

BILAG 14: Trykstigninger og fortrængning af vand

Fra Hoveddokumentet

CSK skrev under Påstand 3, punkt 1: *"Flere studier viser, at risikoen for seismisk aktivitet ved CO2 lagring er ekstrem lav. Lagring sker i dybtliggende seismiske formationer, hvor trykket forbliver stabilt og CO2 spredes langsom i porøse bjergarter uden at skabe pludselige trykstigninger."*

Dette er ikke korrekt. Trykket forbliver **ikke stabilt** og mere eller mindre pludselige **trykstigninger forekommer**.

Fra Påstand 3, punkt 1 (vores svar):

Her må vi henvise til CCS projektet In Salah i Algier, hvor man bl.a. målte 25 mm landhævninger på hele overfladen over reservoiret. Det kom bag på myndigheder og virksomhederne bag anlægget, heri blandt Equinor.

"There was an excellent match between the 3D seismic data and existing geological knowledge from gas production. The remaining risks were considered to be "minimal/ low..."

..."From 2009, however, the CO2 pressure in the deposit began to rise unexpectedly rapidly..."

"...As a result, the pressure became so high that it caused the first cracks to appear in the cap rock, which is supposed to prevent the CO2 from reaching the surface."

Det må betragtes som en decideret usandhed, at der ikke sker (pludselige) trykstigninger. Selv GEUS modsiger denne påstand, for eksempel i notat af 27/10-2025.ⁱ

Fra Påstand 3, punkt 2 (vores svar):

Alt går ikke som aktørerne forventer og teorien foreskriver:

Jvf. det lige omtalte In Salah CCS projekt i Algier, der måtte lukke ned i 2011 mange år før tid pga. store trykstigninger i lagringsreservoiret. Nedpumpning af store mængder CO2 førte til mekanisk brud på den klippeforsegling, der skulle holde CO2 på plads i undergrunden.ⁱⁱ

Gorgon's CCS projekt i Australien har også (udover udbredt korrosion i produktionsudstyret) kæmpet med store trykstigninger som følge af nedpumpning af store mængder CO2 i lagringsformation under øen Barrow Island, et sandstensreservoir. CO2'en fortrængte ikke vandet gradvist til fordel for gassen og trykket udlignedes ikke over tid, sådan som "teorien" for CO2 lagring – som fx. fremført af GEUS – hævder det vil ske.ⁱⁱⁱ

De Australske myndigheder beordrede injektionshastigheden nedsat til 1/3 af anlæggets kapacitet (4 mio. tons årligt) af frygt for strukturelle skader på CO2 lageret og ineffektiv trykstyring.^{iv} Myndighederne beordrede endvidere opsætning af yderligere seismisk måleudstyr for at overvåge risiko for jordskælv.^v

Trykstyring: CO2 ned - Vand op

Trykstyringen v. Gorgon projektet foregår ved, at store mængder formationsvand bliver pumpet op til jordoverfladen for at give plads til CO₂ i undergrunden. Et nyt problem melder sig: reinjektion af vandet – hvor skal man gøre af det? Det kan give hovedbrud! En del af det oppumpede tunge vand, ”brine”^{vi}, bliver reinjiceret i det udtømte oliefelt ”Barrow Group”, der ligger ovenover formationen ”Dupuy”, hvor der lagres CO₂. Men problemerne med trykstyringen er forsat ikke løst.^{vii}

Se mere i Bilag 1 og Bilag 5.

Trykstyring i Havnsø-strukturen?

CSK nævner intet steds noget om effekten af de over 400 millioner m³ vand, der i udgangspunktet skal fortrænges, hvis der pumpes 300 millioner tons CO₂ ned (over ca. 30 år)^{viii}.

Her forudsætter CSK tilsyneladende, at CO₂’en gradvist fortrænger vandet til fordel for gassen, hvilket ikke nødvendigvis er tilfældet. Vandet fortrænges ikke momentant – og vandfortrængningen eller manglen på samme har i tilfældet Gorgon betydet store trykstigninger, underminering af økonomien i projektet og de lovede klimagevinster er udeblevet.

For nylig er det kommet frem, at en forsker, branchekilder og en tidligere medarbejder underkender Danmarks officielle estimater for CO₂ lagring i den danske undergrund, som GEUS har stået for at levere.

