



# Klimapotentialer i lagring af kulstof

**Notat**

*Udgivet: December 2019  
Forfatter: Torben Chrintz  
Støttet af: VILLUM FONDEN*

 | **CONCITO**  
DANMARKS GRØNNE TÆNKETANK

## Indhold

Sammenfatning .....	3
Kulstofkredsløbet og den menneskelige påvirkning .....	4
Metoder til øget optag af CO <sub>2</sub> .....	6
Vurdering af klimapotentiale .....	7
Kulstoflagring i skove .....	7
Kulstoflagring i landbrugsjord.....	8
Kulstoflagring i hav og dybe oceaner .....	10
Øget forvitring af bjergarter .....	11
Indfangning og lagring af CO <sub>2</sub> ved afbrænding af kulstof (CCS) .....	11
Vurdering af drivkræfter og barrierer.....	14
Anbefalinger.....	15
Kilder.....	16

## Sammenfatning

De globale klimaforandringer er primært styret af koncentrationen af forskellige drivhusgasser i atmosfæren, hvor en af de vigtigste er koncentrationen af CO<sub>2</sub>. Koncentrationen af CO<sub>2</sub> i atmosfæren er styret af balancen mellem tilførsel og fjernelse af CO<sub>2</sub> fra atmosfæren. Hvis tilførslen er større end fjernelsen øges koncentrationen af CO<sub>2</sub> i atmosfæren og temperaturen stiger og vice versa.

Øget lagring af kulstof er ifølge FN's Klimapanel IPCC et helt afgørende virkemiddel til at imødegå de værste klimaforandringer, og det vil reelt ikke være muligt at nå Parisaftalens mål uden en betydelig indsats for øget lagring af kulstof. Dette notat beskriver og vurderer disse muligheder helt overordnet.

Der er langt fra videnskabelig enighed om, hvor meget kulstoflagring de enkelte metoder reelt kan bidrage med, men der er generelt enighed om, at de fleste af metoderne skal tages i brug i større eller mindre omfang for at nå målene om at stabilisere klimaforandringerne. De vurderede lagringsmetoder i dette notat er:

- Kulstoflagring i skove
- Kulstoflagring i landbrugsjord
- Kulstoflagring i hav og dybe oceaner
- Øget forvitring af bjergarter
- Indfangning og lagring af CO<sub>2</sub> ved afbrænding af kulstof (CCS).

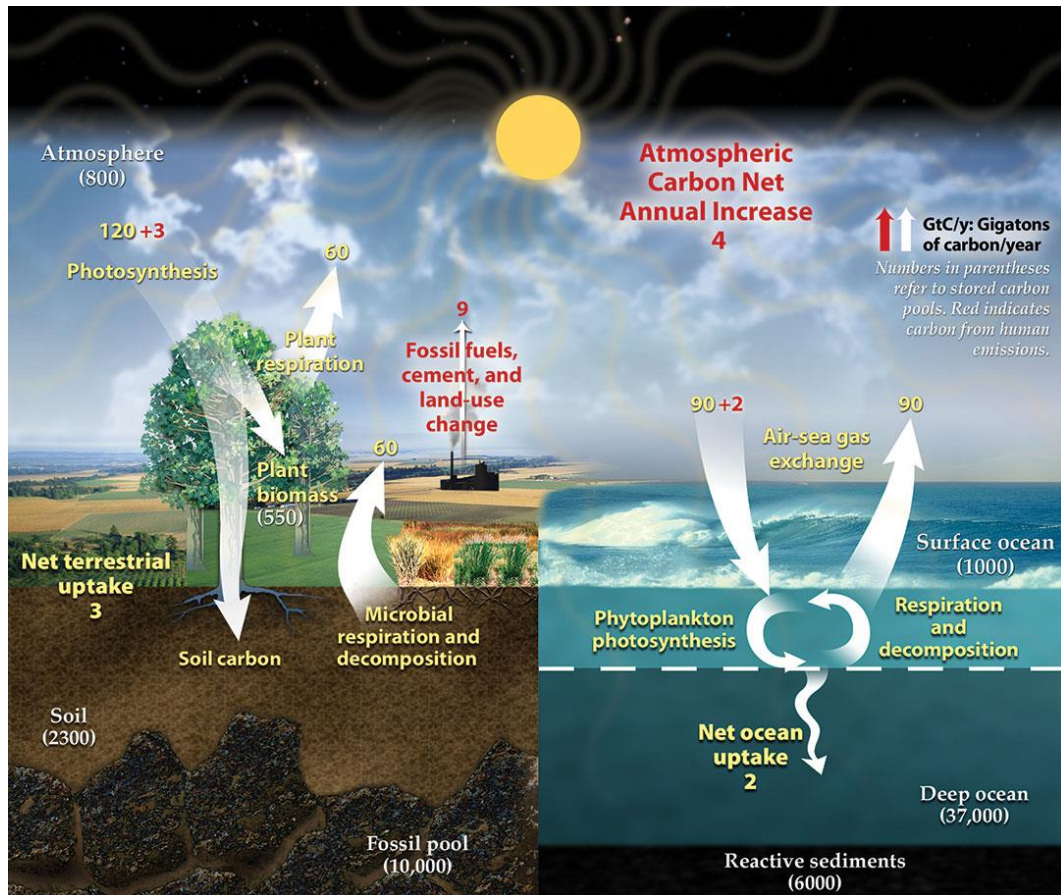
Særligt lagring i skove og jorder samt brug af CCS-teknologier vurderes at have meget store lagringspotentialer, og kan have mindst samme betydning som eksempelvis udbredelsen af sol- og vindenergi. Alligevel har lagringsmetoderne og –teknologierne endnu relativt begrænset politisk opmærksomhed. Dette kan skyldes, at de ikke umiddelbart har de samme økonomiske og beskæftigelsesmæssige effekter som eksempelvis etablering af sol- og vindenergi, og i nogle tilfælde kan de ligefrem være forbundet med en omkostning.

