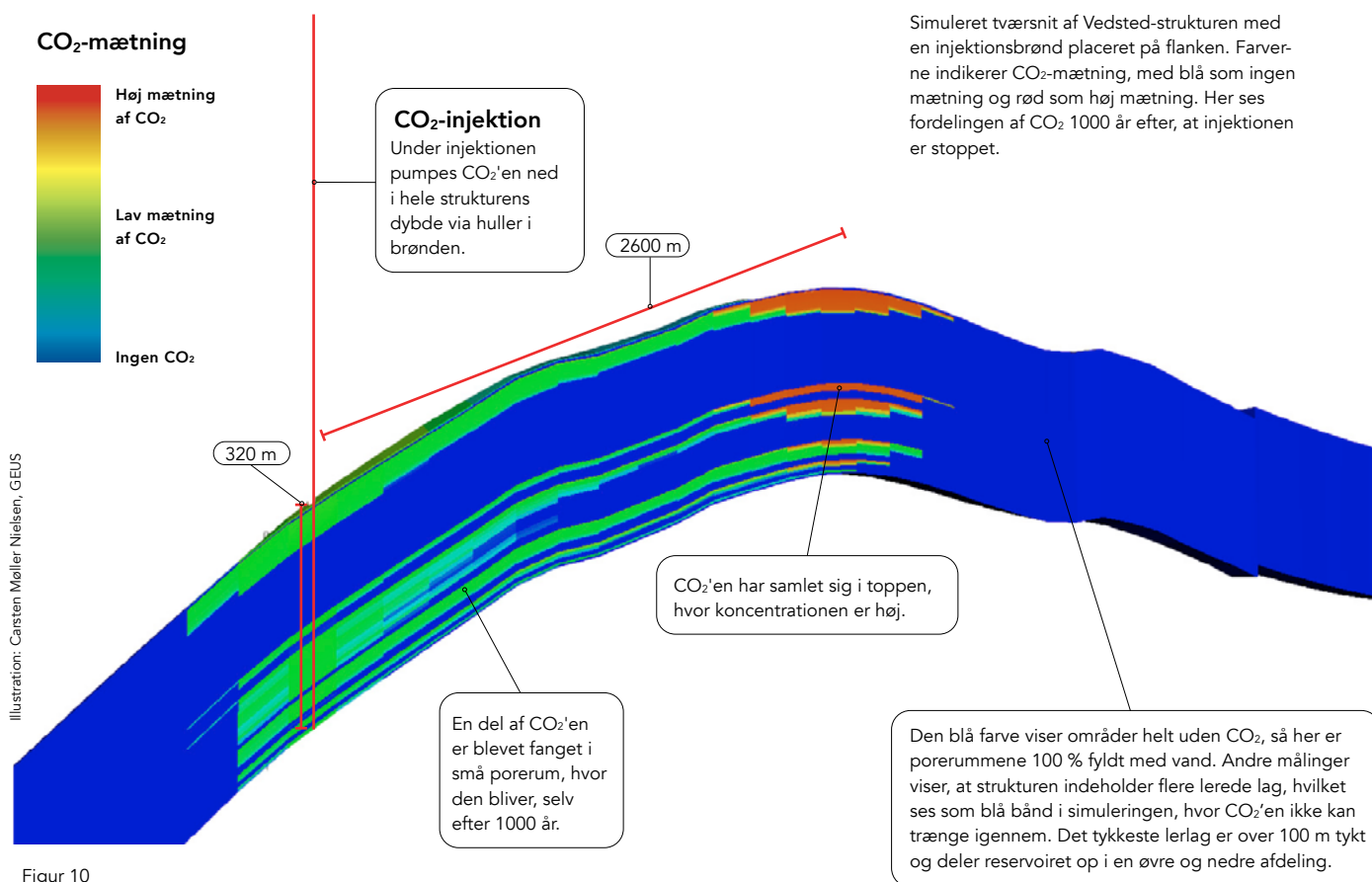
”Der er simuleret efter injektion (nedpumpning) med CO₂ i henholdsvis 6 måneder, 10 år og 30 år. Da det også er relevant, hvad der sker efter endt injektion har vi også simuleret 10, 50 og 1000 år efter, at man vil have lukket anlægget,” fortæller Carsten Møller Nielsen.

Simuleringerne kan blandt andet ses som et tværsnit (profil) af strukturen, hvor farverne afslører CO₂-mætningen i det

snit, hvor injektionsrøret er placeret (figur 10). Farverne indikerer CO₂-mætning, hvor blå er ingen CO₂, og rød betyder høj mætning med CO₂. De viser for eksempel, at når injektionen stoppes efter 30 år, og brønden forsejles, er CO₂'en stadig samlet i toppen 1000 år efter.

”Andre simuleringer viser, at CO₂'en samler sig i toppen allerede 50-100 år efter injektionen stoppes, men simuleringen her viser så bare, at den bliver der. Også efter 1000 år,” siger han.

Se resten af simuleringerne med tilhørende forklaring på næste side. Simuleringerne viser den CO₂, som findes som gas, men ikke den CO₂ der er opløst i vandet, eller som har interageret med sandstenen og dannet nye mineraler (læs mere s. 7-9).



Figur 10

CO₂ i Vedsted-strukturen i teoretisk nutid og fremtid

Her viser en 3D-simulering i seks tidsnedslag, hvordan CO₂ pumpet ned i Vedsted-strukturen vil fordele sig både under og efter injektion set i profil og ovenfra. Det er simuleringer som disse, der indikerer, om et område kan bruges som CO₂-lager, da de blandt andet kan vise, om gassen forbliver fanget på lang tidsskala. Vedsted-strukturen så ud til at opfylde det krav, selv efter 1000 år.

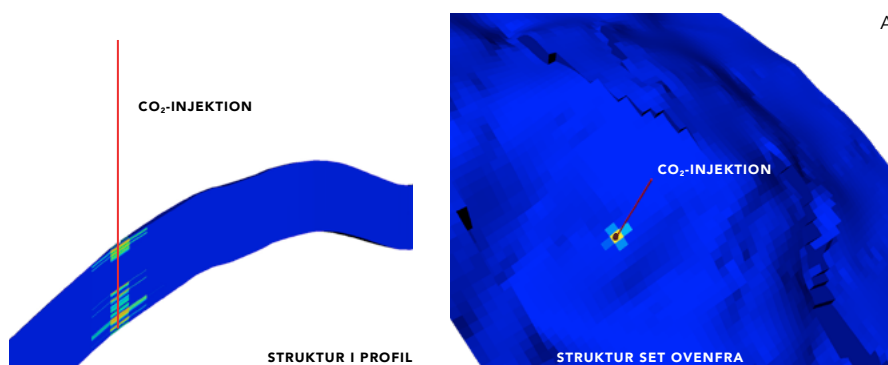
UNDER INJEKTION

Figur 11

6 måneders injektion

Struktur i profil: Efter seks måneders injektion med CO₂ er mætningen med CO₂ i størstedelen af strukturen stadig nul (blå farve). Kun lige omkring røret, hvor CO₂'en pumpes ned, er mætningen stigende, om end stadig lav (svagt gul-grønne farver).

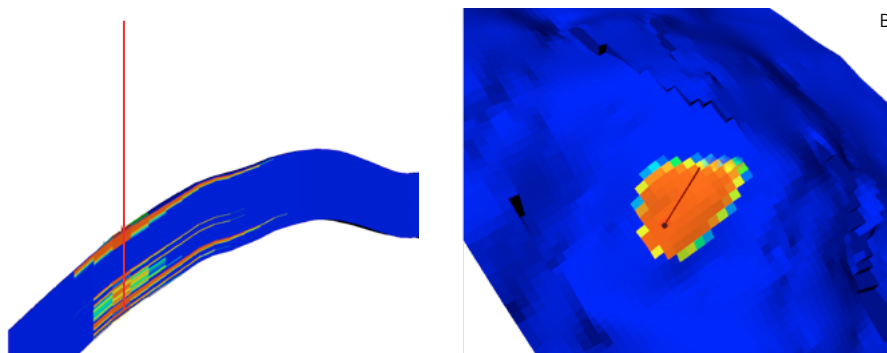
Struktur set ovenfra: CO₂'en fordeler sig jævnt omkring røret i starten, da det pumpes ned under højt tryk, som sender CO₂'en ud i alle retninger i sandstenen.