GEUS har nu nedjusteret sit estimat for CO₂ lagerkapacitet fra de oprindelige 12 mia tons CO₂ til 3 mia. tons – men kritikere mener også dette tal er for højt. GEUS skriver om baggrunden for de nedjusterede tal, at ”den praktiske lagringskapacitet fastlægges først gennem detaljerede undersøgelser af konkrete strukturer og afhænger af dynamiske forhold som trykstyring og brøndplacering”^{ix}

Det oprindelige estimat på 12 mia. synes at være et rent teoretisk statisk tal uden forbindelse til den praktiske virkelighed. Den kraftigt nedjusterede lagerkapacitet kommer sig af, at tallet for, hvor meget porerne i laget af sandsten kan fyldes med, var sat urealistisk højt – til 40 pct.; det nu er reduceret til 10 pct. Også 10 pct findes af kritikerne at være langt fra virkeligheden. Dertil kommer, at GEUS tilsyneladende først nu er blevet opmærksom på, at trykstigninger ved injektion af CO₂ er en begrænsende faktor for, hvor meget CO₂ der kan pumpes ned i undergrunden.^x

Karen S. Pedersen, Kapexy, undrer sig: ”Det kan overraske, er, at GEUS ikke tidligere har været opmærksom på, at CO₂-injektion medfører en trykstigning, men det kan skyldes, at GEUS har lænet sig op af erfaringer fra EOR-projekter, hvor CO₂ har været injiceret i et delvist udtømt oliefelt, og der derfor var god plads til CO₂”. Eller ”Måske var GEUS ikke klar over, at CO₂’s opløselighed i vand er lav, hvorfor størstedelen af CO₂en er at finde som fri CO₂”^{xi}

Det vides ikke, om GEUS er blevet bedt om at levere disse overoptimistiske tal eller de selv har stået for det - eller det skyldes faglig uvidenhed. Under alle omstændigheder har overvurderingen været med til at ”sælge” ideen og udnævne CO₂- lagring som Danmarks vigtigste klima-fix, med næsten 100 procents politisk enighed.^{xii}

ChatGPT konversation

Forbehold: Vi har flere gange oplevet forkerte og utilstrækkelige svar fra ChatGPT.

ChatGPT har i denne "konversation" ikke angivet kilder for "sine udtalelser", hvilket forringer troværdigheden. Vi har ikke haft tid til at tjekke alle udtalelser med kilder, men der er heller **ikke tale om essentielle konklusioner, som vi har brugt i vores argumentationer.**

Vi har selv rettet lidt på sproget (til bedre dansk) med den risiko for fejl, det måtte introducere.

Det er ikke desto mindre interessant læsning, men skal tages med ovenstående forbehold. Og vi har senere stillet de to første spørgsmål igen med anmodning om kildeangivelser, se ChatGPT konversation 2.

ChatGPT kommer med følgende forklaring på trykstigningen og vandfortrængningen:

Spørgsmål: Hvad sker der, når CO₂ i kritisk form kommer i forbindelse med saltvand?

Når **CO₂ i kritisk form** (superkritisk CO₂) kommer i kontakt med **saltvand**, sker der komplekse kemiske og fysiske processer, som har betydning for f.eks. **geologisk CO₂-lagring** og miljøet. Her er en gennemgang af de vigtigste processer:

1. Superkritisk CO₂: Egenskaber

- Ved **31,1°C og 73,8 bar** går CO₂ ind i en superkritisk tilstand, hvor det opfører sig som både gas og væske.
- Superkritisk CO₂ har høj diffusionsevne og kan trænge igennem porøse materialer som væske, men fylder større volumen som gas.

2. Opløsning i saltvand (brine)

Når superkritisk CO₂ kommer i kontakt med saltvand, sker der en række interaktioner:

1. Opløsning af CO₂ i vand:

- Noget af CO₂ opløses i saltvandet og danner kulsyre (H₂CO₃), som derefter kan dissociere til bikarbonat (HCO₃⁻) og karbonat (CO₃²⁻):
 - $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{H}_2\text{CO}_3 \rightleftharpoons \text{H}^+ + \text{HCO}_3^- \rightleftharpoons 2\text{H}^+ + \text{CO}_3^{2-}$
- Denne opløsning sænker pH-værdien, hvilket gør vandet mere surt.

2. Ionisk interaktion og salinitet:

- Saltindholdet i vandet kan påvirke, hvor meget CO₂ der kan opløses. Jo højere salinitet, desto lavere er opløseligheden af CO₂. Dette skyldes en konkurrence mellem saltets ioner (som Na⁺ og Cl⁻) og CO₂-molekyler om at opløses i vandet.

3. Syre-baserede reaktioner med mineraler:

- I et geologisk miljø kan den syre, der dannes (fra CO₂), reagere med **minerale** i klippen (f.eks. kalksten og feldspat). Disse reaktioner kan frigive ioner som calcium (Ca²⁺), magnesium (Mg²⁺) eller jern (Fe²⁺).
- Over tid kan disse reaktioner føre til dannelsen af **karbonatminerale** (som CaCO₃), hvilket er en form for permanent CO₂-lagring.

3. Fysisk påvirkning af væskernes faser

- **Faseændringer:** Hvis temperaturen eller trykket ændres, kan den superkritiske CO₂ ændre fase til gas eller væske. Dette kan føre til dannelse af CO₂-bobler i saltvandet, hvilket påvirker opløsning og transport.
- **Tæthedsstrømning:** Når CO₂ opløses i saltvand, bliver væsken tungere, da opløst CO₂ øger densiteten. Dette kan føre til **konvektionsstrømme**, som hjælper med at blande CO₂ dybere i vandet.