Der er et åbenlyst og akut behov for, at de forskellige lagringsmetoder og –teknologier bliver prioriteret væsentligt højere. Det kan kræve holdningsændringer samt erkendelse blandt politikere og interesseorganisationer af, at de nødvendige klimatiltag isoleret set ikke altid går hånd i hånd med øget økonomisk eller beskæftigelsesmæssigt potentiale.

Lagringsteknologierne kan hjælpes på vej af en høj pris på CO<sub>2</sub>-udledning - eller i mangel af samme, en højere prioritering i de klimapolitiske målsætninger. Endelig er det vigtigt, at lagringsteknologierne får øremærket en større andel af forskningsmidlerne, der bedre afspejler den betydning teknologierne har for at opnå klimamålene. I praksis vil dette betyde samme adgang til forsknings- og udviklingsmidler som fx vedvarende energi-teknologier.

## Kulstofkredsløbet og den menneskelige påvirkning

De globale klimaforandringer er primært styret af koncentrationen af forskellige drivhusgasser i atmosfæren, hvor en af de vigtigste er koncentrationen af CO<sub>2</sub>. Koncentrationen af CO<sub>2</sub> i atmosfæren er styret af balancen mellem tilførsel og fjernelse af CO<sub>2</sub> fra atmosfæren. Hvis tilførslen er større end fjernelsen øges koncentrationen af CO<sub>2</sub> i atmosfæren og temperaturen stiger og vice versa. Denne kulstofbalance mellem tilførsel og fjernelse er vist i figur 1.



Figur 1: Kulstofets kredsløb. De røde tal er menneskeskabte udledninger, de gule er den naturlige cyklus, mens tallene i parentes er lagret kulstof. Alle tal er i milliarder ton C (Gt). Kilde: U.S. Department of Energy, Office of Science (2008).

De hvide tal i figur 1 er det lagrede kulstof (C), og de viser at:

- Atmosfæren indeholder 800 gigaton kulstof
- Plantebiomassen på landjorden indeholder 550 gigaton kulstof
- Jorden (terrænnær) indeholder 2300 gigaton kulstof
- Undergrunden indeholder 10.000 gigaton kulstof
- Oceanerne og oceanbunden samlet indeholder 44.000 gigaton kulstof.

De gule tal i figur 1 skitserer den "naturlige" kulstofcyklus uden det menneskeskabte bidrag, og viser at:

- Oceanerne optager og afgiver 90 gigaton kulstof årligt
- Terrestriske planter optager 120 gigaton kulstof årligt via fotosyntese, som fordeles i planterne og i jorden, og som igen afgives ved planternes respiration (60 gigaton årligt) og ved mikrobiel respiration og nedbrydning i og på jorden (60 gigaton årligt).

Betragtes endelig de røde tal i figuren, er disse som nævnt et udtryk for den menneskeskabte udledning. Det fremgår her at:

- Den samlede udledning af kulstof er 9 gigaton årligt (i dag snarere 10 gigaton)
- 2 af de 9 gigaton optages i havet
- 3 af de 9 gigaton optages af planter og jord
- De resterende 4 gigaton akkumuleres i atmosfæren og medfører en stadig stigende koncentration af CO<sub>2</sub> i atmosfæren.

Det er her vigtigt at bemærke, at den årlige omsætning i planterne og i jorden er mere end ti gange større end den menneskeskabte udledning, og at lageret i biomassen og i de øverste jordlag er ca. 300 gange større end den årlige menneskeskabte udledning. Ændringer af dette system i form af f.eks. reduceret lager vil derfor kunne skabe en ubalance i systemet og en ny ligevægt med en potentielt større koncentration af CO<sub>2</sub> i atmosfæren.

Kort sagt er den årlige menneskeskabte udledning meget lille, både i forhold til de forskellige lagre, og i forhold til den naturlige balance der er mellem optag og udledning af CO<sub>2</sub> i atmosfæren. Man kan derfor reducere stigningstakten for koncentrationen af CO<sub>2</sub> i atmosfæren dels ved at reducere udledningen, men også ved at øge optaget af CO<sub>2</sub> i de forskellige systemer.

Det er dog vigtigt at bemærke, at så længe udledningen af CO<sub>2</sub> er større end optaget vil koncentrationen af CO<sub>2</sub> i atmosfæren stige, så selv ved dramatiske reduktioner af den menneskeskabte udledning vil koncentrationen af CO<sub>2</sub> i atmosfæren stadig stige, men bare med en lavere stigningstakt. Dermed vil nogle givne klimaforandringer stadig ske, men blot på et senere tidspunkt. Stigningen af koncentrationen af CO<sub>2</sub> i atmosfæren kan således kun imødegås, hvis også optaget af CO<sub>2</sub> fra atmosfæren øges, og selv en væsentlig mindre menneskeskabt udledning af CO<sub>2</sub> skal derfor stadig modsvares af et tilsvarende øget optag.

De mest udbredte virkemidler til imødegåelse af klimaforandringerne har i dag fokus på at reducere de direkte udledninger af CO<sub>2</sub> fra menneskelig aktivitet, men via lagring af kulstof er der en række markante muligheder for at reducere den globale opvarmning ved at bringe andre virkemidler i spil. Øget lagring af kulstof er i IPCC's nyeste rapport (2018) et helt afgørende virkemiddel til at imødegå de værste klimaforandringer, og det vil reelt ikke være muligt at nå Parisaftalens mål uden en betydelig indsats for øget lagring af kulstof.

Dette notat beskriver og kvantificerer disse muligheder helt overordnet.