10 års injektion

Struktur i profil: Koncentrationen af CO₂ i sandstenslagene er nu betydeligt højere i strukturen (rødlige farver). CO₂'en stiger opad i reservoiret, da den er lettere end porevandet, og det ses på de aflange røde felter, der bevæger sig mod toppen. Pga. det høje tryk i røret, mases noget af CO₂'en også et stykke ned ad bakke i sandstenen, før trykket udlignes.

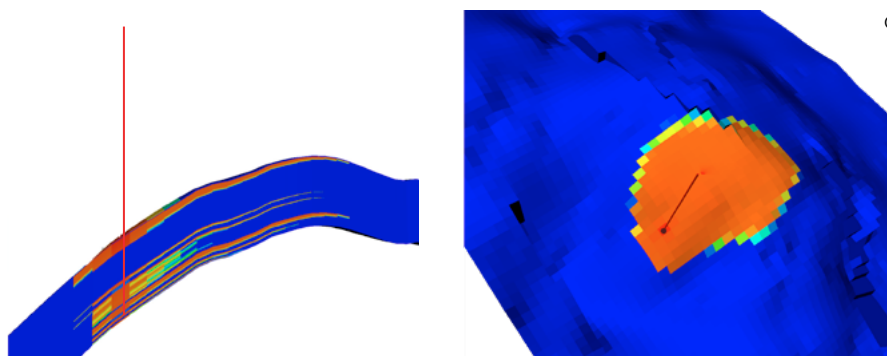
Struktur set ovenfra: På grund af CO₂'ens opstigning kan det nu også ses fra toppen, at det CO₂-fyldte område bliver mere langstrakt.



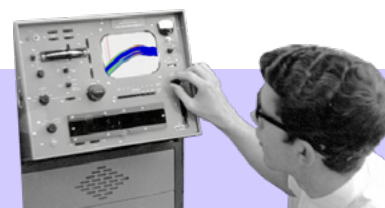
30 års injektion

Struktur i profil: Efter 30 år har CO₂'en nået toppen af reservoiret, men fordi der stadig tilføres ny CO₂, er mætningen omkring røret stadig høj.

Struktur set ovenfra: CO₂'en er nået toppen, hvor den nu også fylder et væsentligt større areal. CO₂-skyen er nu mere jævnt fordelt ved toppen af lageret fremfor at være jævnt fordelt omkring røret, som det var tilfældet i starten.



Simuleringerne af CO₂'ens fordeling i Vedsted-strukturen har taget ca. fem døgn at generere pga den store mængde data og lange tidsskala.

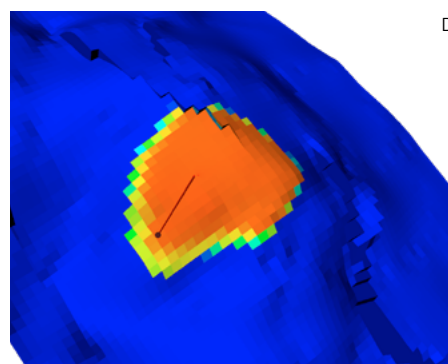
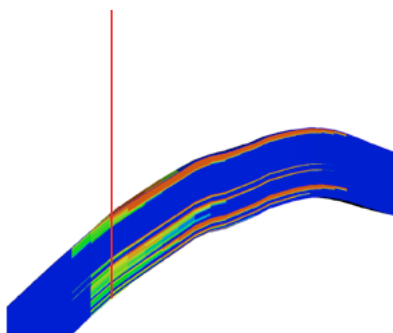


EFTER INJEKTION

10 år efter endt injektion

Struktur i profil: Efter 30 års injektion har lageret nu været forsejlet i 10 år. Uden ny tilførsel af CO₂ er mætningen omkring røret faldet (grønlig farver), fordi CO₂'en efterhånden vandrer opad (røde farver). De grønne områder viser den mængde CO₂, der er fanget i de små porerum og ikke kan stige videre op sammen med resten.

Struktur set ovenfra: Afmætningen omkring røret ses fra toppen som en rand af gule og grønne farver, der breder sig fra randen omkring røret. Der er stadig en stor udbredelse af høj CO₂-mætning omkring toppen på strukturen (rødt område).

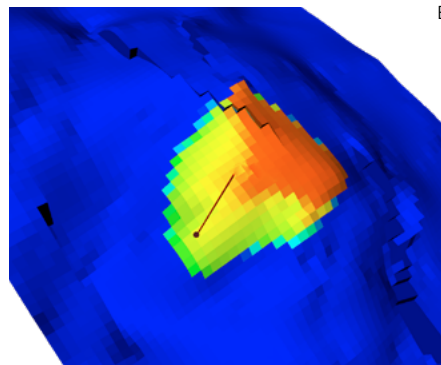
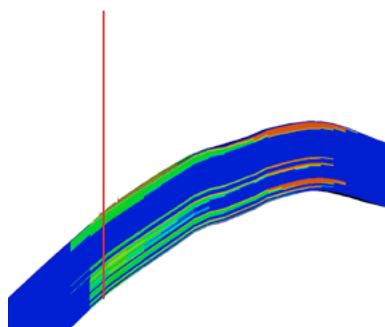


D

50 år efter endt injektion

Struktur i profil: 50 år efter endt injektion befinder det meste af den injicerede CO₂ sig i toppen under lerlaget (rød farve), og ned mod røret sidder næsten kun den CO₂ tilbage, der er fanget mellem sandkornene (grøn farve).

Struktur set ovenfra: Fra toppen ses også en tiltagende lav koncentration hen mod røret (gullige farver), som dog stadig er lidt højere her i toppen, netop fordi CO₂'en søger opad. Samtidig dækker CO₂'en i toppen nu et mindre areal, da den er tiltagende koncentreret om det højeste punkt.

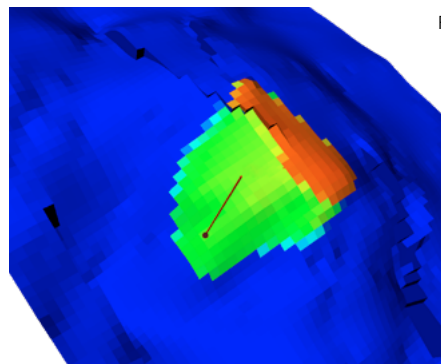
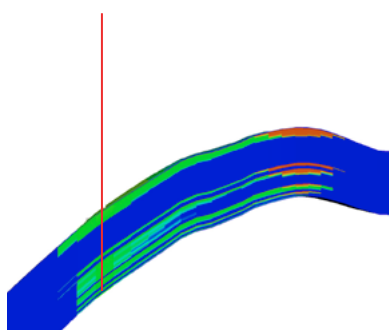


E

1000 år efter endt injektion

Struktur i profil: Efter 1000 år uden injektion har al den bevægelige CO₂ samlet sig i toppen (rød farve), og den CO₂, der blev fanget i de små porer på vej mod toppen, sidder der stadig (blågrøn).

Struktur set ovenfra: I det øverste lag af strukturen er det nu også kun den fangne CO₂, der sidder tilbage hen mod røret (grøn), og al den frie CO₂ er nu samlet i toppen (rød). Med tiden vil en tiltagende andel af den danne nye mineraler og blive en fast del af sandstenen.