4. Relevans i geologisk CO₂-lagring

- I forbindelse med **CO₂-lagring i undergrunden** (f.eks. i gamle oliereservoirs eller akviferer) er interaktionen mellem CO₂ og saltvand kritisk. Processerne bidrager til:
 - **Opløsningslagring:** CO₂ opløses i saltvandet, hvilket reducerer risikoen for, at det lækker tilbage til overfladen.
 - **Minerallagring:** Langsomme kemiske reaktioner binder CO₂ i faste karbonatminerale, hvilket giver en sikker og permanent lagring.

Konklusion

Når superkritisk CO₂ møder saltvand, opløses noget af det, hvilket ændrer både pH-værdien og vandets kemi. Disse processer kan føre til yderligere reaktioner med mineralske stoffer og øge væskens tæthed. Forståelsen af disse interaktioner er vigtig for CO₂-lagring og andre geokemiske processer i naturen, da de bidrager til stabilisering og mulig immobilisering af kuldioxid over lange tidsperioder.

Spørgsmål: Hvis man pumper superkritisk CO₂ ned i akviferer, så vil CO₂en altså blande sig med saltvandet. hvor meget og hvor hurtigt vil det blande sig og hvor meget vand skal i stedet fortrænges?

Spørgsmålet går lige til kernen af **CO₂-lagring i saltlagefyldte akviferer**, og svaret kræver, at man både forstår **fysikken** og **kemien** i systemet.

1. Grundlæggende proces

Når man pumper **superkritisk CO₂ (scCO₂)** ned i en **salin akvifer** (porøs sten fyldt med saltvand, typisk 800–3000 m under overfladen):

- CO₂ er lettere end vand og **stiger opad**, indtil den rammer et tæt lag (en **cap rock**).
- Den superkritiske CO₂ vil **ikke straks blande sig homogent** med saltvandet — i stedet danner den en **separeret fase**, der ligger oven på saltlagen.
- Med tiden vil en del af CO₂'en **opløses gradvist** i saltvandet.

2. Hvor meget CO₂ opløses i vandet?

Opløseligheden afhænger af **tryk, temperatur og salinitet**.
Typiske forhold for CO₂-lagring:

Parameter Typisk værdi

Dybde 1–3 km

Tryk 100–300 bar

Temperatur 40–100 °C

Salinitet 30–100 g/L

 Under disse forhold:

- **Opløselighed:** ca. **20–50 kg CO₂ pr. m³ vand** ($\approx 2\text{--}5$ vægt%)
- Det svarer til, at **1 m³ vand** kan opløse **omkring 10–25 m³ CO₂** ved overfladetryk (fordi CO₂ er meget komprimeret nede i dybden).

Men kun **en lille del** af den injicerede CO₂ opløses hurtigt. Det meste forbliver som en separat scCO₂-fase i mange år.

3. Hvor hurtigt blandes CO₂ og saltvand?

Der er tre tids- og proces-skalaer:

1. Sekunder til timer – injektion og fortrængning:

CO₂ fortrænger vandet lokalt omkring brønden. Dette er en **immiscibel (ikke blandbar) fortrængning**, hvor CO₂ fylder porerne og presser vandet væk.

- Fortrængningseffektiviteten er typisk 30–70 % afhængigt af stens porøsitet og heterogenitet.

2. År til årtier – opløsning ved diffusion og konvektion:

- I begyndelsen sker opløsningen langsomt, kun ved **diffusion** (meget lille effekt).
- Efter noget tid bliver vandet tættere, når det opløser CO₂ — det fører til **tæthedsdrevet konvektion** (“fingers”), hvor CO₂-rigt vand synker og blandes mere effektivt.

- Denne proces kan tage **hundreder til tusinder af år** for fuld opløsning, afhængigt af akviferens størrelse og porøsitet.
3. **Titusinder til millioner af år – mineralisering:**
- CO₂ reagerer med mineraler og danner faste karbonater. Dette er meget langsomt, men permanent.

4. Hvor meget vand fortrænges?

Superkritisk CO₂ har en **densitet på ca. 600–800 kg/m³**, mens vand har ca. **1000 kg/m³**. Da CO₂ er lettere, vil det **delvist fortrænge saltvandet** opad og udad.

Et overslag:

- Ved injektion af 1 ton CO₂ (~1,3–1,7 m³ scCO₂) vil du typisk **fortrænge 1,3–2 m³ vand** i lokalområdet omkring brønden.
- I praksis vil kun 10–20 % af CO₂-volumenet i reservoiret være rent CO₂-fyldt porerum — resten bliver vandmættet eller CO₂-opløst.