## Metoder til øget optag af CO<sub>2</sub>

Mulighederne for øget optag af CO<sub>2</sub> kan inddeles i to overordnede grupper:

1. Øget **optag af CO<sub>2</sub> der allerede er i atmosfæren** ved at:

- Øge det bundne kulstof i biomassen (de 550 gigaton i figur 1)
- Øge det bundne kulstof i jorden (de 2.300 gigaton i figur 1)
- Øge kulstofpuljen i det dybe ocean (37.000 gigaton i figur 1)

For denne gruppe er det muligt at øge bindingen af kulstof i den terrestriske biomasse ved at:

- Stoppe den nuværende udledning af CO<sub>2</sub> ved at stoppe skovrydning og reduktion af det eksisterende lager
- Stoppe udledning fra dyrkning og opdyrkning af landbrugsarealer
- Øge skovarealet og/eller det kulstof, der er bundet i eksisterende skovarealer
- Øge optaget af kulstof i landbrugsjorde
- Øge forvitring af bjergarter
- Øge optaget i oceanerne ved øget algevækst og naturlig deponering.

2. Øget **optag af CO<sub>2</sub> inden det udledes til atmosfæren** ved at:

- Indfange kulstof fra røgen fra fx fossile brændsler, afbrænding af biomasse og cementproduktion og lagre den i undergrunden - dvs. øge eller i hvert fald ikke reducere de 10.000 gigaton kulstof i "fossil pool" i figur 1 eller de 37.000 gigaton kulstof i "deep ocean".

For denne gruppe er følgende virkemidler mulige:

- Indfange CO<sub>2</sub> fra afbrænding af fossile brændsler, afbrænding af biomasse og cementproduktion til efterfølgende lagring (Carbon Capture and Storage, CCS)
- Indfange CO<sub>2</sub> direkte fra atmosfæren til efterfølgende lagring eller genanvendelse.

## Vurdering af klimapotentiale

Potentialet for direkte eller indirekte lagring med de ovenfor beskrevne grupper og virkemidler debatteres meget i den videnskabelige litteratur, og der er langt fra enighed om, hvor meget de enkelte metoder reelt kan bidrage med. Der er dog generelt enighed om, at de fleste af metoderne skal tages i brug i større eller mindre omfang, såfremt målene om at stabilisere klimaforandringerne skal nås.

### Kulstoflagring i skove

Udledningen fra skovrydning udgør i dag godt 10 % af den samlede globale udledning af drivhusgasser, hvor rydningen af tropisk skov er mest betydende. Rydningen sker som følge af øget efterspørgsel på landbrugsjord og øget efterspørgsel på træ til materialer og energi, herunder en øget efterspørgsel på vegetabiliske olier til energiformål.

Denne øgede efterspørgsel sker som følge af den globale befolkningstilvækst og den stigende økonomisk vækst, men til dels også fordi biomasse generelt betragtes som en god erstatning for fossile brændsler. Det er umiddelbart vanskeligt effektivt at hindre befolkningstilvæksten og den globale økonomiske vækst er også et udtryk for at rigtig mange mennesker i disse år rykker op i middelklassen. Det medfører bl.a. at fødevarerproduktionen forventes at skulle øges markant over de næste 50 år, hvilket forventes at øge presset på skovarealerne yderligere.

I FN's klimapanelers scenarier gælder det dog næsten uden undtagelse, at den udledning, der er fra skove og landbrug, skal ændres fra en markant udledning i dag til et markant netto-optag fremover. Det er altså en afgørende del af den globale klimaindsats, at udledningen fra skove ændres til et optag.

For at sætte udfordringen - men også potentialet - i perspektiv, vil et stop for skovrydning og anden ændring af arealanvendelse reducere den globale udledning med godt 10 %, hvilket svarer til udledningerne fra den samlede globale vejtransport.

Som mange scenarier peger på, skal skovrydningen imidlertid ikke bare ophøre, men skovarealerne skal globalt øges, samtidig med at lagringen i de eksisterende skove også øges. Både en reduktion i den eksisterende skovrydning, og et øget fremtidigt skovareal kræver en øget produktion på de eksisterende landbrugsjorde, en reduceret efterspørgsel på de biomasser, der medvirker til at drive skovrydningen (inkl. biomasse til energiformål) samt ændrede kostvaner globalt, da meget rydning af skov er direkte knyttet til den animalske produktion af især kødkvæg.

I den nyeste rapport fra FN's klimapanel (2018) er skovtilplantning et afgørende virkemiddel, og i visse af scenarierne udtages så meget som 30% af den eksisterende globale landbrugsjord til skov.

For at finde en realistisk øvre grænse for potentialet i øgede skovarealer kan man foretage det tankeeksperiment, at al skov, der er ryddet siden 1800-tallet retableres. Ifølge FAO er der siden år 1800 globalt ryddet knap 2 milliarder hektar skov, hvoraf ca. 1/3 er tempereret skov og resten tropisk skov. Før år 1800 er langt det meste ryddede skov tempereret skov.

Hvis man antager, at 1 hektar skov som globalt gennemsnit kan optage 10 ton CO<sub>2</sub> i 150 år (globalt varierer tallet meget afhængig af klima og skovtype, fra 3-20 tons CO<sub>2</sub>/år), er det globale potentiale for genplantning af så store skovarealer ca. 20 milliarder ton CO<sub>2</sub>e årligt, svarende til en reduktion i den globale udledning på 40 %.

Kunne dette lade sig gøre, er skovplantning altså et uhyre effektivt virkemiddel med meget store potentialer. I praksis er der dog i sagens natur store udfordringer i en så omfattende genplantning, da efterspørgsel på mad og biomasse og produktiviteten på de tilbageværende landbrugsjorde skulle ændres betydeligt.

Der er et historisk eksempel på, at genplantning af skov kan have en betydelig effekt. Nogle forskere har en teori om, at europæernes ankomst til Amerika i 1500-tallet slog ca. 90 % af den oprindelige befolkning ihjel via især medbragte sygdomme. Og da denne oprindelige befolkning havde et landbrug baseret på svedjebrug medførte dette en naturlig genplantning af skov på størrelse med Californien, som igen medførte et målbart fald i atmosfærens indhold af CO<sub>2</sub> på 6-10 ppm, hvilket muligvis var med til at udløse den såkaldte lille istid i middelalderen (Stanford University, 2008).