F

GLOBAL LAGERSTATUS

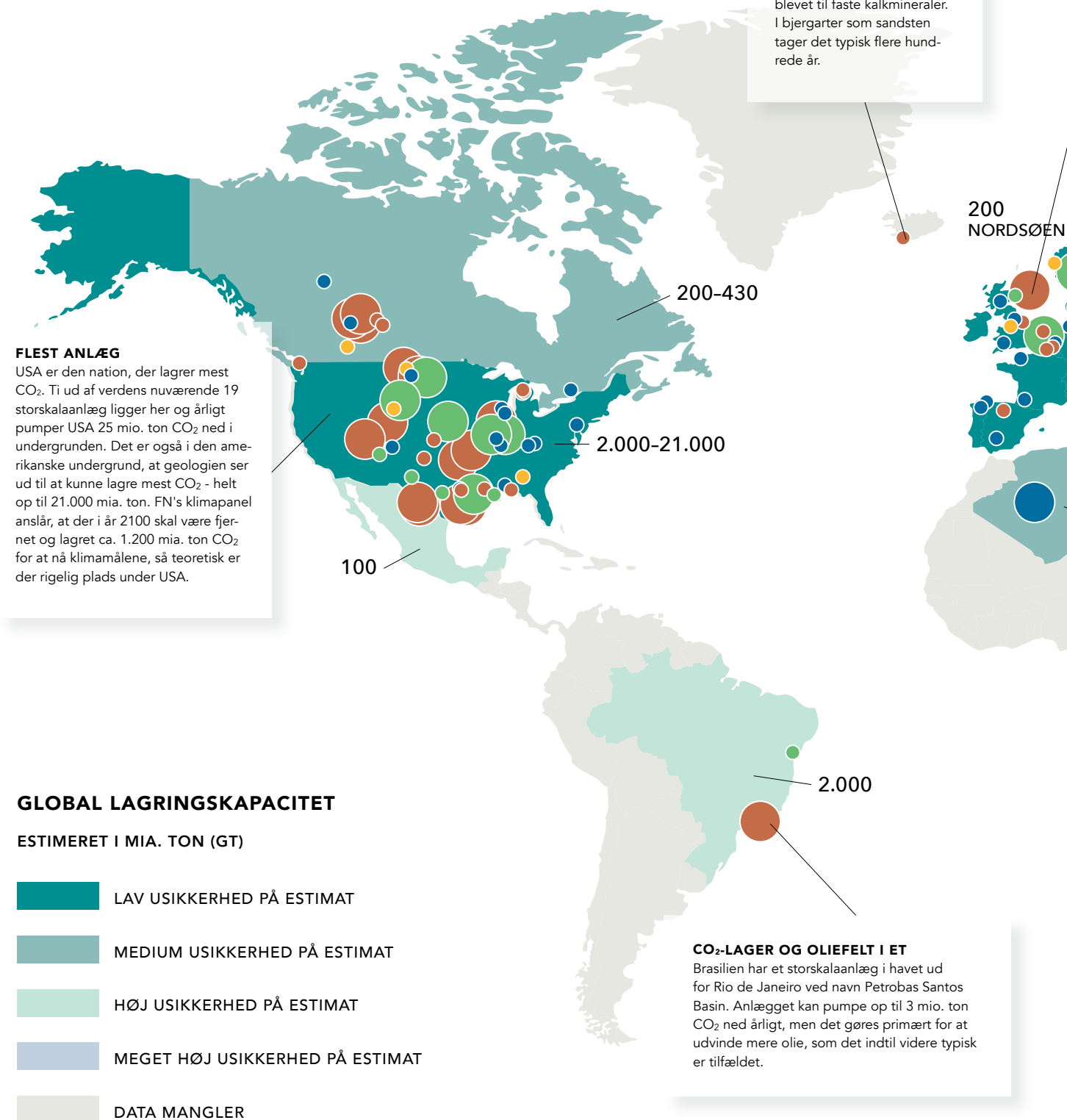
Der lagres allerede CO₂ i undergrunden på alle kontinenter, undtagen Antarktis. Cirklerne giver et overblik over anlæggenes placering og skala, mens farver og tal er estimater for, hvor mange mia. ton de enkelte verdensdele kan lagre.

Figur 12



LYNLAGRING

På Island har et forskningsprojekt vist, at den vulkanske basalt-undergrund er yderst velegnet til at lagre CO₂. Efter bare et år var over 95 % af den CO₂, forskerne havde pumpet ned i undergrunden, blevet til faste kalkminerale. I bjergarter som sandsten tager det typisk flere hundrede år.





VERDENS FØRSTE ANLÆG

Norge har to storskalaanlæg, Sleipner og Snøhvit. Begge er koblet til naturgasproduktion, hvor de filtrerer og genlagrer CO₂ fra den naturgas, der pumpes op. Sleipner er det første storskalaanlæg i verden bygget på havet og kom i drift i 1996. Tilsammen har de to anlæg hidtil lagret ca. 22 mio. ton CO₂.

NUVÆRENDE OG KOMMENDE ANLÆG

STATUS FOR 2019

STOR SKALA >400.000 TON CO₂/ÅR.

● STORSKALAANLÆG I DRIFT
ELLER UNDER KONSTRUKTION

● STORSKALAANLÆG
UNDER PLANLÆGNING

● AFSLUTTET STORSKALAANLÆG

LILLE SKALA <400.000 TON CO₂/ÅR.

● PILOT- OG DEMONSTRATIONSANLÆG I DRIFT
ELLER UNDER KONSTRUKTION

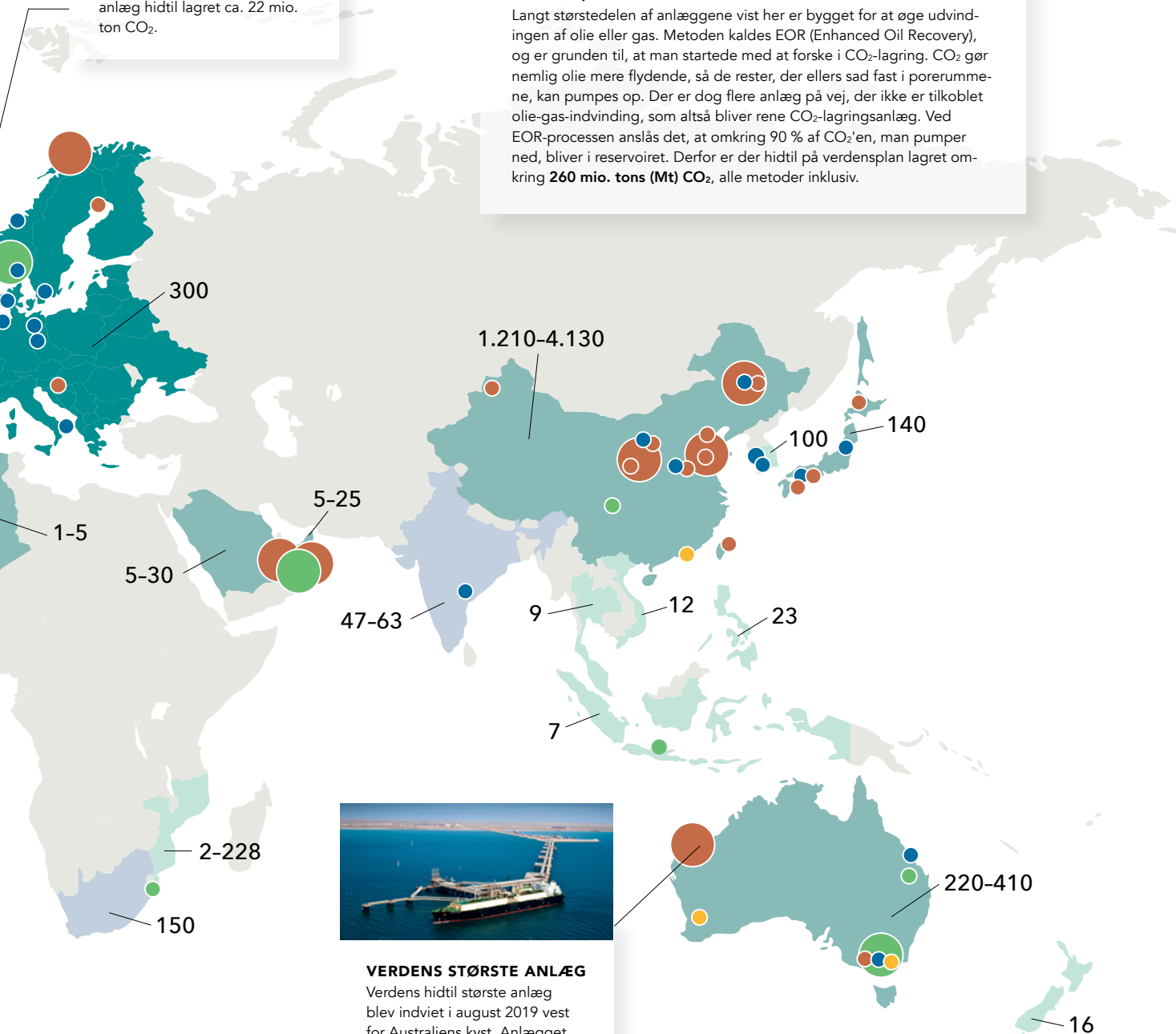
● PILOT- OG DEMONSTRATIONSANLÆG
UNDER PLANLÆGNING