5. Opsummering i tal

Proces	Tidsramme	Andel af CO ₂	Kommentar
Fysisk fortrængning	minutter–dage	100 %	Vand fortrænges lokalt af CO ₂
Opløsning i vand	år–tusinder	10–30 %	Opløses i vand via diffusion og konvektion
Mineralisering	10 ⁴ –10 ⁶ år	5–15 %	Fast karbonatdannelse i sten

Eksempel

I et typisk reservoir (porøsitet 20 %, tykkelse 100 m, areal 10 km²):

- Volumen = 10 × 10⁶ m² × 100 m = 10⁹ m³ (brutto)
- Porerum = 0,2 × 10⁹ m³ = 2 × 10⁸ m³
- Man kan lagre ca. 1/3 i superkritisk fase → ~7 × 10⁷ m³ scCO₂
= ca. **40 millioner ton CO₂**

Kun en del af dette opløses (langsigtet), men systemet er stabilt, da CO₂ holdes fanget under tæt kaprock og gradvist opløses i brinen.

Kort sagt:

- **CO₂ og saltvand blander sig kun langsomt**; først dannes to adskilte faser.
- **Opløsningen** sker over århundreder, men **fortrængningen** af vand sker straks.
- Hvor meget CO₂ der opløses, afhænger af tryk, temperatur og saltindhold, men maksimalt ~5 % af vandets masse.

Spørgsmål: Hvor meget vand er der så blevet fortrængt i dit eksempel med 40 mt lageret?

 Udgangspunkt (fra eksemplet)

Vi havde et typisk geologisk CO₂-lager:

- **Lagerkapacitet:** 40 millioner ton CO₂ (= 40 × 10⁶ ton)
 - **Densitet af superkritisk CO₂ (scCO₂):** ca. 700 kg/m³
 - Vi antager, at CO₂ fylder **en separat fase** i porerummet, som fortrænger noget af saltvandet.
-

 Trin 1: Find volumen af den injicerede CO₂

$$V_{CO_2} = \frac{m_{CO_2}}{\rho_{CO_2}}$$

$$[V_{CO_2} = \frac{40 \times 10^9 \text{ kg}}{700 \text{ kg/m}^3} = 57,142,857 \text{ m}^3 \approx 5.7 \times 10^7 \text{ m}^3]$$

→ altså omkring **57 millioner m³ superkritisk CO₂** i reservoiret.

 Trin 2: Hvor meget vand bliver fortrængt?

Superkritisk CO₂ fortrænger omtrent **det samme volumen af vand**, fordi begge væsker fylder porerummet, men CO₂ er lettere (lavere densitet).

Så:

$$V_{\text{vand, fortrængt}} \approx V_{CO_2}$$

→ **Ca. 57 millioner m³ saltvand** fortrænges fra porerummene, mens CO₂ bevæger sig ind.

 Trin 3: Forholdet til reservoirtvolumen

Fra tidligere eksempel:

- Porerum (total): 2 × 10⁸ m³
- CO₂ fylder ca. 7 × 10⁷ m³ (≈ 35 % af porerummet)

Så ca. **en tredjedel af det lokale porerum** bliver udfyldt af CO₂ i den del af akviferen, hvor injektionen foregår.

4. Oversættelse til vandmængde

57 millioner m³ vand svarer til:

$$57 \times 10^6 \text{ m}^3 = 57 \text{ milliarder liter}$$

Eller i

mere håndgribelig skala:

- $\approx 23,000$ olympiske svømmebassiner (et bassin $\approx 2,500 \text{ m}^3$)
- $\approx 0,057 \text{ km}^3$ vand

[TILFØJELSE: Køge Bugt indeholder cirka 4,6 milliarder m³ vand ~ 4.600 mia. liter. Hvis der sættes på 1 mia tons på tværs af Danmark, så skal der fortrænges 1.425 mia liter. Hvis der for Havnsø planlægges med 300 mio tons CO₂, skal der fortrænges 427 mio. m³ vand eller mere end 170.000 olympiske svømmebassiner fuld.]

5. Men i praksis ...

Det fortrængte vand bliver **ikke “skubbet ud” af hele akviferen**, men snarere:

- **Flyttes lokalt** omkring injektionsområdet, hvor trykket stiger.
- En del vand presses **ud i nærliggende porer** eller **opad i reservoiret**.
- Nogle steder kan vand trænge op i overliggende lag (hvis der findes hydrauliske forbindelser).

Derfor er den **fysiske volumenfortrængning ca. lig CO₂-volumenet**, men vandet flyttes hovedsageligt internt i akviferen, ikke nødvendigvis “ud” af systemet.

Kort svar:

Ved lagring af **40 millioner ton superkritisk CO₂** vil omkring **57 millioner kubikmeter saltvand** blive fortrængt ($\approx 0,06 \text{ km}^3$), hvilket er ca. **en tredjedel af porerummet** i det lokale reservoirvolumen i eksemplet.

ChatGPT konversation 2

Forbehold: Vi har flere gange oplevet forkerte og utilstrækkelige svar fra ChatGPT.