Et væsentlig øget skovareal kommer ikke blot fordi man beslutter det, men forudsætter at man får frigjort arealer til skov, mest sandsynligt ved en dramatisk øget produktion på eksisterende landbrugsarealer kombineret med ændrede globale kostvaner og en revurdering af brug af biomasse til energi og materialer. De samme overvejelser gælder i Danmark.

Danmark hører til blandt de skovfattede lande i verden, selvom den naturlige naturtype i Danmark er skov. Skov udgør i dag ca. 625.000 ha i Danmark, og Folketinget har i 1989 besluttet, at arealet skal fordobles inden 2100. Antages det, at skov i vækst i Danmark kan binde 6-10 ton CO<sub>2</sub> per ha i 150 år, vil en fordobling af skovarealet medføre en netto-reduktion i udledningen på op til 6,5 mio. ton CO<sub>2</sub> årligt, svarende til udledningen fra næsten alle danske personbiler. Så potentialet er meget højt.

Igen gælder dog, at dette kan medføre CO<sub>2</sub>-lækage fra manglende produktion, og derfor er det de lavproduktive jorde, der bør prioriteres til udtagning, og produktiviteten bør i givet fald sættes tilsvarende op på de øvrige landbrugsarealer for at undgå lækage.

## Kulstoflagring i landbrugsjord

Dyrkning af landbrugsjord udleder CO<sub>2</sub>, da gødsning og bearbejdning af jorden omdanner jordens indhold af kulstof til CO<sub>2</sub>, der så udledes til atmosfæren. Jo højere jordens indhold af kulstof er, jo højere er udledningen, og derfor udleder jorde med et højt organisk indhold (organiske jorde) relativt meget i forhold til de mineralske jorde. Ud fra et klimamæssigt synspunkt er opgaven derfor at stoppe denne udledning, og helst vende den, så jorden kan blive et såkaldt sink og optage mere kulstof end den udleder.

Udledning fra dyrkning af organiske jorde i Danmark kan være mere end 30 ton CO<sub>2</sub>e per hektar, mens udledningen fra de mineralske jorde typisk er en faktor 10-20 mindre. Den samlede udledning af kulstof fra de danske landbrugsjorde er mellem 3 og 6 mio. ton CO<sub>2</sub>e årligt (svarende til op mod 80 % af udledningen fra alle personbiler), hvoraf



størstedelen ikke indgår i opgørelserne for landbrugets udledning af drivhusgasser på grund af de politisk bestemte opgørelsesmetoder.

Det anslås, at udledningen fra landbrugsjorde ved tab af kulstof fra jorden udgør omkring 5 % af den samlede globale udledning af drivhusgasser (2,5 mia. ton ud af ca. 55 mia. ton). Hertil kommer udledning fra omsætning af kalk i jorden (også fra udspredd landbrugskalk) som følge af forsuring og som i kalkrige jorde også kan medføre en udledning. I betragtning af udledningens størrelse er det meget lidt opmærksomhed denne udledning hidtil har haft.

I IPCC's 1,5 og 2-graders-scenarier er denne udledning fra landbrugsjorde vendt fra en kilde til et sink, og man regner i den videnskabelige litteratur med, at det er realistisk at vende udviklingen fra en udledning på ca. 2,5 mia. ton CO<sub>2</sub>e til et optag på omkring 1,25 mia. ton CO<sub>2</sub>e/år, altså en samlet nettoreduktion i udledningen på 3,5-4 mia. ton eller 7-8 % af den samlede globale udledning (svarende til udledningen fra samtlige personbiler i verden).

Denne reduktion skal ske ved en mindre fjernelse af organisk stof fra markene (f.eks. fjernelse af halm til energi), ved efterafgrøder, prioritering af flerårige afgrøder, udvikling af nye sorter evt. via GMO, almindelig styring af produktionen, ophør af dyrkning af organiske jorde, pløjefri dyrkning osv. Alt sammen virkemidler, der kan falde ind under det, der kaldes "sustainable intensification". Større kulstoflagring lokalt kan også ske ved ekstensivering af driften med lavere udbytter til følge, men dette vil medføre en udvidelse af landbrugsarealet og dermed en større arealanvendelse, som kan give en endnu større netto-udledning af CO<sub>2</sub>.

Endelig kan man sandsynligvis øge lagringen ganske betydeligt ved at tilføre biokul (bi-ochar) til jorden. Biokul er typisk et restprodukt fra pyrolyse (en speciel form for forbrænding), men meget svært omsætteligt. Man kan fx lave pyrolyse på halm eller flis, udnytte ca. halvdelen af kulstoffet til energiformål (fx brændstoffer) og tilbageføre resten til jorden som lagring. Udvikling af dette kræver dog en betydelig forskning og udviklingsindsats, samt betydelige investeringer i anlæg og logistik. Det er også usikkert i hvor stort omfang teknologien kan skaleres globalt.

Samlet set kan det konkluderes, at det er relativt nemt at udlede store mængder CO<sub>2</sub> fra kulstof i jorden, men det er en meget langsom proces at opbygge kulstofpuljen i jorden igen. Hvis man eksempelvis konverterer et intensivt dyrket areal til vedvarende græs, som - bortset fra skov - regnes for en af de mest effektive plantedækker til lagring af kulstof, kan man optage mellem 0,4 og 0,8 ton kulstof per hektar årligt, svarende til omkring 2 ton CO<sub>2</sub> per hektar årligt. I dyrkede områder i omdrift – særligt hvis der indgår pløjning og intensiv jordbearbejdning - vil det potentielle optag være væsentlig lavere.

I Danmark har forsøg vist, at nedpløjning af halm og brug af efterafgrøder kan øge kulstofindholdet i jorden svarende til omkring 0,7 ton CO<sub>2</sub> per hektar årligt.

En mere effektiv mulighed for øget lagring, der også beskrives som realistisk i den videnskabelige litteratur, kan derfor være at øge intensiveringen på de bedste landbrugsjorde, for til gengæld at øge nettolagringen ved at frigive arealer til eksempelvis skov.