● AFSLUTTET PILOT- OG DEMONSTRATIONSANLÆG

● TESTCENTER

CO₂ NED, OLIE OP

Langt størstedelen af anlæggene vist her er bygget for at øge udvindingen af olie eller gas. Metoden kaldes EOR (Enhanced Oil Recovery), og er grunden til, at man startede med at forske i CO₂-lagring. CO₂ gør nemlig olie mere flydende, så de rester, der ellers sad fast i porerumme, kan pumpes op. Der er dog flere anlæg på vej, der ikke er tilkøbt olie-gas-indvinding, som altså bliver rene CO₂-lagringsanlæg. Ved EOR-processen anslås det, at omkring 90 % af CO₂'en, man pumper ned, bliver i reservoiret. Derfor er der hidtil på verdensplan lagret omkring 260 mio. tons (Mt) CO₂, alle metoder inklusiv.



VERDENS STØRSTE ANLÆG

Verdens hidtil største anlæg blev indviet i august 2019 vest for Australiens kyst. Anlægget hedder Gorgon og kan ved fuld kapacitet pumpe op til 4 mio. tons CO₂ ned om året. Anlægget er ligesom i Norge koblet til naturgasproduktion, hvorfra CO₂'en filtreres og lagres.

Hvordan står det til med CCS globalt

Der er mange fordele ved at fange og lagre CO₂ i undergrunden, men CCS-anlæg til Carbon Capture and Storage er stadig et sjældent syn. Så hvorfor lagrer vi ikke mere CO₂?

CCS NUTID

En række studier foretaget på omkostninger for CCS koblet til kulkraftværker viser, at prisen pr. ton fanget og lagret CO₂ i de seneste år er gået fra over **650 kr.** til omkring **440 kr.**

DET ER BILLIGERE AT FORURENE

Når nu CCS er en velafprøvet og miljøvenlig måde at fjerne CO₂ fra atmosfæren på, hvorfor bliver der så ikke opført flere CCS-anlæg? Det korte svar er, at det stadig er billigere at lade være, som grafen her viser.

I EU er afgiften på et ton udledt CO₂ i skrivende stund på ca. 190 kr., og samme mængde CO₂ indfanget og lagret ved CCS-teknologien koster over det dobbelte, nemlig 440 kr. (bredt estimat).

Der forskes hele tiden i at gøre teknologien billigere, og for hvert nyt anlæg, der bygges, kan erfaringer derfra hjælpe nye anlæg til at skære på omkostningerne. Pt er det dog stadig langt billigere for det enkelte firma at gøre ingenting.

Tænkertanken Global CCS Institute fremhæver derfor i en statusrapport for 2019, at en mulig løsning er at hæve den politisk fastsatte pris på udledt CO₂, give skattefordele eller andre økonomiske tiltag, der gør, at CCS bliver et mere attraktivt valg.

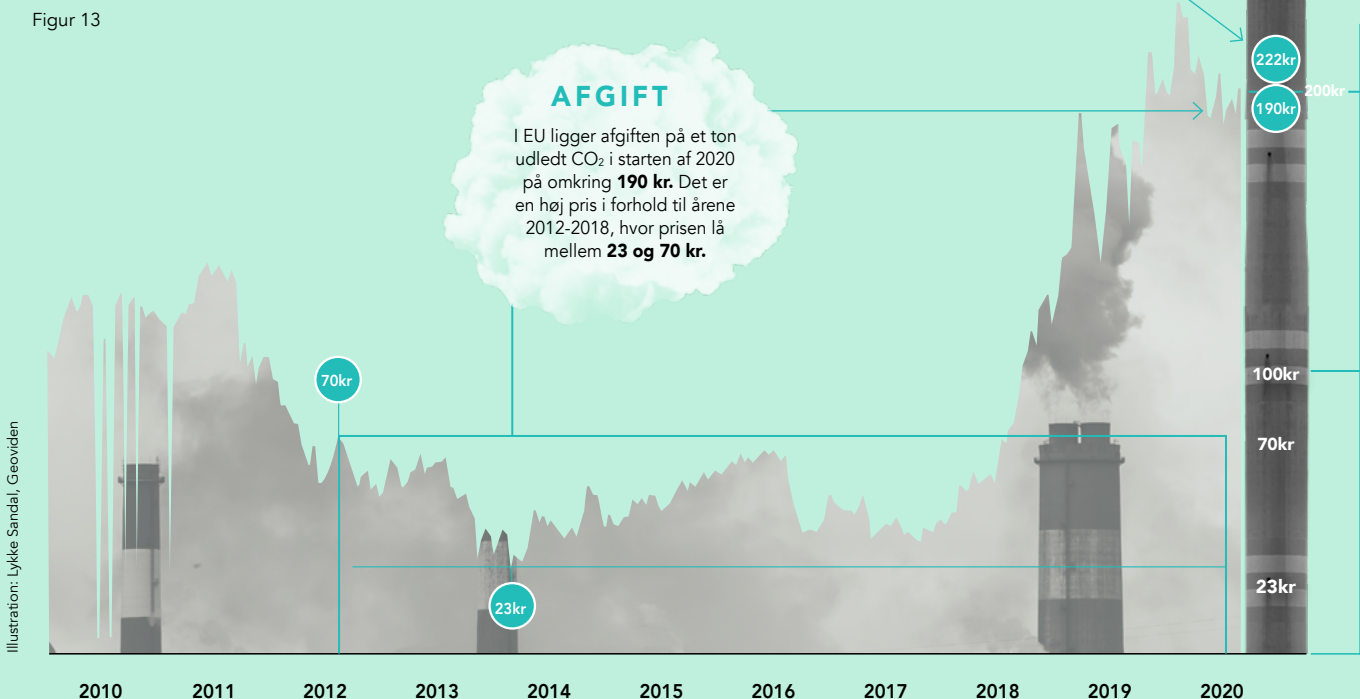
CCS FREMTID

Med de nye, mere effektive tekniske løsninger, der hele tiden opfindes, forventes anlæg, der står færdige i 2024-2028, at kunne fange og lagre et ton CO₂ for ned til **222 kr.** Fremover forventes prisen kun at falde yderligere.

AFGIFT

I EU ligger afgiften på et ton udledt CO₂ i starten af 2020 på omkring **190 kr.** Det er en høj pris i forhold til årene 2012-2018, hvor prisen lå mellem **23 og 70 kr.**

PRISEN PÅ 1 TON CO₂



Figur 13



DIREKTE FANGST

De anlæg, der lige nu fanger CO₂ direkte fra den frie luft i stedet for røggas fra store CO₂-kilder, er dyrere, da koncentrationen af CO₂ er langt mindre. Her er prisen omkring **4000 kr.** pr. ton CO₂ på de eksisterende anlæg.



NØDVENDIG STIGNING I ANTAL CCS-ANLÆG 2019-2040

Der bygges forsvindende få nye CCS-anlæg i forhold til, hvor mange der skal til for at nå Paris-målsætningen. Det Internationale Energiagentur (IEA) anslår, at der skal være mindst 2000 anlæg i stor skala i drift i 2040, for at vi har en chance for at nå målet. I 2019 var der 19 aktive storskalaanlæg og fire under konstruktion. På verdensplan skal der altså i gennemsnit **bygges mindst 95 nye anlæg om året** i de næste to årtier, for at kunne nå det mål.