Det skal dog nævnes, at vi har fået ChatGPT til at angive kilder for næsten alle "udtalelser", hvilket øger troværdigheden. Vi har ikke haft tid til at tjekke alle udtalelser med de angivne kilder, men der er heller ikke tale om essentielle konklusioner, som vi har brugt i vores argumentationer.

Der er til gengæld ikke rettet på sproget (til bedre dansk) og det er ikke altid lige kønt, da ChatGPT arbejder på engelsk og oversætter frem (spørgsmålet) og tilbage (svaret).

kunne du give mig svaret på mit første spørgsmål (hvad sker der, når CO₂ i kritisk form kommer i forbindelse med saltvand?) igen, denne gang med kilder for alle dine udtalelser?

Godt — her får du en fyldig, kildeunderbygget forklaring på, hvad der sker, når **CO₂ i superkritisk/"kritisk" form** møder **saltvand (brine)** i en akvifer. Jeg har opdelt det i mekanismer (hvad der fysisk/kemisk sker), kvantiteter/tidsrum (hvor hurtigt og hvor meget), og praktiske konsekvenser, og sætter kilder efter hver vigtig påstand eller tal.

Kort svar først (én sætning)

Når superkritisk CO₂ møder saltvand, danner der sig først en to-fase situation (en lettere CO₂-fase ovenpå saltvandet), en del CO₂ opløses i brinen og danner kulsyre (sænker pH), hvilket kan ændre ionbalancer og reagere med mineraler (residual- og mineraltrapping over tid). Opløsningen påvirkes stærkt af tryk, temperatur og salinitet, og processen kan accelereres af tætheds-drevet konvektion. ([Edinburgh Blogs](#))

1) Faseadskillelse og umiddelbar opførsel

- Ved reservoirdybder (>~800 m) er CO₂ tæt (superkritisk/"tæt" fase) og **mindre tæt end brine**, så CO₂ akkumulerer som en separat, frit bevægelig fase under en kaprock. Dette er fundamentet for strukturel lagring. ([Edinburgh Blogs](#))

2) Opløsning i brine og pH-effekt

- En fraktion af CO₂ **opløses i vandet** ved fasegrænsen og danner kulsyre: $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{H}_2\text{CO}_3 \rightleftharpoons \text{H}^+ + \text{HCO}_3^- \rightleftharpoons 2\text{H}^+ + \text{CO}_3^{2-}$ — dermed falder pH lokalt. Dette er grundlæggende kemisk ligevægt for CO₂-vand-systemet. ([CO₂ - CATO](#))
- Typiske størrelsesordener: tidligere studier og oversigter bruger ofte tal omkring **tens af kg CO₂ pr. m³ brine** ved reservoirforhold (fx ~40 kg CO₂/m³ som en karakteristisk værdi i mange kapacitetsoverslag), men dette afhænger stærkt af tryk, temperatur og salinitet. (Se tabeller/eksperimenter i litteraturen for nøjagtige PT/NaCl-afhængige værdier.) ([Princeton University](#))

3) Effekt af tryk, temperatur og salinitet

- **Højere tryk → højere opløselighed; højere temperatur → typisk lavere opløselighed; høj salinitet → lavere opløselighed.** Det er vel-dokumenteret eksperimentelt og via EOS-modeller (fx Duan-modeller og efterfølgende eksperimenter). ([CO2 - CATO](#))

4) Transport — diffusion først, så tæthedsdrevet konvektion

- **I starten** er opløsningen styret af molekylær diffusion (langsomt). ([SciSpace](#))
- Når nok CO₂ er opløst i det øverste brinelag, bliver det CO₂-rige brine **tungere** end underliggende brine og synker — det giver **tætheds-drevet konvektion** (“**fingering**”), som dramatisk øger blanding og opløsning af CO₂ i brinen. Denne omskiftning kan reducere opløsningstider fra geologiske skalaer til **hundreder–tusinder af år** for betydelig opløsning i feltskala (men præcise tal afhænger af permeabilitet, tykkelse, porøsitet osv.). ([MDPI](#))

5) Residual- og mineraltrapping

- Udover opløsning findes to vigtige “immobiliserende” mekanismer:
 - **Residual trapping:** CO₂-fasen efterlades i porerummet som isolerede dråber/bobler, som fastholdes af kapillærtryk (sker relativt hurtigt i 10⁻¹–10² år skala). ([ScienceDirect](#))
 - **Mineral trapping (karbonatisering):** CO₂-opløst brine kan reagere med opløsbare cationer i formationens mineraler (Ca²⁺, Mg²⁺, Fe²⁺) og efter lang tid danne faste karbonatmineraler (f.eks. calcit, siderit). Dette er langsigtet og kan være permanent, men går normalt over **10⁴–10⁶ år** i mange sandstensformationer (kan være hurtigere i basaltiske formationer). ([ScienceDirect](#))