Derved kan den samlede lagring øges markant, da skov kan lagre i størrelsesorden 10 ton CO<sub>2</sub> per hektar årligt - eller mere end 10 gange så meget som en landbrugsjord i omdrift.

## Kulstoflagring i hav og dybe oceaner

Som det fremgår af figur 1 er der bundet meget store mængder kulstof i de dybe oceaner, af størrelsesorden 37000 milliarder ton, og oceanerne indeholder således en langt større pulje end f.eks. de fossile kulstoflagre. Dette har selvfølgelig ført til overvejelser om, hvorvidt det er muligt at reducere koncentrationen af CO<sub>2</sub> i atmosfæren ved at øge puljen af kulstof i de dybe oceaner.

En af de mest omtalte metoder til dette er ved gødskning af udvalgte dele af oceanerne med jern, typisk i form af mineralet olivin, der så sikrer en algeopblomstring, der igen trækker kulstof ud af de øvre dele af oceanerne og dermed i sidste ende af atmosfæren. Kulstoffet lagres i de dybe oceaner, når algerne dør og falder til bunds.

Der er store videnskabelige diskussioner om potentialet og konsekvenserne af metoden, hvis den implementeres i større omfang. Diskussionerne handler dels om mulige negative effekter på biodiversitet og fiskebestande, og dels om, hvorvidt metoden i sidste ende har en positiv nettoeffekt, da en lokal opblomstring af alger muligvis vil reducere opblomstringen andre steder, og dermed lagringen af kulstof andre steder i systemet. Dette må for nuværende siges at være uafklaret, og derfor er effekten og anvendelsen af metoden for nuværende usikker. Det er dog en metode der forskes i, og det kan ikke afvises, at metoden fremover kan spille en betydelig rolle, afhængigt af, hvor sikkert man kan beskrive og modellere de forskellige sideeffekter.

En anden lagringsmekanisme er tang, der er at betragte som skove under vandet, og dermed har samme effekter som skov på landjorden. Der er langt større usikkerheder om potentialet for lagring af kulstof i tang, og udvekslingen af kulstof mellem tangen og havbunden, herunder i hvor stort omfang der kan ske en øget metan-dannelse ved øget kulstoflagring på lave vanddybder. Samtidigt vil mætningspunktet for optagelse af kulstof i tang ske langt hurtigere end ved skove som kan øge optagelsen af kulstof i århundreder, mens tang formentlig skal tælles i årtier.

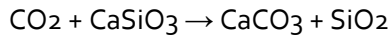
I Norge vurderes det, at kulstof bundet i tang langs de norske kyster svarer til ca. 30 mio. ton CO<sub>2</sub>, og at en genetablering af tangen, hvor den er forsvundet pga. forurening, fiskeri og afgræsning af søpindsvin vil kunne øge optaget svarende til et niveau som de norske skove.

Dermed er det globale potentiale sandsynligvis meget stort, men øget tangvækst vil generelt kræve områder, der er uforstyrret af fiskeri og klart vand med store sigtedybder, hvilket vil kræve meget lange tidshorisonter at opnå og store restriktioner for fiskeriet. Derfor er det et virkemiddel, der vil tage meget lang tid af få etableret, jævnfør fx de danske udfordringer med at genetablere ålegræsset. Da tang over hele verden er presset i dag af netop fiskeri, ringe sigtedybde og invasive arter som søpindsvin, er udfordringen snarere at stoppe den udledning, der i dag sker på grund af en vedvarende reduktion af verdens tangskove.

## Øget forvitring af bjergarter

Forvitring af bjergarter af en af de reguleringsmekanismer, der naturligt regulerer CO<sub>2</sub>-koncentrationen i atmosfæren, og i geologiske tidshorisonter er dette en meget effektiv reguleringsmekanisme.

Ved forvitring af eksempelvis silikatbjergarter som granit dannes kridt efter formlen



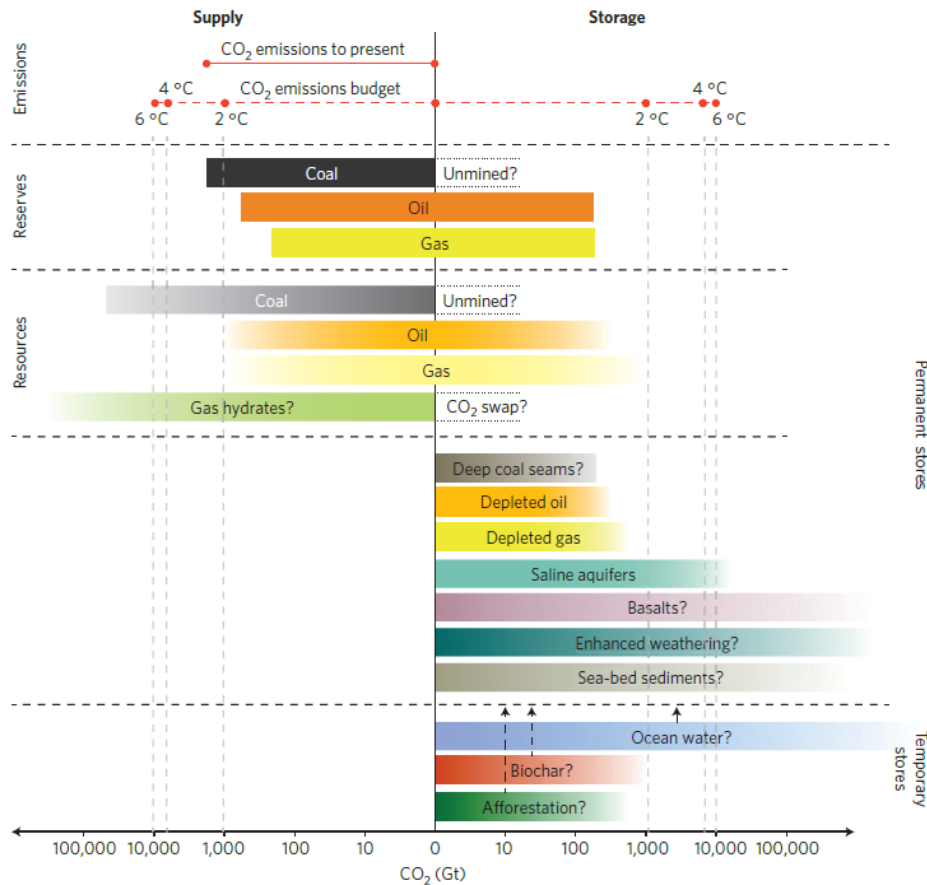
og altså en binding af CO<sub>2</sub> som karbonat i kalk, der ender som lagring af kulstof i de dybe oceaner. Jo højere CO<sub>2</sub>-indhold i atmosfæren jo større er denne nedbrydning, hvilket i geologiske tidshorisonter dermed udgør en naturlig regulering af CO<sub>2</sub>-koncentrationen i atmosfæren. Den naturlige fjernelse af kulstof fra atmosfæren via forvitring vurderes at ligge på omkring 0,2 Gt/år, og altså ca. 1/50 af den menneskeskabte udledning af kulstof. Der er videnskabelig diskussion om, hvorvidt man kan øge forvitring, bl.a. ved aktiv eksponering af det gletsjersand, der frigives ved afsmeltning af gletsjere, gennem udspreddning på landbrugsjord. Under alle omstændigheder er omsætningen så lille i forhold til udledningen og processen så langsom, at metoden næppe størrelsesmæssigt vil kunne få nogen særlig betydning.