EU Kommissionen har da også udpeget CCS som et ud af syv nødvendige værktøjer henimod et klimaneutralt EU i 2050 og afsat 75 mia. kr. i støtte til udvikling og drift af CCS i de næste ti år. Det tager gerne mellem fire og seks år at bygge et CCS-anlæg.

NEGATIV UDLEDNING ER NØDVENDIG

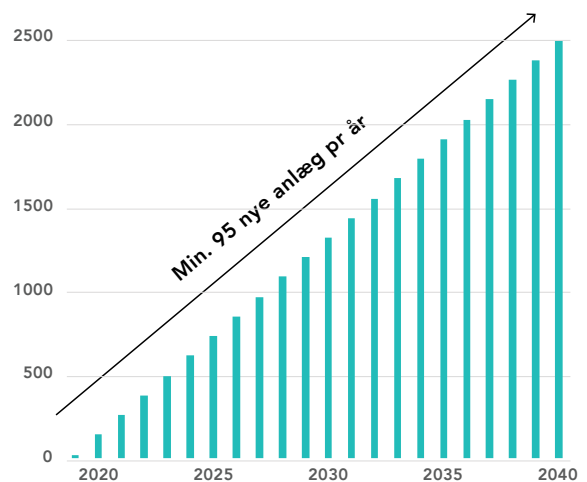


Omkring 80 % af den globale energiproduktion kommer i dag fra fossile brændsler. Det er samme andel som for 50 år siden.

I 2015 udgav FN's internationale klimaråd (IPCC) en rapport, der viste, hvad det ville kræve, hvis vi skal holde den globale temperaturstigning i år 2100 under 2°C, som det blev vedtaget ved Paris-topmødet i 2015.

Konklusionen var bl.a., at

det ikke længere er nok at reducere CO₂-udledningen. Vi er også nødt til aktivt at fjerne CO₂ fra atmosfæren, også kaldet negativ udledning. Ellers vil der stadig være så stor en mængde CO₂, at temperaturstigningen vil overstige de 2°C. Her blev CCS-teknologien nævnt som et nødvendigt middel til at nå i mål, f.eks. via CCS tilknyttet biomasseanlæg.



FOSSIL ENERGI FORSVINDER IKKE I MORGEN

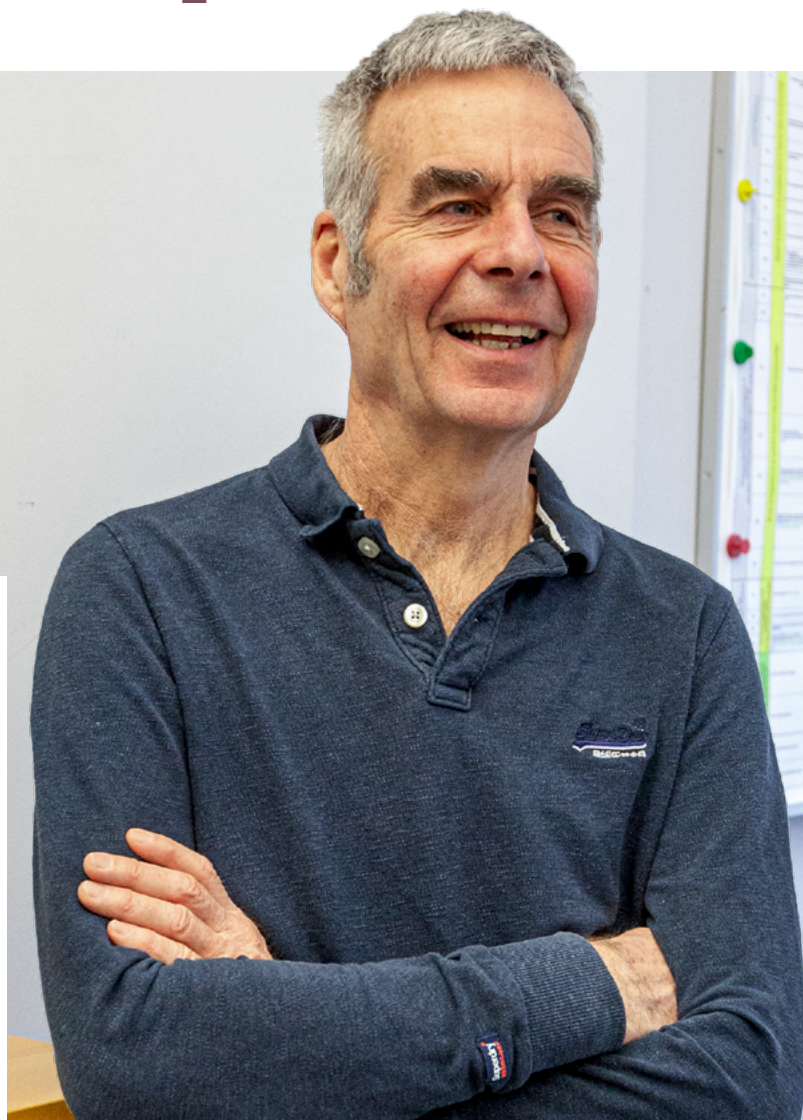


Ikke alle lande er økonomisk eller strukturelt i stand til at lave den grønne omstilling fra fossil energi til vedvarende energi, som det vil kræve at nå Paris-målsætningen. I hvert fald ikke så hurtigt, som det kræves. Blandt andet derfor er det uundgåeligt, at der i

mange år frem vil blive **afbrændt olie, kul og gas i et eller andet omfang.**

Her kan fangst og lagring af CO₂ fra kraftværker og industri være en mulighed for at sikre, at der i det mindste udledes så lidt CO₂ som muligt.

"De fossile brændslers eksistens beviser, at undergrunden kan opbevare CO₂ i millioner af år"



MØD EKSPERTEN

Navn:

Lars Henrik Nielsen

Stilling/arbejdsplads:

Statsgeolog (chef) i Afdeling for Stratigrafi, De Nationale Geologiske Undersøgelser for Danmark og Grønland (GEUS)

Uddannelse:

Ph.d. i geologi

Arbejder med:

Naturressourcer såsom geotermi og CO₂-lagring.

Jeg valgte den karriere, fordi:

Geologi er fascinerende, idet faget beskæftiger sig med Jordens og livets udvikling, og fordi vi som mennesker er afhængige af de naturgivne ressourcer.

Mit arbejde er særligt spændende, når:

Jeg opnår ny indsigt og kan bidrage til at løse nogle af de udfordringer, vi står overfor.

Det er ingen grund til at være betænkelig over for lagring af CO₂ i undergrunden, vurderer statsgeolog Lars Henrik Nielsen, som selv har forsket i CO₂-lagring i mange år. Her svarer han på otte spørgsmål fra Djævelens advokat om den teknologi, som nogen mener blot udskyder klimaproblemet.

Er Carbon Capture and Storage (CCS) en løsning på klimakrisen?

"Det er en del af løsningen, og en af de mest effektive vi har i værktøjskassen her og nu. Det korte og det lange er jo, at den her CO₂, som skaber den globale opvarmning og klimaforandringer, stammer fra undergrunden, hvor den var bundet i fossile brændsler. Nu har vi fundet ud af, at det belaster klimaet, at vi hiver så meget af det op og brænder det af på kort tid. Hvis vi skal modvirke

de menneskeskabte klimaforandringer er vi nødt til at få fjernet en stor del af det fossile kulstof fra atmosfæren og sende det tilbage, hvor vi fandt det – i undergrunden.”

Kan man lagre al den CO₂ verdenssamfundet udleder?

“Teoretisk set ja. I og med at vi har hevet CO₂’en op fra undergrunden i form af olie, kul og gas, må der jo være plads til at komme den derned igen. Det viser alle udregninger også. Rent praktisk vil det dog kun være CO₂ fra store CO₂-kilder som industri og energiproduktion, det kan lade sig gøre at samle op. Processen med at fange og lagre CO₂ kræver en opstilling af pumper, rør osv., som ikke giver mening at sætte op på hvert gadehjørne, på personbiler osv. Det er også ved at fokusere på de største kilder, at man får langt den største klimateffekt.”

Kan man være sikker på, at CO₂’en bliver i undergrunden?