6) Hvor hurtigt og hvor meget opløses — reelle felteksempler og modellering

- Felt- og monitoringdata (fx Sleipner) viser, at **en stor andel af CO₂ først ligger som fri fase**, mens opløsnings- og konvektionsprocesser gradvist øger den opløste fraktion over årtier–århundreder. Sleipner-studier dokumenterer plumeudbredelse, massebalance og løbende ændringer i fri CO₂ vs opløst CO₂ ved gentagne seismiske og gravimetriske surveys. ([ScienceDirect](#))
- Numeriske studier viser også, at opløsningstrapping kan nå betydelige andele (tiere procent eller mere) over hundreder af år og næsten fuldstændig opløsning i tusinder af år i visse scenarier — men præcis hastighed afhænger stærkt af reservoirparametre (permeabilitet, tykkelse, porøsitet, baggrundsflow). ([Seastar](#))

7) Andre relevante effekter

- **Vand kan opløses i CO₂-fasen** i mindre grad (CO₂ kan indeholde lidt vand), hvilket påvirker korrosion og faseegenskaber. EOS-modeller (Duan mv.) og eksperimentelle data beskriver disse blandingsegenskaber. ([CO2 - CATO](#))
- **Geokemiske ændringer** kan ændre porøsitet/permeabilitet (opløsning/precipitation), hvilket igen påvirker flow og lagringssikkerhed; dette er omfattet i eksperimentelle og modelstudier. ([Bora](#))

Hovedkilder (udvalgte, til videre læsning)

1. Ringrose, P. S. et al. — review om lagring i saline akviferer (god oversigt over faseadfærd, tæthed og drift). ([Edinburgh Blogs](#))
 2. Bruant Jr. et al., *Environmental Science & Technology* (2002) — brugte typisk opløselighedsorden $\sim 40 \text{ kg CO}_2/\text{m}^3$ i kapacitetsestimater; god reference for størrelsesorden. ([Princeton University](#))
 3. Hangx & Hovorka / $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O}$ system-opsummeringer (teknisk review om $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O-NaCl}$ EOS og eksperimenter). ([CO2 - CATO](#))
 4. Bachu (1994) og senere reviews — om mineral trapping / geokemi ved CO_2 i akviferer. ([ScienceDirect](#))
 5. Artikler om tætheds-drevet konvektion og eksperimenter (fx Teng/Tang/Wang & reviews) — dokumenterer “fingering” og hvor meget det accelererer opløsning. ([ACS Publications](#))
 6. Feltstudier og overvågning: Sleipner (tidssvarende monitoring og bevis for faseadskillelse og langsom opløsning). ([ScienceDirect](#))
-

jeg vil gerne stille mit andet spørgsmål (hvis man pumper superkritisk CO_2 ned i akviferer så vil CO_2 en altså blande sig med saltvandet. hvor meget og hvor hurtigt vil det blande sig og hvor meget vand skal i stedet fortrænges?) igen og bede om svar med kildeangivelse for alle udsagn

Godt — her får du en samlet, kildeunderbygget gennemgang på dansk af, hvad der sker **(1)** fysisk og kemisk, **(2)** hvor meget CO_2 der typisk opløses (størrelsesordener), **(3)** hvor hurtigt de forskellige processer går, og **(4)** hvordan man beregner hvor meget vand der fortrænges. Jeg sætter kilder efter de vigtigste udsagn (de mest «load-bearing»), og linker til relevante felteksempler (fx Sleipner) og faglige oversigter, så du kan dykke videre ned.

1) Kort opsummering (én sætning)

Når superkritisk CO_2 (scCO_2) injiceres i en salin akvifer, danner den først en adskilt, lettere CO_2 -fase under en tæt kaprock; en del af CO_2 -en opløses i brinen og danner kulsyre (sænker pH), hvilket kan føre til ionudveksling og — på længere sigt — udfældning af karbonatminerale. Samtidig fortrænges brine lokalt af CO_2 -volumenet. ([IPCC](#))

2) Fysisk opførsel ved injection (faseadskillelse + fortrængning)

- **Faseadskillelse:** Ved reservoirdyp (typisk $> \sim 800\text{--}1\,000 \text{ m}$) er CO_2 i en tæt/superkritisk fase og er *mindre tæt* end formationens saltlage; derfor samler den sig som en separat CO_2 -sæk («free phase») under caprocken. Dette er grundlaget for strukturel/stratigrafisk lagring. ([IPCC](#))

- **Vandfortrængning:** Når scCO_2 fylder porer, *fortrænger* den omtrent samme porervolumen af brine (porerum er enten vand- eller CO_2 -fyldt). Derfor svarer det volumen af scCO_2 i reservoirporer groft set til det volumen brine, der lokalt flyttes. (Se reservoirteori og feltrapporter som Sleipner for anvendt masse- og volumenbalance.) ([IPCC](#))

3) Hvor meget CO_2 opløses i brinen (typiske størrelsesordener)