## Indfangning og lagring af CO<sub>2</sub> ved afbrænding af kulstof (CCS)

Carbon Capture and Storage (CCS) er et begreb, der dækker over flere forskellige teknologier, som alle har det tilfældes, at de indfanger CO<sub>2</sub> fra røggasser eller atmosfæren og lagrer denne i undergrunden. Med denne teknologi kan man altså øge "Fossil Pool" i figur 1.

CCS-teknologien er bl.a. af FN's Klimapanel blevet betegnet som en af de vigtigste teknologier overhovedet i bekæmpelse af klimaforandringer. Det skyldes at potentialet er meget stort, det er den eneste teknologi, der realistisk kan begrænse udledningen fra højtemperaturindustri og cementindustri, og det er en af de få teknologier, der giver mulighed for negative udledninger, som er helt nødvendige for at nå 1,5- 2-gradersmålet. CCS er således en teknologi, som er helt nødvendig at udvikle og anvende i endog meget stor skala.

Lagringspotentialet for CO<sub>2</sub> i undergrunden er meget stort, og potentielt rigeligt stort til, at man teoretisk kan lagre hele den menneskeskabte udledning, se figur 2.



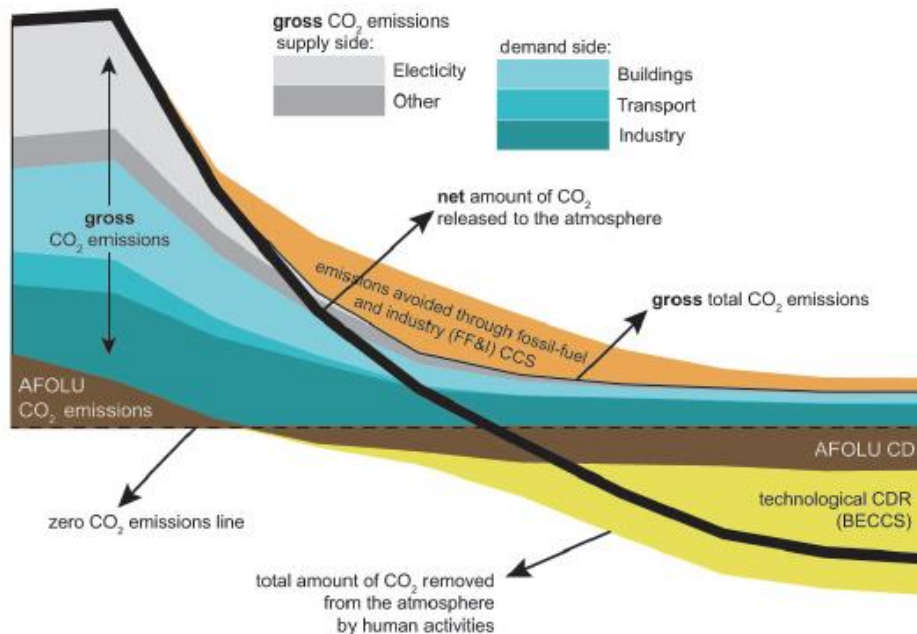
Figur 2: Størrelsen af potentielle globale lagre for CO<sub>2</sub> i forhold til størrelsen af de samlede fossile reserver fordelt på permanente og midlertidige lagre. Bemærk at x-aksen er logaritmisk. Figuren viser, at det samlede lagringspotentiale er betydeligt større end de samlede fossile reserver. Kilde: Scott et al. (2015).

Også i de nordiske lande og i Danmark er der endog betydelige muligheder for lagring af CO<sub>2</sub>. I et nordisk projekt (NORDICCS) er mulighederne for at lagre CO<sub>2</sub> i undergrunden undersøgt ret grundigt. Her vurderes det, at alene i Danmark udgør de potentielle lagre, der vurderes som meget velegnede at have en kapacitet på ca. 20.000 mio. ton CO<sub>2</sub>, svarende til ca. 600 års udledning fra Danmark, mens det potentielle lager i Norge er 3 gange så højt. Af de skandinaviske lande er det kun Norge, der aktivt investerer i teknologien, omend den tidligere danske regering i 2018 erkendte, at de danske mål næppe kan nås uden at teknologien også tages i anvendelse i Danmark, og i den forbindelse øremærkede midler til forskning og udvikling.

Der er flere forskellige typer af lagre i undergrunden, fx udtømte olie og gas-felter, dybe saltholdige grundvandsmagasiner og opsprækket basalt, hvor der samtidig sker en mineralisering af CO<sub>2</sub> så den er permanent lagret i form af karbonater.