“Ja, det kan man. Igen kan man fremhæve CO₂’s fortid som olie, kul og gas. Alle de fossile brændsler har ligget i undergrunden i millioner af år. Faktisk findes de kun, fordi de har ligget isoleret i jorden og er blevet udsat for tryk og varme så længe, som de er. De fossile brændsler eksistens beviser, at undergrunden kan opbevare CO₂ i millioner af år. Desuden er der detaljerede specifikationer og krav fra bl.a. EU om, at man på forhånd laver en lang række målinger, analyser og beregninger af geologien i undergrunden, så man finder det sted, der egner sig allerbedst til at lagre CO₂ uden, at det kan slippe op igen.”

Er det farligt, hvis CO₂’en siver op til overfladen igen?

“Nej. Skulle der ske udsivninger, er det værste sådan set, at CO₂’en igen medvirker til klimaforandringer. Sker der en stor og brat udsivning til en lavning i terrænet, kan det fortrænge ilten, hvilket kan medføre kvælning for dyr eller mennesker, der opholder sig lige netop der. Det er dog et ekstremt usandsynligt scenarium, både fordi store udslip af CO₂ ville være usandsynlige i sig selv, fordi opstigningen fra undergrunden vil ske meget langsomt gennem små porerum eller sprækker, men også fordi man hurtigt ville kunne måle, at der var en læk og få den lukket. Der skal nemlig også fore-

gå overvågning af lageret både under og efter nedpumpningen. Der er veldefinerede afværgeforanstaltninger, der kan tages i brug, hvis det usandsynlige skulle ske. Sidst men ikke mindst ville en stor mængde CO₂ lynhurtigt blive spredt af vinden. Mange steder i verden siver der CO₂ op fra undergrunden hele tiden på grund af vulkansk aktivitet uden at man gør noget stort nummer ud af det.”

Kan store mængder CO₂ samlet på ét sted skade undergrunden på nogen måde?

“Potentielt ja, men i praksis nej. For at pumpe CO₂ ned i reservoiret er man nødt til at gøre det under tryk. Der er højt tryk i den dybe undergrund, og hvis man skal have fordelt CO₂’en ud i jorden, skal trykket i røret altså være højere end omgivelserne. Er det for højt, kan der komme

grundvandsmagasiner, men boringen er foret og isoleret med op til flere forskellige lag, der sikrer, at intet siver hverken ind eller ud. Skulle der ske en uventet lækage, opdager man det lynhurtigt, da røret også er udstyret med en masse målesystemer, der overvåger nedpumpningsprocessen.”

Hvad bliver der af alt det vand, som CO₂’en fortrænger i undergrunden?

“En del af CO₂’en opløses i vandet, så der både er plads til CO₂ og vand i porerummene. Med tiden sker det for en stor del af CO₂’en. Resten af vandet fordeler sig lige så stille videre ud i undergrunden, som er så enorm stor, at der er rigelig plads til lidt ekstra vand. Det er jo ikke et lukket rum, man pumper CO₂’en ned i, kun opadtil i det område, reservoiret ligger. Vandet kan strømme både nedad

” Det er et faktum, at vi ikke bliver fri for olie, kul og gas i morgen.

sprækker i bjergarten. Inden man vælger et sted at etablere et CO₂-lager vil man altid beregne bjergartens brudstyrke på forhånd. Det vil sige det tryk, der skal til, for at stenen sprækker. Er brudstyrken for lille, laver man ikke lageret og finder et sted med en højere brudstyrke, der er væsentligt højere end det tryk, der er nødvendigt for at pumpe CO₂ ned. Det er vedtaget ved lov sammen med en lang række andre sikkerhedskrav og alt dette skal være dokumenteret, før der overhovedet udstedes tilladelse til at lave et CO₂-lager.”

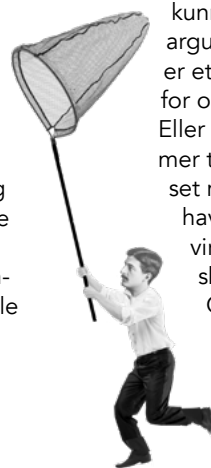
Kan man risikere, at CO₂’en siver ind i vores grundvand og dermed drikkevand? Og kan det være farligt?

“Hvis der siver CO₂ ind i grundvandet, bliver det til slatten danskvand, og det er i hvert fald ikke farligt. Det er dog ikke sandsynligt, da de geologiske formationer, man bruger til CO₂-lagring ligger langt dybere end dem, vi indvinder grundvand fra. De lag er desuden fulde af saltvand, så det ville aldrig være relevant at bruge dem som kilde til drikkevand. Brøndene fører ganske vist nogle steder CO₂ igennem nogle

og ud til siderne og fordele sig videre ud i andre lag. Så vi kommer ikke til at se noget til det på overfladen.”

Kritiske røster mener, at CCS bare er en smart finte fra industrien, der gør det legitimt at fortsætte business as usual med fossile brændsler i stedet for at finde på grønne løsninger. Hvad siger du til den påstand?

“Jeg siger, at det ikke er til diskussion, at vi er nødt til at fjerne noget af al den CO₂ fra atmosfæren, som vi har sendt derop. Det har talrige rapporter slået fast, bl.a. FN’s klimapanel IPCC. Det er rigtigt, at man ved at sende CO₂ ned i et gammelt olie-gas reservoir kan få mere olie ud af det, end man ellers ville kunne. Men det er ikke et argument for at lade være. Det er et faktum, at vi ikke bliver fri for olie, kul og gas i morgen. Eller i overmorgen. Det kommer til at tage år og realistisk set mange år. Så hvis vi skal have en chance for at modvirke klimaforandringerne, skal vi i gang med at fjerne CO₂ fra atmosfæren nu.”



Kend dit CO₂-kredsløb

CO₂ er usynligt, og selvom vi udånder det, bemærker vi det ikke. Alligevel er CO₂ et af Jordens vigtigste molekyler, der tjener både som basiled i fødekæden og taktstok for klimaet.

For dig og mig og alle, vi kender, er livet en konstant udveksling af kulstof (C) i forskellige former, hvor CO₂ er den vigtigste. Vi lever af planter og dyr, som selv lever af planter eller dyr. I sidste ende er planter basis for hele fødekæden, og de skal bruge CO₂ for at leve og vokse. Når levende væsner omdanner føde til energi gennem respiration, udskilles CO₂ gennem vores ånde og bliver til næring for planterne. Når både dyr og planter dør, nedbrydes deres kroppe til blandt andet CO₂, der bruges af nye planter, hvoraf nogen bliver føde for nye dyr og så fremdeles. Hvis de ikke når at blive nedbrudt, omdannes de med tiden til kul og olie i undergrunden.

Hele processen kaldes det organiske kulstofkredsløb. Det er dog kun én del af fortællingen om CO₂. Et par kapitler i en temmelig lang roman faktisk. Det fortæller professor i geologi fra Københavns Universitet, Christian Bjerrum.

“Langt hovedparten af kredsløbet for Jordens CO₂ foregår i en del af kulstofkredsløbet, som de fleste ikke lægger mærke til i hverdagen, fordi det foregår på en tidskala mellem ti tusinder og millioner af år.”

Det drejer sig om det uorganiske kulstofkredsløb, der af samme grund også kaldes det langsomme kulstofkredsløb.

løb. En meget vigtig del af det langsomme kredsløb kaldes silikat-karbonat-kredsløbet, hvor processerne kan koges ned til en række kemiske udvekslinger mellem silikat- og karbonatholdige sten (f.eks. feldspatter), havet og atmosfæren.

“Omkring 70 procent af al Jordens CO₂ er til enhver tid bundet et sted i silikat- og karbonatkredsløbet, mens resten cirkulerer mellem planter, dyr og nedbrydning eller begravelse i jorden,” fortæller Christian Bjerrum.

Helt grundlæggende kan kredsløbet deles op i fire trin, som du kan se beskrevet herunder og i figur 14 til højre.