- **Opløselighed afhænger stærkt af tryk, temperatur og salinitet.** Generelt: højere tryk $\rightarrow$ mere opløst CO_2 ; højere temperatur og højere salinitet $\rightarrow$ mindre opløselighed. Dette er veldokumenteret både eksperimentelt og i EOS/modeller. ([ACS Publications](#))
- **Størrelsesorden:** Under typiske reservoirforhold (hundreder af bar; temperatur $\sim 40\text{--}100^\circ\text{C}$; salinitet typisk tens–hundrede g/L NaCl) ligger opløseligheden ofte i størrelsesordenen **tens af kg CO_2 pr. m^3 brine** — fx mange kilder bruger karakterværdier omkring **$\sim 20\text{--}50\text{ kg CO}_2/\text{m}^3$** til grove kapacitetsestimater. Den præcise værdi kræver PT-NaCl-beregning (Duan-type EOS eller målte tabeller). ([ResearchGate](#))

Eksempel: en m^3 brine kan altså typisk opløse nogle få 10'ere kilogram CO_2 under reservoirbetingelser — ikke hele den injicerede CO_2 -masse. ([ACS Publications](#))

4) Hvor hurtigt sker blandingen (tidsskalaer og mekanismer)

Processerne sker på meget forskellige tidsskalaer:

1. **Øjeblikkeligt — fortrængning (sekunder $\rightarrow$ dage):**
 - Under injektion fortrænges brine fra porer nær brønden næsten straks; det er en hydraulisk/immiscibel fortrængningsproces styret af injektionsrate og lokal permeabilitet. ([IPCC](#))
2. **Kort-til-mellemlang (år $\rightarrow$ årtier) — opløsning langs fasegrænse og start af konvektion:**
 - Først opløses CO_2 ved grænsefladen primært ved molekylær diffusion — meget langsomt. Når et nok CO_2 -have opløses i den øverste brinesøjle, bliver den lokalmente *tungere* og synker — det starter tætheds-drevet konvektion («fingering»), som **markant** øger blanding og opløsning af CO_2 i brine. Laboratorieeksperimenter og numeriske studier viser, at denne omstilling (fra diffusion til konvektion) kan øge opløsningshastigheden med flere størrelsesordener. ([APS Link](#))
3. **Langt (hundreder $\rightarrow$ tusinder år) — betydelig opløsning og delvis mineralisering:**
 - På feltskala kan konvektionsaccelereret opløsning føre til at en væsentlig del (tiere procent eller mere) af CO_2 bliver opløst over **hundreder år** i mange sandscenarier; fuld opløsning/mineralisering kan tage tusinder–hundreder-tusinder af år, afhængig af kemisk reaktivitet og mineraltilgængelighed. Feltobservationer (f.eks. Sleipner) viser, at den fri CO_2 -fase kan blive liggende i årtier, mens opløsning sker gradvist. ([AGU Publications](#))

Kort sagt: **fortrængning er øjeblikkelig; fuld blanding via opløsning alene ville være ekstremt langsom uden konvektion; tætheds-drevet konvektion kan gøre processen meget hurtigere**

(fra geologiske til praktiske tidsskalaer), men 'hurtigere' stadig måles i årtier–hundreder. ([APS Link](#))

5) *Hvor meget af den injicerede CO₂ bliver immobiliseret på forskellige tidsskalaer?*

- **Strukturel trapping (fri CO₂ under caprock):** straks/årtier — den største fraktion kortsigtet.
- **Residual (capillary) trapping:** sker i løbet af injection → årtier; fanger en del CO₂ som isolerede droplet i porer. ([IPCC](#))
- **Solubility trapping (opløsning i brine):** øges over århundreder via konvektion; kan blive en væsentlig brøkdel over hundreder år. ([APS Link](#))
- **Mineral trapping (karbonatisering):** normalt langsomt (10⁴–10⁶ år i typiske sandstensakviferer), men i basaltiske formationer kan processe gå hurtigere. ([IPCC](#))

(Felt eksempel: Sleipner viser, at store mængder CO₂ kan opbevares sikkert i fri fase i årtier samtidig med gradvis opløsning; monitoringdata bruges til at skønne opløst vs fri fraktion over tid.) ([AGU Publications](#))

6) *Hvor meget vand fortrænges — kort forklaring + hvordan regneeksempel*

- **Grundprincip:** Det volumen scCO₂ optager i porerne $\approx$ det volumen brine, som lokaliseret fortrænges (porerummet kan kun være vand- eller CO₂-fyldt). Derfor får du omtrent 1 m³ fortrængt brine per 1 m³ scCO₂ i reservoirporer (dvs. volumen-til-volumen). Dette er standard reservoir-volumenbalance. ([IPCC](#))

Praktisk regneeksempel (samme metode som vi tidligere brugte):