Teknologierne er tilgængelige i dag, og der er ca. 20 større kommercielle anlæg i drift. Udfordringerne for teknologierne er primært offentlig og politisk opbakning og finansiering, da teknologierne kun i meget begrænset omfang støttes som fx forskellige vedvarende energi-teknologier. Derfor er teknologierne afhængige af en høj CO<sub>2</sub>-pris eller af at kunne sælge den indfangede CO<sub>2</sub> til forskellige formål, herunder til at øge produktionen i olie og gasfelter.

Dette er uheldigt og giver anledning til megen kritik fra forskellige klimaforskere, da teknologien er helt nødvendig for at imødegå klimaforandringerne. Behovet for udvikling og udbredelse af CCS-teknologierne må derfor betegnes som akut, hvilket særligt aktualiseres i IPCC's seneste 1,5 graders-rapport, hvor CCS betragtes som afgørende for at nå klimamålet, da CCS kan generere de nødvendige negative udledninger (figur 3).



Figur 3. Figuren viser den fremtidige udledning i dette århundrede for at opfylde 1,5 grads målet. Som det fremgår skal udledning fra skove og arealanvendelse (AFOLU) ændres fra en kilde til et optag ret hurtigt (brun), udledninger fra fossile brændsler og industri skal håndteres via CCS (orange), og store mængder CO<sub>2</sub> skal fjernes direkte fra atmosfæren og lagres i undergrund og skov (gul og brun). I midten af dette århundrede skal den samlede udledning være negativ. Kilde: IPCC (2018).

En variant af CCS er at man i stedet for lagring anvender den indfangede CO<sub>2</sub> til brug i materialer eller brændstoffer. Dette har ikke samme positive effekt som en egentlig lagring, men har en forsinkende effekt på udledningen, som også kan være positiv.

Den potentielt negative udledning via CCS kan ske ved at anvende teknologien på afbrænding af særligt udvalgte typer af biomasse (additional biomasse dyrket på nye arealer), som netto vil kunne give en negativ udledning, og altså fjerne CO<sub>2</sub> fra atmosfæren og lagre den i undergrunden, og altså øge "Fossil Pool" i figur 1.

En særlig variant af CCS under udvikling er at hive CO<sub>2</sub> direkte ud af atmosfæren til efterfølgende lagring eller produktion. Teknologien kaldes DAC (Direct Atmospheric Capture) og CO<sub>2</sub>'en kan efterfølgende lagres eller anvendes til materialer eller brændstoffer.

De første kommercielle anlæg af denne type er ved at blive igangsat, bl.a. i Schweiz, hvor CO<sub>2</sub>'en dog sælges til industrielt brug og i Island, hvor CO<sub>2</sub>'en mineraliseres ved injektion i basalt. Fordelen er, at de kan indfange CO<sub>2</sub> direkte fra atmosfæren, og dermed ikke blot CO<sub>2</sub> udledt fra centrale kilder som industri og kraftværker, men også fra f.eks. mobile kilder som transportsektoren.

Ulempen er, at de er relativt energikrævende i brugen af både termisk og elektrisk energi. Antager man, at bygger et atomkraftværk på 1Gwe, hvor varmen og elproduktionen alene skal drive et af de nuværende DAC-anlæg, vil en sådan kombination med den eksisterende teknologi kunne fjerne ca. 13 mio. ton CO<sub>2</sub> fra atmosfæren per år (til lagring eller til brændstofproduktion) svarende til lidt mere end udledningen fra den samlede danske transportsektor. Dermed bliver det teoretisk indirekte muligt for transportsektoren og flysektoren at køre på hvilken som helst form for energi, og teoretisk kan denne teknologi vise sig at være konkurrencedygtig med andre former for tiltag. Anlægget kan i princippet placeres hvor som helst på jorden, hvorfor det vil være egnet i et certifikat-marked. Aktørerne indenfor teknologien forventer at de kan få prisen et stykke under 100 \$ per fjernet ton CO<sub>2</sub>, hvilket vil gøre den konkurrencedygtig i forhold til mange andre teknologier samtidig med, at løsningen er global skalerbar.

## Vurdering af drivkræfter og barrierer

Som det fremgår af ovenstående gennemgang er der meget store klimapotentialer i en aktiv udnyttelse af lagringspotentialer i både de naturlige virkemidler og de mere tekniske eller kombinationer heraf. I de forskellige klimascenarier fra FN's klimapanel er de forskellige lagringsteknologier da også helt afgørende for at nå målene, og har mindst samme betydning som eksempelvis udbredelsen af sol- og vindenergi.

Alligevel har teknologierne endnu relativt begrænset politisk opmærksomhed. Dog har den seneste 1,5 graders-rapport fra klimapanelet øget den politiske interesse, også fra den danske regering, fordi rapporten understreger, at klimamålene ikke kan nås uden CCS og negative udledninger. Grundene til dette er flere:

For det første har de naturlige lagringsmetoder ikke umiddelbart de samme økonomiske og beskæftigelsesmæssige effekter som eksempelvis sol- og vindenergi, og de kan måske ligefrem have en erhvervsmæssig omkostning. Det kan eksempelvis være i forhold til landbrugsinteresser, da krav om øget lagring i landbrugsjord kan være en restriktion i forhold til en given landbrugsdrift, som i hvert fald på kort sigt kan være en omkostning for erhvervet eller samfundet i form af kompensation.

Et godt eksempel i Danmark er de store udfordringer med at stoppe dyrkningen af de organiske jorde, uanset at mange analyser viser, at dette er et billigt og helt nødvendigt tiltag. Øget lagring i skove kan også være i konflikt med skovbrugsinteresser, og den øgede brug af biomasse i energisektoren kan også være i konflikt med et øget fokus på lagring i skove, hvilket bl.a. afspejles i den danske debat om udlægning af uberørt skov.