1. Forvitring af bjerge

Noget af den CO₂, der er i atmosfæren, binder sig til vanddamp. Derved dannes der en svag kulsyre (H₂CO₃), og når den falder som nedbør, kan den opløse de kalk- og silikatholdige sten, som størstedelen af jordskorpen består af. Et godt eksempel er det forholdsvis simple feldspatmineral wollastonit (CaSiO₃). Processen kaldes forvitring og for hver feldspatmolekyle, der forvittes, fjernes to CO₂-molekyler fra atmosfæren (se boks 2, reaktion A). Reaktionen frigiver en calcium-ion (Ca²⁺), to bikarbonat-ioner (HCO₃⁻) samt siliciumdioxid, også kaldet kvarts (SiO₂).

2. Udfældning i havet

Ude i havet lever millioner og atter millioner af små skaldyr, som bruger de udvaskede ioner til at opbygge deres

JORDENS SAMLEDE CO₂

Der er formentlig lidt under to mia. gigaton (Gt) CO₂ på hele Jorden inklusiv atmosfæren. Altså to milliarder milliarder ton. Størstedelen befinder sig dybt i undergrunden, hvor det er bundet i f.eks. kalksten (calcit) og begravet organisk materiale.

skaller og skeletter med. Det kan være plankton og koraller. De opfanger de udvaskede calcium- og bikarbonat-ioner og kombinerer dem til calciumkarbonat (CaCO₃) (se reaktion B). Reaktionen efterlader kvartsen fra reaktion A, der synker til bunds. For hvert molekyle, dyrene danner i deres skelet eller skal, frigives et af de to CO₂-molekyler, der blev brugt i forvitringen af stenen. Det ene CO₂-molekyle udveksles med atmosfæren.

3. Begravelse i havbunden

Når dyrene med calciumkarbonatskeletterne dør, synker de til bunds. Her bliver de med tiden begravet under nye lag, der synker ned fra oven, sammen med den silika, der blev tilovers ved dannelsen af deres skal. Der hvor kontinentalpladerne mødes, vil den ene plade sommetider bevæge sig ned under den anden, hvilket danner en såkaldt subduktionszone. Her føres de begravede lag af havdyrenes calciumkarbonat og silika sammen med kontinentalpladen ned i dybet.

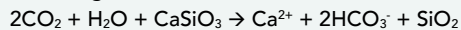


Foto: Dædleret CO₂ 1.0, DSC07487

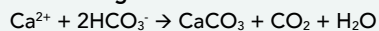
Et stykke af den simple feldspat wollastonit (CaSiO₃), som her måler 22 x 12 x 8 cm.

KEMISKE REAKTIONER I SILIKAT-KARBONATKREDSLØBET

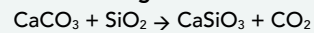
A Forvitring: Kalciumsilikat til ioner



B Udfældning: Ioner samles til kalk



C Omsmeltning: Kalk + kvarts tilbage til kalciumsilikat



Boks 2

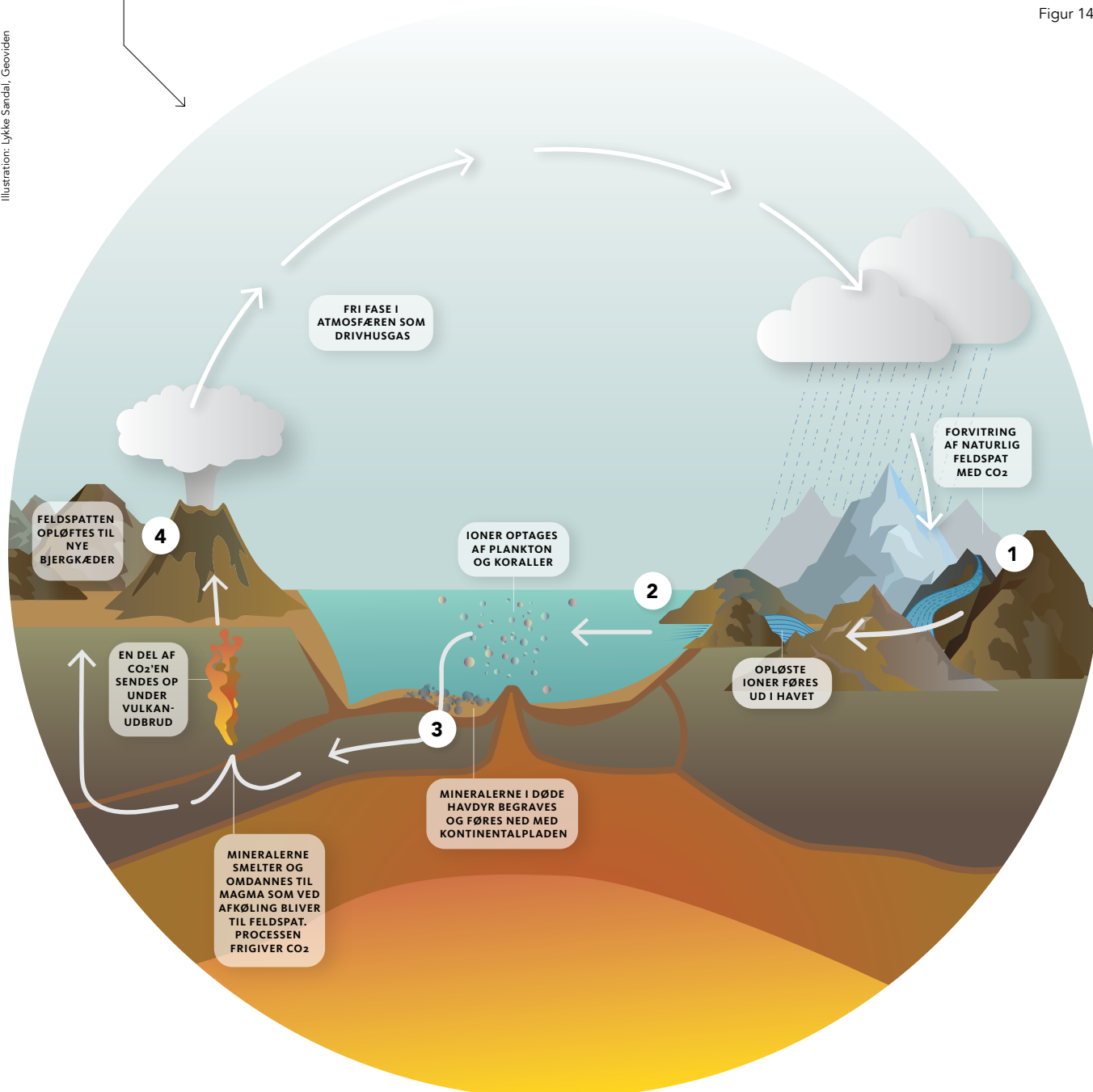


Læs meget mere om kulstofkredsløbet og sammenhængen med klimaet i Geoviden 4, 2006 om 'Fortidens drivhusverden'.

+ Find bladet på geoviden.dk

Figur 14

Illustration: Lykke Sandal, Geoviden

PROCESSER DER TILFØRER CO₂ TIL ATMOSFÆREN

- Vulkanisme
- Gejsere
- Biologisk nedbrydning af organisk materiale
- Afbrænding af fossile brændsler

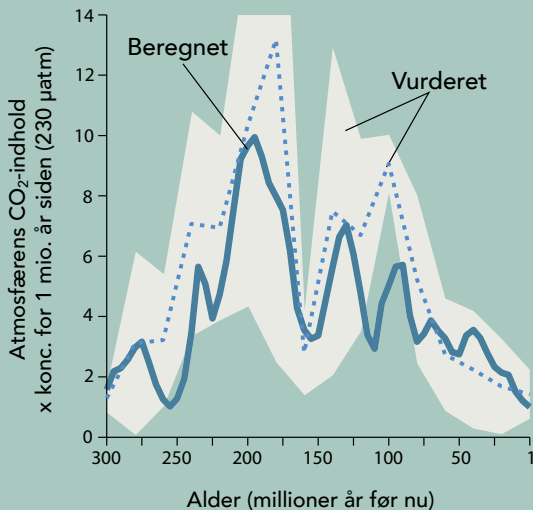
PROCESSER DER FJERNER CO₂ FRA ATMOSFÆREN