- Hvis du injicerer **M** kg CO₂ og bruger en scCO₂-densitet ρ (typisk $\sim 600\text{--}800\text{ kg/m}^3$ afhængig af P/T), så er CO₂-volumenet i reservoir (V_{CO2}=M/ ρ). Det samme omtrentlige volumen brine fortrænges i porerummet. Densitets-interval og references for scCO₂ findes i standardtabeller/EOS. ([ResearchGate](#))

Eksempel: 300 Mt CO₂ med $\rho \approx 700\text{ kg/m}^3 \rightarrow (V_{\text{CO2}} \approx 4.29 \times 10^8)\text{ m}^3 \rightarrow \approx 429\text{ millioner m}^3$ brine fortrængt ($\approx 0.429\text{ km}^3$). (Metoden og antagelsen — volumenbevarelse i porerummet — er standard i reservoirbalance og bruges i kapacitetsestimater i litteraturen). ([IPCC](#))

7) *Feltdata / references (nøgleeksempler)*

- **IPCC Special Report on CCS (kapitel om geologisk lagring)** — omfattende opsummering af processer (strukturel, residual, solubility, mineral trapping), tidsskalaer og risici. Bruges ofte som primær oversigtskilde. ([IPCC](#))
- **Sleipner-projektet (feltstudier og seismisk overvågning)** — empirisk dokumentation af, hvordan injiceret CO₂ opfører sig i en salin akvifer over årtier; viser fri fase + langsom opløsning og distribution. Se Boait et al. (2012) og nyere samlestudier. ([AGU Publications](#))

- **Laboratorie- og modelstudier af konvektionsaccelereret opløsning** (f.eks. Mahmoodpour et al. 2019, Emami-Meybodi-reviews) — dokumenterer fingering-mekanismen og dens effekt på mix/hastighed. ([APS Link](#))
- **Målinger og modeller for CO₂-opløselighed i brine** (forskellige publikationer og sammenligninger — eksperimenter + Duan-type EOS) — for PT-NaCl-afhængige tal. For nylige tabeller/korrelationer se Zou et al. (2024) og reviews. ([ACS Publications](#))

8) Hvad betyder det i praksis (konklusion)

- **Kort sigt:** injektion flytter/fortrænger brine lokalt med det samme; størstedelen af CO₂ ligger som fri fase under caprock. ([IPCC](#))
 - **Mellemlang sigt:** opløsning langs grænsen + tætheds-drevet konvektion øger opløst fraktion over årtier–hundreder; denne proces er nøglen til langsigtet immobilisering. ([APS Link](#))
 - **Lang sigt:** mineralisering kan fikse CO₂ permanent, men ofte over meget lange tidsskalaer (tusinder+ år), undtagen i særlige reaktive formationer. ([IPCC](#))
-

Referencer

- ⁱ <https://www.geus.dk/om-geus/nyheder/nyhedsarkiv/2025/okt/co%E2%82%82-lagringspotential-et-i-danmark-opdateres-loebende-i-takt-med-ny-viden> (27/10-2025)
- ⁱⁱ Christopher Whalen: "The struggle to make CCS work. Carbon Commentary July 30, 2021
- ⁱⁱⁱ www.geus.dk/udforsk-geologien/fangst-og-lagring-af-CO2-CCS. "Hvordan virker CCS")
- ^{iv} Peter Milne: "Chevrons Gorgon CO2 injection fix needs more time so more emissions". Boiling Cold July 02 2021)
- ^v Deep Trouble. The Risk of Offshore Carbon Capture and Storage. Center for Environmental Law nov. 2023 s.20
- ^{vi} Definition af 'brine': Se evt. <https://en.wikipedia.org/wiki/Brine>
- ^{vii} Tim Baxter: Gorgon carbon capture and storage project: The failure of the world's largest facility. Medium nov.2024
- ^{viii} En beregning foretaget med ChatGPT viser, at 40 mt CO₂ vil fortrænge ca. 57 millioner m³ saltvand på kortere sigt (men stadig mange år). Med den faktor, vil der med 12mt CO₂ årligt fortrænges 17 millioner m³ saltvand. 300mt CO₂ vil fortrænge 417 mio. m³ saltvand. Der skønnes at være ca. 4,6 mia m³ vand i Køge Bugt. Havnsø alene skal altså fortrænge 9% af vandmængden i Køge Bugt. (Det skal dog tilføjes, at vandet primært flyttes lokalt omkring injektionsområdet, hvor trykket stiger. En del vand presses ud i nærliggende porer eller opad i reservoiret. Nogle steder kan vand trænge op i overliggende lag (hvis der findes hydrauliske forbindelser)). Se mere i Bilag 14.
- ^{ix} Se Bilag 15 om ændringerne i estimerterne
- ^x Se Bilag 15
- ^{xi} Karen S. Pedersen, Kapexy. Mail af 30.10.2025, gengivet i Bilag 1
- ^{xii} Magnus Bredsdorff: Danmark har voldsomt overvurderet potentialet for sit vigtigste klimafix. Politiken den 26.10.2025