For binding i havet og de dybe oceaner er udfordringen, at nettoeffekten af disse tiltag videnskabeligt er uafklaret, og at man derfor ikke ved om disse tiltag samlede vil have en positiv effekt på klimaet. Derfor er det ikke tiltag som i øjeblikket er modne til at blive taget i anvendelse. Det samme gælder øget forvitring af bjergarter, hvor der også er usikkerhed omkring størrelsen af det samlede potentiale og hastigheden for hvor meget og hvor hurtigt det reelt kan virke. Disse teknologier har måske potentiale på Grønland, men umiddelbart ikke på dansk areal.

For de forskellige CCS teknologier er barriererne mod udvikling og implementering af teknologierne langt mere komplekse og udbredte. Overordnet kan man sige, at interesserne for CCS i den fossile branche er dobbelttydig. På den ene side kan CCS gøre afbrænding af fossile brændstoffer forenelig med en ambitiøs klimamålsætning, men på den anden side vil implementering af CCS gøre brugen af fossile brændsler dyrere og dermed reducere konkurrenceevnen og forbruget, hvilket isoleret set ikke er i branchens kortsigtede interesser. Der synes derfor at være en holdning i branchen om, at CCS kan blive aktuelt "når lokummet for alvor brænder". Netop forholdet omkring pris og konkurrencedygtighed gør derfor, at det generelt er holdningen, at en stor udbredelse af CCS fordrer en høj og måske global CO<sub>2</sub>-pris.

Endelig har der traditionelt været en modstand mod CCS, som angiveligt skyldes en frygt for, at teknologien skulle konkurrere med andre potentielt mere bæredygtige teknologier. Men igen har klimapanelets seneste rapport opblødt denne modstand.

Disse interessekonflikter gør reelt, at den politiske opbakning til CCS er relativt begrænset, uagtet at bl.a. FN's klimapanel mener, at CCS er helt nødvendig for at nå klimamålene, og måske er den vigtigste enkeltstående teknologi til at nå disse. Dette forstærkes yderligere af nødvendigheden af egentlige negative udledninger.

Så uagtet at videnskaben betragter CCS-teknologien og andre lagringsteknologier som helt afgørende i en klimamæssig sammenhæng, er der endnu ikke den nødvendige interesse for at udvikle og implementere dem.

## Anbefalinger

Der er et åbenlyst og akut behov for, at de forskellige lagringsteknologier, hvad enten disse er naturlige eller mere tekniske får samme relative betydning i forhold til deres klimapotentialer som andre virkemidler, og dermed bliver væsentligt højere prioriteret.

Skal lagringsteknologierne i spil kræver det en holdningsændring omkring deres nødvendighed. Hos politikere og erhvervsorganisationer bør det erkendes, at de nødvendige klimatiltag isoleret set ikke altid går hånd i hånd med øget økonomisk eller beskæftigelsesmæssigt potentiale.

Lagringsteknologierne er i vid udstrækning også afhængige af en høj CO<sub>2</sub>-pris, hvilket også er et politisk ansvar. I mangel af en høj CO<sub>2</sub>-pris skal lagringsteknologierne prioriteres i målsætningerne som man kender det fra fx VE-mål. Dette kunne være dedikerede mål om, at en given andel af en CO<sub>2</sub>-reduktion skal ske gennem en given teknologi, fx øget lagring i skov og jord og en given andel af CCS i det samlede reduktionsmål.

Dertil kommer, at disse teknologier får øremærket en større andel af forskningsmidlerne, der afspejler den betydning lagringsteknologierne har for at opnå klimamålene. I praksis vil dette betyde samme adgang til forsknings- og udviklingsmidler som fx vedvarende energi-teknologier.

## Kilder

DCE (2019): Denmark's National Inventory Report. Scientific Report from DCE – Danish Centre for Environment and Energy, 2019

<http://dce.au.dk/en/publications/scientific-reports/nr-301-350/abstracts/no-318-denmarks-national-inventory-report-2019-emission-inventories-1990-2017/>

FAO (2016): State of the World's Forests

<http://www.fao.org/publications/sofo/en/>

Grassi et al. (2017): The key role of forests in meeting climate targets requires science for credible mitigation

<https://www.nature.com/articles/nclimate3227>

IPCC (2018): Special report: Global Warming of 1.5 C

<https://www.ipcc.ch/sr15/>

IPCC (2014): AR5

[www.ipcc.ch/report/ar5](http://www.ipcc.ch/report/ar5)

National Academies of Sciences (2019): Negative Emissions Technologies and Reliable Sequestration: A Research Agenda

<https://www.nap.edu/catalog/25259/negative-emissions-technologies-and-reliable-sequestration-a-research-agenda>

Nordiccs

<https://www.sintef.no/en/projects/nordiccs-nordisk-ccs-kompetansesenter/>

Oertel et al. (2016): Greenhouse gas emissions from soils—A review

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0009281916300551>

Poepflau et al. (2015): Carbon sequestration in agricultural soils via cultivation of cover crops – A meta-analysis

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0167880914004873>

Scott et al. (2015): Fossil fuels in a trillion tonne world

<https://www.nature.com/articles/nclimate2578>

Sommer et al. (2014): Dynamics and climate change mitigation potential of soil organic carbon sequestration

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301479714002588>

Stanford University (2008): New World Post-pandemic Reforestation Helped Start Little Ice Age

<https://www.sciencedaily.com/releases/2008/12/081218094551.htm>

U.S. Department of Energy, Office of Science (2008): Carbon Cycling and Biosequestration. Integrating Biology and Climate Through Systems Science

<https://genomicscience.energy.gov/carboncycle/report/>

World Resources Institute (2018): Technological Carbon Removal in the United States

<https://www.wri.org/publication/tech-carbon-removal-usa>





CONCITO er en uafhængig tænketank, der formidler klimaviden og -løsninger til politikere, erhvervsliv og borgere.

Vores formål er at medvirke til en lavere udledning af drivhusgasser og en begrænsning af skadevirkningerne af den globale opvarmning.