- Planterets fotosyntese, der danner organisk materiale
- Begravelse i undergrunden
- Opløsning i havet

FOSSILE BLADE AFSLØRER FORTIDENS CO₂-NIVEAU

Træarten Ginkgo Biloba har eksisteret i mange millioner år, og derfor har man fundet fossile blade med vidt forskellig alder, der kan fortælle om fortidens CO₂-niveauer. Forsøg med levende ginkgotræer og andre planter viser nemlig, at jo mere CO₂, der er i atmosfæren, des færre spalteåbninger har bladene. Spalteåbningerne, også kaldet stomata, er en livsnødvendig konstruktion på undersiden af alle blade. De optager nemlig CO₂ til planten, som den skal bruge til fotosyntesen. Jo mere CO₂, der er i atmosfæren,

des færre stomata behøver planterne at lave, da de koster mere energi at danne end almindelige vævsceller. Geologer har derfor fundet ud af, at man kan måle antallet af stomata på de fossile blade og regne det om til, hvor meget CO₂, der så må have været, da træet var i live. Ved at sammenligne resultatet fra mange fossile blade (vurderet graf herunder) med CO₂-estimater fra andre metoder (beregnet graf) kan man få en ret god ide om, hvordan CO₂-niveauet har ændret sig gennem tiden.



Figur 15

Graf: Lykke Sandel, Geovidnen, redigeret efter Geovidnen 2006, nr. 4, Christian Bjerrum



Foto: Colourbox 1442698

Bladene hos dette unge ginkgotræ ligner til forveksling dem hos artsfælderne, der levede for 180 mio. år siden. Spalteåbningerne sidder på bladens underside. Billedet herunder viser bladvæv under mikroskop, hvor de små læbeformede stomata ses tydeligt.



Foto: Shutterstock, Barbol

4. Dannelse af nye bjerge

På et tidspunkt bliver tryk og temperatur så høj, at kalciumkarbonat og silika splittes op og noget smelter. Atomerne sættes sammen på ny til den bjergart, det hele startede med, kalciumsilikaten wollastonit. Reaktionen frigiver det sidste af de to CO₂-molekyler, der oprindeligt skabte forvitringen i bjergene (reaktion C). Det CO₂-molekyle frigives med tiden tilbage til atmosfæren via vulkanudbrud og geysere. Tektoniske bevægelser vil over mange, mange tusinde år løfte den nye

feldspat op som bjerge, og så starter det hele forfra.

Jordens klimamaskine

Det er kulstofkredsløbet, der styrer Jordens klima. Ændringer i omfang og hastighed på de forskellige kemiske reaktioner bestemmer nemlig, hvor meget CO₂, der befinder sig i atmosfæren, og det er netop CO₂-koncentrationen her, der styrer klimaet, forklarer professor Christian Bjerrum. Da CO₂ er en drivhusgas, vil forhøjede koncentrationer af CO₂ medføre forhøjede temperaturer,

” Hvis al udledning af menneskeskabt CO₂ stoppede i morgen, ville det derfor stadig tage cirka hundrede tusind år, før balancen kunne genfindes.

og mindre koncentrationer af CO₂ giver lavere temperaturer. Den mekanisme driver klimaforandringer og global opvarmning, hvilket er noget, som har svinget flere gange gennem Jordens historie. Systemet søger altid mod ligevægt, men hvis der sker ændringer i en eller flere dele af kredsløbets delelementer, kan det skubbe systemet ud af balance. Over cirka hundrede tusinde år vil systemet selv reducere udsvinget og finde tilbage til den ligevægt, der var i udgangspunktet. Med mindre ændringen i systemet er tilpas stor eller permanent.

”Hvis ændringen er meget stor, kan det betyde, at balancen forskubbes så meget, at det ikke kan komme tilbage i ligevægt, men over tid finder en ny ligevægt,” forklarer Christian Bjerrum.

Det betyder store ændringer i klima og miljø og kræver enorm tilpasningsevne hos levende organismer.

Dinosaurernes varme verden

Der findes flere eksempler på den slags udsving gennem tiderne, der med al sandsynlighed skyldes forskydninger i CO₂-kredsløbet. Blandt andet i dinosaurernes storhedstid i Jura og Kridt for mellem 200 og 66 mio. år siden. Analyser af blandt andet fossile blade kombineret med computermodeller viser, at datidens CO₂-koncentration lå mellem fire og ti gange højere end niveauet inden den industrielle revolution (se fig. 15). Andre geologiske analyser viser tilsvarende, at temperaturen i

gennemsnit var mellem 3 og 15°C varmere end i dag.

”Det er ret kompliceret, men en vigtig pointe i forklaringen på ændringen i CO₂-niveau i den periode er øget vulkanisme. Superkontinentet Pangæa var i færd med at splitte op og bevæge kontinenterne hen mod, hvor de er i dag. Det gav en stor vulkansk aktivitet langs randzonerne af de tektoniske plader, og flere vulkanudbrud sender mere CO₂ ud i atmosfæren,” forklarer Christian Bjerrum.

De øgede CO₂-niveauer fik derfor den globale temperatur til at stige og forblive relativt høj i hele perioden sammenlignet med i dag.

Uperfekt selvregulering

Her træder kulstofkredsløbets geniale, indbyggede genopretningssystem dog ind via den simple kendsgerning, at kemiske reaktioner forløber hurtigere ved højere temperaturer. Det betyder, at de kemiske reaktioner i kulstofkredsløbet, der er eksponeret for atmosfærens stigende temperaturer, begynder at gå hurtigere. Det vil sige hovedsageligt forvitringen, som foregår i den fri luft. Derfor begynder der i takt med den stigende temperatur at ske mere forvitring.

Som forklaret, fjerner forvitring CO₂ fra atmosfæren, og stigende forvitring fjerner derfor mere CO₂. Med tiden medfører det, at drivhuseffekten på Jorden mindskes, så temperaturen langsomt falder igen. Det samme gør forvitringen på grund af

temperaturafhængigheden. Det bringer til sidst systemet tilbage i balance.

”Eller i i hvert fald næsten, for reguleringsmekanismen er ikke perfekt,” tilføjer Christian Bjerrum. Hvis den var, ville CO₂-niveauet være konstant, og det er der ikke noget, der tyder på.

”Systemet er dog så tilpas selvregulerende, at det over lang tid holder CO₂'en nogenlunde fordelt i atmosfære, hav, organismer og undergrund, så det hele ikke ender i én af afdelingerne.”

Dengang og nu

Udligningen af balanceforskydninger tager dog lang tid, og derfor kan man ikke sammenligne Jura- og Kridttidens udsving i CO₂-cyklussen med nutidens stigning i CO₂-koncentration. Dengang skete ophobningen af CO₂ i atmosfæren over flere millioner år. Nu er det sket på få århundreder. Derfor har kulstofkredsløbets reguleringsmekanismer ikke samme mulighed for at udligne stigningen.

”Hvis al udledning af menneskeskabt CO₂ stoppede i morgen, ville det derfor stadig tage cirka hundrede tusind år, før balancen kunne genfindes,” siger Christian Bjerrum.

Samtidig ville en temperaturstigning i stil med Jura- og Kridttidens temperaturer medføre havstigninger på over 70 meter, hvilket selvsagt vil oversvømme store dele af de områder, hvor der i dag bor mennesker.



MØD EKSPERTEN

Navn:
Christian Jannik Bjerrum

Stilling/arbejdsplads:
Professor MSO i geologi

Uddannelse: Ph.d. i geologi, 1999. Kandidatgrad i geologi, 1996

Arbejder med: Havcirkulation, klima og ilts indflydelse på liv gennem Jordens historie og fremtid ved at studere bjergarter, deres kemi samt lave numeriske fysiske-biologiske-kemiske modeller.

Jeg valgte den karriere, fordi: Arbejdet både er ude i naturen for at indsamle prøver, kemiske analyser i laboratoriet, men også at programmere i store computermodeller med store mængder data, der skal analyseres.

Mit arbejde er særligt spændende, når: Jeg er i felten for at indsamle prøver, for så er hver dag som at læse et nyt kapitel i den fedeste krimi, hvor jeg selv indsamler beviser.